Неприятности с физикой: взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует

Ли Смолин, 2006 г.

Lee Smolin. The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next
Houghton Mifflin, Boston, 2006. ISBN 9780618551057 0618551050
Перевод с английского издания: Артамонов Юрий Александрович

Аннотация: Новая книга Ли Смолина «Неприятности с физикой...» эмоционально противоположна восторженному энтузиазму книг Брайана Грина. У современных теорий переднего края (прежде всего, у теории струн) есть немалые проблемы, и честный разговор о них служит этаким ведром холодной воды на горячие головы. Ли Смолин известен как один из отцов-основателей теории петлевой квантовой гравитации – главного конкурента струнного подхода, – а также как автор книг Life of the Cosmos (1997) и Three Roads to Quantum Gravity (2001), в России не издававшихся. Книга местами не проста для осмысления, но весьма информативна. В ней в одном месте собраны самые последние результаты, которые неспециалисту было бы нелегко найти по первоисточникам. В первых трех частях книги оценивается состояние фундаментальной физики под тем углом, что теория струн зашла в тупик, приводятся свежие экспериментальные данные, не находящие объяснения в ее рамках. Четвертая часть посвящена организации (западной) академической науки и социальным причинам стагнации в области фундаментальной физики.

Посвящается Кэй

Введение

Может быть или может не быть Бога. Или богов. Однако есть что-то облагораживающее в нашем поиске божественного. А также нечто очеловечивающее, что отражается в каждом из путей, которые открывали люди, чтобы привести нас к более глубоким уровням истины. Некоторые отыскивают трансцедентное в медитации и молитве; другие ищут его в служении своим близким людям; еще другие, кто достаточно счастлив, чтобы иметь талант, ищут запредельное, занимаясь искусством.

Другим путем, затрагивающим самые глубокие вопросы жизни, является наука. Не то, чтобы каждый ученый являлся исследователем; большинство как раз нет. Но в рамках каждой научной дисциплины имеются те, кто страстно стремится узнать что-то самое существенно правильное о своей теме. Если они

математики, они хотят знать, что есть числа или какой вид истины описывает математика. Если они биологи, они хотят знать, что есть жизнь и как она возникла. Если они физики, они хотят знать все о пространстве и времени и что привело мир к существованию. Эти фундаментальные вопросы наиболее тяжелы для ответов, и прогресс редко бывает непрерывным. Только горстка ученых имеет настойчивость для такой работы. Это один из самых рискованных видов деятельности, но велика и награда: когда кто-то отвечает на вопрос об основаниях той или иной темы, он может изменить все, что мы знаем.

Поскольку добавлять что-то в наше растущее хранилище знаний является их работой, ученые проводят свои дни, борясь с тем, чего они не понимают.

И те ученые, кто работает над основаниями любой заданной области, полностью осознают, что кирпичи в основании здания никогда не бывают так тверды, как склонны верить их коллеги.

Это история о поиске понимания природы не ее самом глубоком уровне. Ее главными героями являются ученые, которые работали, чтобы расширить наше знание основных законов физики. Период времени, к которому я буду обращаться, – грубо с 1975 года, – является промежутком и моей собственной профессиональной карьеры как физика-теоретика. Он же может быть и самым странным и разочаровывающим периодом в истории физики с тех времен, когда Кеплер и Галилей четыреста лет назад положили начало практике нашего ремесла.

История, о которой я буду говорить, могла бы читаться некоторыми как трагедия. Говоря прямо, – и чтобы обозначить линию удара, – мы потерпели неудачу. Мы унаследовали науку, физику, которая прогрессировала настолько быстро и настолько долго, что часто принималась за образец того, как должны действовать другие области науки. На протяжении более чем двух столетий до сегодняшнего времени наше понимание законов природы быстро расширялось. Но сегодня, несмотря на все усилия, то, что мы достоверно знаем об этих законах, не превышает того, что мы знали о них в 1970е.

Насколько необычно то, что на протяжении трех десятков лет в фундаментальной физике не произошло значительного прогресса? Даже если мы посмотрим назад более чем на двести лет, в те времена, когда наука большей частью касалась богатых любителей, это беспрецедентно. По меньшей мере, с конца восемнадцатого века существенный прогресс по ключевым вопросам достигался каждые четверть века.

К 1780, когда количественные химические эксперименты Антуана Лавуазье показали, что материя сохраняется, законы движения и гравитации Исаака Ньютона уже существовали почти сто лет. Но, хотя Ньютон дал нам систему для понимания всей природы, граница была широко открыта. Люди еще только начали изучать основные факты о материи, свете и теплоте, и еще предстояло прояснить загадочные явления вроде электричества и магнетизма.

На протяжении следующих двадцати пяти лет главные открытия были сделаны в каждой из этих областей. Мы начали понимать, что свет есть волна. Мы открыли закон, который управляет силами между электрически заряженными частицами. И мы сделали гигантский скачок в нашем понимании материи с атомной теорией Джона Дальтона. Было введено понятие энергии, интерференция и дифракция были объяснены в терминах волновой теории света, было обнаружено электрическое сопротивление и взаимосвязь между электричеством и магнетизмом.

В следующую четверть века, с 1830 по 1855, возникло несколько основных концепций, лежащих в основе современной физики. Майкл Фарадей осознал, что силы передаются полями; использованная им идея привела к величайшему продвижению нашего понимания электричества и магнетизма. В течение того же периода было предложено сохранение энергии, а также второй закон термодинамики.

В следующей четверти века пионерские идеи Фарадея о полях были применены Джеймсом Клерком Максвеллом в нашей современной теории электромагнетизма. Максвелл не только объединил электричество и магнетизм, он объяснил свет как электромагнитную волну. В 1867 он объяснил поведение газов в терминах атомной теории. В течение того же периода Рудольф Клаузиус ввел понятие энтропии.

Период с 1880 по 1905 отметился открытиями электрона и Х-лучей. В несколько этапов было проведено изучение теплового излучения, которое привело в 1900 к открытию Максом Планком правильной формулы для описания тепловых свойств радиации – формулы, которая воспламенит квантовую революцию.

В 1905 Альберту Эйнштейну было двадцать шесть лет. Он не смог получить академическую работу, несмотря на тот факт, что одни его ранние труды по физике теплового излучения могли бы рассматриваться как важный вклад в науку. Но это была только разминка. Вскоре он сосредоточился на фундаментальных вопросах физики: и первое, как относительность движения могла бы согласовываться с законами электричества и магнетизма Максвелла? Об этом он рассказал нам в своей специальной теории относительности (СТО). Должны ли мы думать о химических элементах как о ньютоновских атомах? Эйнштейн доказал нам, что должны. Как мы можем согласовать теории света с существованием атомов? Эйнштейн сказал нам, как, и в процессе показал, что свет является как волной, так и частицами. И все это в 1905, во время, выкроенное из его работы в должности патентного поверенного.

Результаты эйнштейновских прозрений сказались в следующей четверти века. К 1930 мы имели его общую теорию относительности (ОТО), которая сделала революционное утверждение, что геометрия пространства не фиксирована, а развивается во времени. Корпускулярно-волновой дуализм, открытый Эйнштейном в 1905, стал полностью реализованной квантовой теорией, которая дала нам детальное понимание атомов, химии, материи и радиации. К 1930 мы также знали, что вселенная содержит гигантские количества галактик, подобных нашей собственной, и мы узнали, что они удаляются прочь друг от друга. Следствия еще не были ясны, но мы узнали, что мы живем в расширяющейся вселенной.

С созданием квантовой теории и ОТО как части нашего понимания мира закончился первый этап революции в физике двадцатого века. Многие профессора физики, некомфортно чувствовавшие себя из-за революции в их областях компетентности, успокаивались мыслью, что мы должны бы вернуться назад к развитию науки нормальным путем, без обращения на каждом повороте к вопросам о наших основополагающих представлениях. Но это успокоение было преждевременным.

Эйнштейн умер в конце следующей четверти века, в 1955. К тому моменту мы узнали, как последовательно объединить квантовую теорию с СТО; это было великое достижение поколения Фримена Дайсона и Ричарда Фейнмана. Мы открыли нейтрон и нейтрино, а также сотни других предположительно элементарных частиц. Мы также поняли, что мириады явлений в природе управляются всего четырьмя силами: электромагнетизмом, гравитацией, сильными ядерными силами (которые удерживают как целое атомные ядра) и слабыми ядерными силами (ответственными за радиоактивный распад).

Следующая четверть века приводит нас к 1980. К этому моменту мы сконструировали теорию, объясняющую результаты всех наших экспериментов над элементарными частицами и силами на тот момент, – теорию, названную стандартной моделью физики элементарных частиц. Например, стандартная модель точно говорила нам, как протоны и нейтроны собираются из кварков, которые удерживаются вместе глюонами, носителями сильного ядерного взаимодействия. Впервые в истории фундаментальной физики теория совпала с экспериментом. С этого момента не было сделано ни одного эксперимента, который бы не соответствовал этой модели или ОТО.

Двигаясь от очень малого к очень большому, наше знание физики теперь распространилось к новой науке о космологии, где общепринятым взглядом стала теория Большого Взрыва. Мы осознали, что наша вселенная содержит не только звезды и галактики, но и экзотические объекты, такие как нейтронные звезды, квазары, сверхновые и черные дыры. К 1980 Стивен Хокинг уже сделал фантастическое предсказание о том, что черные дыры излучают. Астрономы также получили доказательства, что вселенная содержит много темной материи – что означает, материи в форме, которая не излучает и не отражает свет.

В 1981 космолог Алан Гут предложил сценарий для очень ранней истории вселенной, названный инфляцией. Грубо говоря, эта теория утверждает, что вселенная в очень ранний момент своей жизни прошла через рывок гигантского роста, и это объясняет, почему вселенная выглядит почти совсем одинаково в каждом направлении. Теория инфляции сделала предсказания, которые казались

сомнительными до момента десятилетней давности, когда к ней начали поступать доказательства. Как об этом пишут, осталось несколько загадок, но весь объем доказательств поддерживает предсказания инфляции.

Таким образом, к 1981 физики отпраздновали двести лет взрывного роста. Открытие за открытием углубляли наше понимание природы, поскольку в каждом случае теория и эксперимент маршировали рука об руку. Новые идеи проверялись и подтверждались, а новые экспериментальные открытия объяснялись в терминах теории. Затем в начале 1980х ситуация вынужденно встала.

Я принадлежал к первому поколению физиков, образовавшемуся с момента установления стандартной модели физики частиц. Когда я встречаю старых друзей из колледжа и высшей школы, мы иногда спрашиваем друг друга: «Что такого мы открыли, чем бы наше поколение могло гордиться?» Если мы имеем в виду новые фундаментальные открытия, установленные экспериментом и объясненные теорией, – открытия на уровне тех, которые только что упоминались, – ответ, который мы должны признать, таков: «Ничего!» Марк Визе является ведущим теоретиком, работающим в физике частиц за пределами стандартной модели. На недавнем семинаре в Пограничном институте теоретической физики в Ватерлоо, Онтарио, где я работаю, он говорил о проблеме, откуда взялась масса элементарных частиц. Он сказал: "Мы были необыкновенно безуспешны в решении этой проблемы. Если я должен был бы рассказать о проблеме массы фермионов сейчас, я, вероятно, закончил бы рассказ вещами, которые я мог бы иметь в 1980х"[1]. Он рассказал историю о том, как он и Джон Прескилл, другой ведущий теоретик, прибыли в 1983 в Калифорнийский технологический институт, чтобы встретиться со своим факультетом. "Джон Прескилл и я сидели вместе в его офисе, разговаривали... . Джон сказал: «Ты знаешь, в Калтехе были боги физики, а теперь тут мы! Я стараюсь не забыть, что является важным, чтобы продолжать работать над ним.» Затем он заговорил о том, что было известно о массах кварков и лептонов, записал это на страничке желтой бумаги и приколол ее к своей доске для заметок, ... так же, чтобы не забыть поработать над ним. Через пятнадцать лет я прохожу через его офис, ... и мы разговариваем о чем-то, и я бросаю взгляд на его доску для заметок, и (отметьте это) этот листок бумаги все еще здесь, только все, что было на нем написано, выгорело на солнце. Так решались проблемы!"

Чтобы быть честным, мы сделали два экспериментальных открытия в последние два десятилетия: что нейтрино имеет массу и что во вселенной доминирует загадочная темная энергия, которая, кажется, ускоряет расширение вселенной. Но у нас нет идей, *почему* нейтрино (или любая из других частиц) имеет массу или что объясняет величину их массы. Так же и с темной энергией, она не объясняется в терминах любой существующей теории. Поэтому, ее открытие нельзя расценивать как успех, оно наводит на мысль, что имеется некоторый важнейший факт, которого нам всем не хватает. А исключая темную энергию, не было открыто новых частиц, не были найдены новые силы, мы не столкнулись ни с одним новым явлением, которое не было бы известно и понято двадцать пять лет назад.

Не поймите меня неправильно. Последние двадцать пять лет мы определенно были очень заняты. Достигнут гигантский прогресс в приложениях установленных теорий для различных объектов: свойств материалов, молекулярно-физических основ биологии, динамики обширных звездных скоплений. Но когда мы подходим к расширению нашего знания о законах природы, мы не имеем настоящего прогресса. Были исследованы многие прекрасные идеи, и были выдающиеся эксперименты на ускорителях частиц и космологические наблюдения, но они, большей частью, служили для подтверждения существующих теорий. Имелось несколько скачков вперед, но ни одного столь же определяющего или важного, как в предыдущие двести лет. Когда что-то похожее происходит в спорте или бизнесе, это называется упереться в стену.

Почему физика вдруг оказалась в затруднении? И что мы можем с этим сделать? Это центральные вопросы моей книги.

Я по натуре оптимист, и долгое время я боролся с заключением, что этот период в физике – период моей

собственной карьеры – был необычно бесплодным. Для меня и многих моих друзей, кто пошел в науку в надежде сделать важный вклад в то, что было быстро растущей областью, это был шокирующий факт, к которому мы вынуждены подойти со словами: в отличие от предыдущих поколений, мы не достигли ничего, что мы могли бы завещать пережившим нас. Это дает начало персональным кризисам. Но, что более важно, это вызывает кризис в физике.

Главная задача для теоретической физики частиц на протяжении последних трех десятилетий состояла в более глубоком объяснении стандартной модели. Здесь было очень много активности. Постулировались и анализировались новые теории, некоторые очень детально, но ни одна не была подтверждена экспериментально. И здесь центр проблемы: в науке, чтобы мы были уверенными в теории, она должна делать новые предсказания – отличающиеся от тех, что делали предыдущие теории, – для еще не выполненных экспериментов. Чтобы эксперимент был осмысленным, мы должны быть в состоянии получить ответ, который расходится с этими предсказаниями. Когда это так, мы говорим, что теория *фальсифицируема* – уязвима по отношению к тому, чтобы оказаться опровергнутой. Теория также должна быть *подтверждаема*, должно быть возможным проверить новые предсказания, которые делает только эта теория. Только когда теория проверена и результаты с ней согласуются, мы можем продвинуть теорию в разряд верных теорий.

Текущий кризис в физике частиц вытекает из факта, что теории, которые предлагались за пределами стандартной модели в последние тридцать лет, распадаются на две категории. Некоторые были фальсифицируемы, и они были опровергнуты. Остаток теорий проверке не подвергался – или потому, что они не делают чистых предсказаний, или потому, что сделанные ими предсказания не проверяемы на сегодняшнем уровне технологии.

За последние тридцать лет теоретики предложили, по меньшей мере, дюжину новых подходов. Каждый подход был мотивирован убедительными гипотезами, но ни один до сегодняшнего дня не был успешен. В области физики частиц эти подходы включали техниколор, преонные модели и суперсимметрию. В области пространства-времени эти подходы включали теорию твисторов, причинные ряды, супергравитацию, динамические триангуляции и петлевую квантовую гравитацию. Некоторые из этих идей столь же экзотичны, как и их название.

Одна теория привлекла больше внимания, чем все остальные вместе: теория струн. Причину ее популярности нетрудно понять. Она претендовала на корректное описание большого и малого – как гравитации, так и элементарных частиц, – и, чтобы сделать это, она выдвинула самую смелую гипотезу из всех теорий: она постулировала, что мир содержит до сих пор не виданные измерения и намного больше частиц, чем известно в настоящее время. В то же время, она предположила, что все элементарные частицы возникают из колебаний единственной сущности – струны, – которая подчиняется простым и красивым законам. Она претендовала на роль единственной теории, которая объединяет *все* частицы и *все* силы в природе. По существу, она обещала сделать чистые и недвусмысленные предсказания для любого эксперимента, который когда-либо будет или мог бы быть сделан. В последние двадцать лет в теорию струн было направлено много усилий, но мы все еще не знаем, является ли она правильной. Даже после всех этих трудов теория не делает новые предсказания, которые являются проверяемыми сегодняшними – или даже мыслимыми сегодня – экспериментами. Несколько чистых предсказаний, которые она делает, уже были сделаны другими, хорошо признанными теориями.

Часть причин, по которым теория струн не делает новых предсказаний, заключается в том, что она предстает перед нами в бесконечном количестве версий. Даже если мы ограничимся теориями, которые согласуются с некоторыми базовыми наблюдаемыми фактами о нашей вселенной, такими как ее огромный размер и существование темной энергии, мы останемся примерно с 10^{500} различными струнными теориями, – что означает единицу с 500 нулями после нее, больше, чем количество всех атомов в известной вселенной. С таким чудовищным числом теорий почти нет надежды, что мы сможем идентифицировать результат эксперимента, который не был бы выполнен одной из них. Таким образом, что бы ни показывал эксперимент, теория струн не может быть опровергнута. Но обратное тоже имеет место: не будет сделано когда-либо никаких экспериментов, которые смогли бы проверить ее правильность.

В то же время, мы очень мало понимаем в большинстве из этих теорий струн. И лишь малое число мы понимаем во всех деталях, каждая такая отдельная теория расходится с сегодняшними экспериментальными данными, обычно, по меньшей мере, в двух отношениях.

Так что мы стоим перед парадоксом. Те теории струн, которые мы знаем как изучать, известны как ошибочные. Те же, которые мы не можем изучить, мыслятся существующими в таких гигантских количествах, что ни один мыслимый эксперимент никогда не сможет их все опровергнуть.

Это не единственная проблема. Теория струн покоится на нескольких ключевых предположениях, для которых имеются некоторые основания, но нет доказательств. Даже хуже, после всех научных усилий, потраченных на ее изучение, мы все еще не знаем, имеется ли полная и последовательная теория, которая как раз и могла бы отзываться на имя «теория струн». Фактически, то, что мы имеем, совсем не является теорией, а лишь большой коллекцией приблизительных расчетов вместе с сетью догадок, которые, если они верны, указывают на существование теории. Мы не знаем, каковы ее фундаментальные принципы. Мы не знаем, на каком математическом языке она должна быть выражена – возможно, в будущем должен быть изобретен новый язык, чтобы описать ее. В отсутствие обоих фундаментальных принципов (подтверждаемость, фальсифицируемость) и математической формулировки мы не можем сказать, что мы даже знаем, что провозглашает теория струн.

Вот как струнный теоретик Брайан Грин представляет это в своей последней книге *Ткань космоса*: «Даже сегодня, более чем через три десятилетия после ее первоначального озвучивания большинство струнных практиков уверены, что мы все еще не имеем всестороннего ответа на элементарный вопрос: что есть теория струн? ... [Б]ольшинство исследователей чувствует, что наша сегодняшняя формулировка теории струн все еще нуждается в некой разновидности центральных принципов, которые мы нашли в основании других великих достижений».[2]

Герард т'Хоофт, обладатель нобелевской премии за его труды в физике элементарных частиц, охарактеризовал состояние теории струн следующим образом: "На самом деле, я не стал бы даже пытаться называть теорию струн 'теорией', а не 'моделью' или даже так: просто предчувствием. В конце концов, теория должна выйти с инструкциями о том, как действовать в ее рамках, чтобы идентифицировать вещи, которые она хочет описать, в нашем случае элементарные частицы, и она должна быть в состоянии, по меньшей мере, в принципе, сформулировать правила для расчетов свойств этих частиц и как делать новые предсказания для них. Представим, что я даю вам кресло, одновременно объясняя, что ножки все еще отсутствуют, и что сидение, спинка и подлокотники будут, вероятно, в ближайшее время доставлены. Что бы я вам ни дал, могу ли я все еще называть это креслом?"[3]

Дэвид Гросс, нобелевский лауреат за его труды по стандартной модели, стал с тех пор одним из самых агрессивных и грозных защитников теории струн. Даже он, закрывая недавнюю конференцию, намеревался отпраздновать прогресс теории словами: "Мы не знаем, о чем мы говорим ... . Состояние физики сегодня подобно тому, что было, когда мы были озадачены радиоактивностью ... . Они потеряли что-то абсолютно фундаментальное. Мы потеряли, возможно, что-то столь же основательное, как и они в те времена."[4]

Но, хотя теория струн столь неполна, что даже само ее существование является недоказанной гипотезой, это не останавливает многих, кто работает над ней, от уверенности, что она представляет собой единственный путь вперед для теоретической физики. Одного известного струнного теоретика, Джозефа Полчински из Института теоретической физики Кавли в Калифорнийском университете, Санта Барбара, не так давно просили рассказать об «альтернативах струнной теории». Его первой реакцией были слова: "оказалось, что все это глупости, не имеется альтернатив ... . Все хорошие идеи являются частью теории струн."[5] Любош Мотль, доцент в Гарварде, недавно заявил на своем блоге, что "наиболее вероятная причина, почему ни один ... человек не убедил других в альтернативах к теории струн, заключается в том, что, вероятно, не существует альтернатив теории струн."[6]

Что тут происходит? Обычно в науке под термином *теория* имеется в виду нечто вполне определенное. Лайза Рэндалл, влиятельный теоретик в области частиц и коллега Мотля по Гарварду, определяет теорию

как «определенную физическую систему взглядов, которая воплощается в наборе фундаментальных предположений о мире, – и экономную систему взглядов, которая включает в себя широкое разнообразие явлений. Теория дает особый набор уравнений и предсказаний – тех, которые подтверждаются успешным согласием с экспериментальными результатами».[7]

Теория струн не подходит под это определение – по меньшей мере, пока не подходит. Как тогда некоторые эксперты могут быть уверены, что альтернатив теории струн нет, если они точно не знают, что она собой представляет? Что такое в точности то, чему, как они уверены, нет альтернативы? Таковы некоторые вопросы, которые заставили меня написать эту книгу.

Теоретическая физика трудна. Очень трудна. Не потому, что она содержит определенное количество математики, а потому, что она содержит большие риски. Как мы увидим снова и снова, когда будем исследовать историю современной физики, наука такого рода не может делаться без риска. Если большое количество людей много лет работает над вопросом, а ответ остается неизвестным, это может означать, что ответ не легок или не очевиден. Или это может быть вопрос, на который нет ответа.

Теория струн в тех пределах, в которых она понята, постулирует, что мир фундаментально отличается от мира, который мы знаем. Если теория струн верна, мир имеет больше измерений и намного больше частиц и сил, чем мы до сих пор наблюдали. Многие струнные теоретики говорят и пишут так, как если бы существование этих дополнительных измерений и частиц было установленным фактом, в чем не может не сомневаться хороший ученый. Неоднократно струнные теоретики говорили мне нечто вроде «Но ты имеешь в виду, что ты полагаешь возможным, что нет никаких дополнительных измерений?» Фактически, ни теория, ни эксперимент не предлагают совсем никаких доказательств существования дополнительных измерений. Одна из целей этой книги заключается в демистификации утверждений теории струн. Идеи прекрасны и хорошо мотивированы. Но чтобы понять, почему они не привели к б*о*льшему прогрессу, мы должны точно выяснить, что поддержано доказательствами, а что все еще нет.

Поскольку теория струн является таким высокорисковым предприятием, – не поддержанным экспериментом, хотя очень щедро поддержанным академическими и научными сообществами, – имеются только два пути окончания этой истории. Если теория струн окажется верной, струнные теоретики окажутся величайшими героями в истории науки. На основе горсти рассуждений, – ни одно из которых не имеет недвусмысленного прочтения, – они смогли открыть, что реальность намного более безбрежна, чем это раньше воображалось. Колумб открыл новый континент, не известный королю и королеве Испании (равно как испанские монархи были неизвестны жителям Нового Света). Галилей открыл новые звезды и луны, а затем астрономы открыли новые планеты. Все это побледнеет перед открытием новых измерений. Более того, многие струнные теоретики верят, что мириады миров, описываемых гигантским числом струнных теорий, реально существуют – как другие вселенные, которые нам невозможно увидеть непосредственно. Если они правы, мы видим намного меньшую часть реальности, чем часть земли, которую когда-либо видела любая группа обитателей пещеры. Никто в человеческой истории не мог когда-либо точно догадаться о таком огромном расширении известного мира.

С другой стороны, если струнные теоретики ошибаются, они не могут просто немножко ошибаться. Если новые размерности и симметрии не существуют, мы должны будем считать струнных теоретиков среди величайших неудачников науки, вроде тех, кто продолжал работать над эпициклами Птолемея, когда выдвинулись вперед Кеплер и Галилей. Их пример будет предостерегающим рассказом о том, как не надо делать науку, как не надо упускать теоретические гипотезы далеко за пределы того, что рационально можно утверждать как начало привлекательной фантазии.

Один результат взлета теории струн заключается в том, что сообщество людей, которые работают в фундаментальной физике, оказалось расколотым. Многие ученые продолжают работать над теорией струн, и за работу в этой области ежегодно присуждается, возможно, порядка пятидесяти новых степеней докторов философии*. Но имеются некоторые физики, которые настроены глубоко скептически, – кто или никогда не видел смысла, или кто к настоящему моменту отказался от ожидания знака, что теория имеет последовательную формулировку или делает реальные экспериментальные предсказания. Стороны раскола

не всегда дружелюбны. С каждой стороны выражаются сомнения в профессиональной компетентности и этических стандартах другой стороны, и поддерживать дружеские отношения через имеющееся разделение – это настоящая работа.

---

* Доктор философии (Philosophiae Doctor, PhD) – высшая ученая степень в США и Канаде, присуждаемая после защиты соответствующей диссертационной работы почти во всех научных областях, например: доктор философии по физике. Соответствует степени кандидата наук в странах бывшего СССР. В ряде стран (Великобритания, Германия) существуют более высокие степени, эквивалентные советскому доктору наук. – *(прим. перев.)*

В соответствии с картиной науки, которую мы изучали в школе, ситуации, подобные этой, не предполагают развития. Вся суть современной науки, как мы учились, в том, что она есть метод, который приводит к прогрессу в нашем понимании природы. Несогласие и противостояние, конечно, необходимы науке, чтобы прогрессировать, но при этом всегда предполагается, что имеется путь разрешения споров посредством эксперимента или математики. В случае теории струн, однако, кажется, что этот механизм отказал. Многие сторонники и критики теории струн настолько утвердились в своих взглядах, что тяжело получить радушное обсуждение проблемы даже среди друзей. «Как ты можешь не видеть красоту теории? Как теория могла бы делать все это и не быть верной?» – говорят струнные теоретики. Это провоцирует не менее горячий ответ от скептиков: «Вы потеряли свой ум? Как вы можете верить так сильно *в какую бы то ни было* теорию при полном отсутствии экспериментальной проверки? Вы забыли, как наука допускает к результату? Как вы можете быть уверены, что вы правы, когда вы даже не знаете, что из себя представляет теория?»

Я писал эту книгу в надежде, что она внесет вклад в честную и полезную дискуссию как среди экспертов, так и среди читателей-непрофессионалов. Несмотря на то, что я видел в последние несколько лет, я верю в науку. Я верю в способность научного сообщества подняться над раздражительностью и разрешить противоречия через рациональные аргументы, основывающиеся на стоящих перед нами доказательствах. Я сознаю, что даже только поднимая эти проблемы, я вызову гнев некоторых моих друзей и коллег, которые работают в теории струн. Я могу только настаивать, что я пишу эту книгу не для атаки на теорию струн или тех, кто в нее верит, но и без восхищения перед ней, и, главным образом, как выражение веры в физическое научное сообщество.

Так что это книга не про «нас» против «них». В течение моей карьеры я работал как над струнной теорией, так и над другими подходами к квантовой гравитации (то есть, к согласованию ОТО Эйнштейна с квантовой теорией). Даже если большая часть моих усилий прошла в этих других подходах, были периоды, когда я жадно верил в теорию струн и посвящал себя решению ее ключевых проблем. Хотя я не решил их, я написал восемнадцать статей по этой теме; таким образом, ошибки, которые я буду обсуждать, являются моими ошибками в той же мере, как и любого другого. Я буду говорить о гипотезах, в правильности которых была широкая уверенность, несмотря на то, что ни одна не была подтверждена. Но я находился среди верующих, и я выбирал направление своих исследований, основываясь на этой вере. Я буду говорить о давлении, которое чувствуют юные ученые и которое принуждает их для получения достойной карьеры заняться темами, санкционированными генеральным направлением. Я чувствовал это давление на себе, и было время, когда я позволил своей карьере управляться им. Конфликт между необходимостью независимо выражать научное мнение и делать это способом, который не отчуждает тебя от главного потока, был еще одним, что я также испытал. Я написал эту книгу не для того, чтобы критиковать ученых, кто сделал отличные от моего выборы, а для изучения вопроса, почему ученые вообще должны конфликтовать из-за таких выборов.

Фактически, это мне давно подсказывало решиться и написать эту книгу. Я сам не люблю конфликты и конфронтации. В конце концов, в том виде науки, которым мы занимаемся, все, заслуживающее внимания, делается с риском, и все, что реально имеет значение, это что студенты наших студентов будут достойно думать об обучении их собственных студентов на пятьдесят лет дальше по дороге. Я сохраняю надежды, что кто-то в центре исследований теории струн напишет объективную и детальную критическую работу о

том, чего в точности теория достигла, а чего не достигла. Этого не происходит.

Одна из причин донести эти проблемы до публики возвращается к дебатам, которые имели место несколько лет назад между учеными и «социальными конструктивистами», группой профессоров гуманитарных и социальных наук, о том, как работает наука. Социальные конструктивисты объявили, что научное сообщество не более рационально или объективно, чем любое другое человеческое сообщество. Это не то, как большинство ученых видят науку. Мы говорим нашим студентам, что уверенность в научной теории должна всегда базироваться на объективном развитии доказательств. Наши оппоненты по спору утверждали, что наши заявления о том, как работает наука, большей частью были пропагандой, сконструированной, чтобы устрашить людей, чтобы передать нам власть, и что вся научная отрасль двигается теми же политическими и социологическими силами, которые руководят людьми в других областях.

Один из главных аргументов, который мы, ученые, использовали в этих дебатах, заключался в том, что наше сообщество отличается, поскольку мы управляемся в соответствии с высокими стандартами – стандартами, которые предотвращают нас от выбора любой теории, пока она не подтверждена посредством публикации вычислений и экспериментальных данных за пределами сомнений компетентного профессионала. Как я буду касаться в некоторых деталях, это не всегда так в теории струн. Несмотря на отсутствие экспериментальной поддержки и точной формулировки, некоторые последователи теории уверены в ней с определенностью, что кажется, скорее, эмоциональным, чем рациональным.

Агрессивное продвижение теории струн привело к ее становлению как главного пути для анализа больших вопросов физики. Почти каждый теоретик в области частиц с постоянным местом работы в престижном Институте перспективных исследований, включая директора, является струнным теоретиком, исключение составляет персона, приглашенная на работу десять лет назад. То же самое верно для Института теоретической физики Кавли. Восемь из девяти премий Общества Макартура для физиков в области частиц с начала программы в 1981 году достались струнным теоретикам. И в ведущих физических организациях страны (Беркли, Калтех, Гарвард, Массачусетский технологический, Принстон и Стэнфорд) двадцать один из двадцати двух профессоров по физике частиц, работающих на срочном договоре, кто получил степень доктора философии после 1981, сделали себе имя в теории струн или в связанных подходах.

Теория струн сейчас занимает настолько доминирующее положение в академической науке, что для юного физика-теоретика было бы практически карьерным самоубийством не заниматься этой областью. Даже в областях, где теория струн не делает предсказаний, вроде космологии и феноменологии частиц, для исследователей является общим местом начинать доклад или статью объявлением уверенности, что их труд когда-нибудь в будущем будет выводим из теории струн.

Имеются веские причины принимать теорию струн всерьез как гипотезу о природе, но это не то же самое, что декларировать ее правильность. Я вложил несколько лет в работу по теории струн, поскольку я верил в нее достаточно, чтобы желать приложить свои руки к решению ее ключевых проблем. Я также верил, что я не имею права на мнение, пока я не знаю ее в деталях, как может знать только практикующий ее физик. В то же время, я работал над другими подходами, которые также обещали ответы на фундаментальные вопросы. В результате ко мне относились с некоторым подозрением люди на обеих сторонах дебатов. Некоторые струнные теоретики рассматривали меня как «антиструнного». Это не могло бы быть менее правильным. Я никогда бы не потратил так много времени и усилий на работу по теории струн или не написал бы три книги, в значительной степени мотивированные ее проблемами, если бы я не был очарован ей и не чувствовал, что она может оказаться частью истины. Я не ратую *за* что-нибудь, кроме науки, ни *против* чего-нибудь, кроме того, что рассматривается наукой.

Но здесь на кону больше, чем мирные отношения между коллегами. Чтобы делать нашу работу, нам, физикам, требуются значительные ресурсы, которые обеспечиваются, большей частью, нашими согражданами – через налоги, а также и через деньги фондов. Взамен они просят только возможность видеть через наши плечи, как мы выковываем будущее и углубляем человеческое знание мира, частью которого мы являемся. Те физики, которые общаются с публикой через статьи ли, публичные выступления,

телевидение или Интернет, несут обязанность рассказывать честную историю. Мы должны стараться представить неудачи вместе с успехами. В самом деле, честность по поводу ошибок означает возможность помочь, вместо того, чтобы мешать нашему делу. В конце концов, поддерживающие нас люди живут в реальном мире. Они знают, что прогресс во всех попытках требует, чтобы принимались во внимание реальные риски, что временами мы будем терпеть неудачу.

В последние годы множество книг и журнальных статей для широкой публики описывали ошеломляющие новые идеи, которые вырабатывали физики-теоретики. Некоторые из этих хроник меньше всего заботились об объяснении именно того, насколько далеко новые идеи находятся как от экспериментального тестирования, так и от математического доказательства. Получая выгоду от желания публики знать, как работает вселенная, я чувствую обязанность подтвердить, что рассказываемая в этой книге история строго придерживается фактов. Я надеюсь, что представление различных проблем, которые мы оказались не в состоянии решить, прозрачно объяснит, что поддерживается экспериментом, а что нет, и отличит факты от спекуляций и интеллектуальных фантазий.

Прежде всего, мы, физики, несем ответственность за будущее нашего ремесла. Наука, как я обосную позже, основывается на этике, а этика требует честности от части практиков науки. Это также требует, чтобы каждый ученый был знатоком того, во что он или она верит, так, чтобы каждая неподтвержденная идея встречалась со здоровой дозой скептицизма и критики, пока она не будет доказана. Это, с другой стороны, требует, чтобы в научном сообществе поддерживалась и приветствовалась диверсификация подходов к нерешенным проблемам. Мы проводим исследования, поскольку даже самый умный среди нас не знает ответа. Часто ответ лежит в ином направлении, чем то, которому следовали в рамках генеральной линии. В этих случаях, и даже когда генеральное направление считается правильным, прогресс науки зависит от здоровой поддержки ученых, которые придерживались отличающихся взглядов.

Наука требует деликатного баланса между конформизмом и разнообразием. Поскольку так легко ошибиться, поскольку ответы не известны, эксперты, не важно, насколько умные или натренированные, не сойдутся во мнениях по поводу того, какой подход более вероятно даст плоды. Следовательно, если наука хочет двигаться вперед, научное сообщество должно поддерживать различные подходы к каждой отдельной проблеме.

Имеются обширные доказательства, что этим базовым принципам в случае фундаментальной физики больше не следуют. Хотя некоторые могут быть не согласны с высказыванием других взглядов, это все меньше и меньше практикуется. Некоторые молодые струнные теоретики говорили мне, что они чувствуют принуждения к работе над струнной теорией, верят они в нее или нет, поскольку это воспринимается как билет к профессорству в университете. И они правы: в Соединенных Штатах теоретик, который занимается подходами к фундаменальной физике, иными, чем теория струн, почти не имеет карьерных возможностей. За последние пятнадцать лет было всего три доцента, назначенных в американские исследовательские университеты, кто работал над подходами к квантовой гравитации, отличающимися от теории струн, и все эти назначения были в единственную исследовательскую группу. Раз уж теория струн борется на стороне науки, она одержала триумфальную победу в академии.

Это причиняет вред науке, поскольку заставляет отказаться от исследований альтернативных направлений, некоторые из которых очень многообещающие. Несмотря на неадекватное финансирование этих подходов, некоторые оказались впереди теории струн в отношении предложения определенных предсказаний для экспериментов, которые сейчас проводятся.

Как это возможно, что теория струн, которой занимались более тысячи блестящих и хорошо образованных ученых, работая в лучших условиях, находится в опасности неудачи? Это удивляло меня долгое время, но сейчас я думаю, что я знаю ответ. Что, я уверен, потерпело неудачу, это не только отдельная теория, но и стиль ведения науки, который хорошо подходил к проблемам, стоявшим перед нами в середине двадцатого века, но перестал быть пригодным для тех видов фундаментальных проблем, которые стоят перед нами сейчас. Стандартная модель физики частиц была триумфом особого способа ведения науки, который начал доминировать в физике с 1940х. Этот стиль прагматичен и реалистичен, он поощряет виртуозность в

расчетах при обдумывании тяжелых концептуальных проблем. Это крайне отличается от способа, которым делали науку Альберт Эйнштейн, Нильс Бор, Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер и другие революционеры начала двадцатого века. Их работа возникала из глубокого размышления о наиболее основных вопросах окружающего пространства, времени и материи, и они видели, что они являлись частью широкой философской традиции, в которой они были дома.

В подходе к физике частиц, разработанном и преподанном Ричардом Фейнманом, Фрименом Дайсоном и другими, раздумья над фундаментальными проблемами не имели места в исследовании. Это освободило их от споров по поводу смысла квантовой физики, которые мучили их предшественников, и привело к тридцати годам впечатляющего прогресса. Это было так, как это и должно быть: для решения разных видов проблем были нужны различные стили исследований. Разработка приложений установленных концептуальных систем требует совсем других видов размышлений – и мыслителей, – чем открытие этих самых концептуальных систем впервые.

Однако, как я буду обосновывать в деталях на следующих страницах, урок последних тридцати лет в том, что проблемы, вставшие сегодня, не могут быть решены этим прагматическим способом ведения науки. Чтобы продолжить прогресс науки, мы опять должны бороться с глубокими вопросами о пространстве и времени, квантовой теории и космологии. Нам снова нужны типы людей, которые могут открыть новые решения давно стоящих основополагающих проблем. Как мы увидим, направления, в которых делается прогресс, – которые приводят теорию назад к контакту с экспериментом, – ведутся людьми, которые имеют свободное время, чтоб придумывать новые идеи, а не следовать популярным трендам, и делать науку, большей частью, в размышляющем и основательном стиле пионеров начала двадцатого века.

Я хочу подчеркнуть, что моя тема не связана со струнными теоретиками как индивидуальностями, некоторые из них являются самыми талантливыми и достигшими совершенства физиками, которых я знаю. Я буду первым отстаивать их право на продолжение исследований так, как они полагают самым многообещающим. Но я предельно озабочен тенденцией, в которой всесторонне поддерживается только одно направление исследований, тогда как другие многообещающие подходы мрут от голода.

Это тенденция с трагическим последствиями, если, как я буду обосновывать, истина лежит в направлении, которое требует радикального переосмысления наших базовых идей о пространстве, времени и квантовом мире.

Часть I
Незавершенная революция

1. Пять великих проблем теоретической физики

С самых ранних времен становления физики как науки находились люди, которые представляли себя последним поколением, сталкивающимся с неизвестным. Физика всегда казалась ее деятелям почти завершенной. Это самодовольство разбивается только во время революций, когда честные люди вынуждены признать, что они не знают основ. Но даже революционеры все еще представляют, что главная идея – та, что все объединит и приведет поиск знания к завершению, – лежит прямо за углом.

Мы живем в один из таких революционных периодов уже столетие. Последним таким периодом была революция Коперника, возникшая в начале шестнадцатого века, во время которой аристотелевы теории пространства, времени, движения и космологии были низвергнуты. Кульминацией указанной революции было предложение Исааком Ньютоном новой теории физики, опубликованное в 1687 в его *Математических Принципах Натуральной Философии*. Сегодняшняя революция в физике началась в 1900 с открытием Максом Планком формулы, описывающей распределение энергии в спектре теплового излучения, которая продемонстрировала, что энергия не непрерывна, но дискретна. Эта революция еще завершается. Проблемы, которые физики должны решать сегодня, являются, по большому счету, вопросами, которые остаются без ответа вследствие незавершенности научной революции двадцатого века.

Ядро нашей неспособности завершить текущую научную революцию состоит из пяти проблем, каждая из которых в высшей степени неподатлива. Эти проблемы противостояли нам, когда я начинал мои занятия физикой в 1970е, и, хотя мы много узнали о них за последние три десятилетия, они остались нерешенными. Так или иначе, любая предлагаемая теория фундаментальной физики должна решить эти пять проблем, так что стоит бросить краткий взгляд на каждую.

Альберт Эйнштейн был, определенно, самым значительным физиком двадцатого столетия. Его величайшей работой, возможно, было его открытие общей теории относительности (ОТО), которая является лучшей из имеющихся у нас на сегодняшний день теорий пространства, времени, движения и гравитации. Его глубочайшим прозрением было то, что гравитация и движение тесно связаны друг с другом и с геометрией пространства и времени. Эта идея завершила сотни лет раздумий о природе пространства и времени, которые до нее рассматривались как фиксированные и абсолютные. Будучи вечными и неизменными, они обеспечивали фон, который мы использовали для определения таких понятий как положение и энергия.

В ОТО Эйнштейна пространство и время больше не обеспечивают фиксированного абсолютного фона. Пространство столь же динамично, как и материя, оно двигается и деформируется. В итоге пустая вселенная может расширяться или сокращаться, а время может даже начаться (в Большом Взрыве) и закончиться (в черной дыре).

Эйнштейн довел до конца и кое-что другое. Он был первым человеком, который понял необходимость новой теории материи и излучения. На самом деле необходимость перелома подразумевалась в формуле Планка, но Планк не понял этого достаточно глубоко, он полагал, что формулу можно было бы примирить с ньютоновской физикой. Эйнштейн думал иначе, и первое определенное обоснование такой теории он дал в 1905. Потребовалось еще двадцать лет, чтобы изобрести эту теорию, известную как квантовая теория.

Каждое из этих двух открытий, относительность и кванты, требует от нас определенного разрыва с ньютоновской физикой. Однако, несмотря на великий прогресс на протяжении века, они остались незавершенными. Каждое имеет дефекты, которые указывают на существование более глубокой теории. Но главная причина незавершенности каждого заключается в существовании другого.

Разум вызывает третью теорию для унификации всей физики, и по простой причине. Природа в очевидном смысле «едина». Вселенная, в которой мы сами находимся, находится во взаимосвязи, что означает, что все взаимодействует со всем прочим. Нет оснований, по которым мы могли бы иметь две теории природы, покрывающие различные явления, как если бы одна никогда не действовала вместе с другой. Все требует, чтобы конечная теория была полной теорией природы. Она должна включать в себя все, что мы знаем. Физика долгое время существовала без такой единой теории. Причина в том, что, говоря о подходящем эксперименте, мы были в состоянии разделить мир на две области. В атомной области, где правит квантовая физика, мы обычно можем игнорировать гравитацию. Мы можем трактовать пространство и время почти как это делал Ньютон – как неизменный фон. Другая область является областью гравитации и космологии. В этом мире мы часто можем игнорировать квантовые явления.

Но это не может быть ничем другим, как временным, предварительным решением. Выйти за его пределы и является первой нерешенной проблемой в теоретической физике:

ПРОБЛЕМА 1: Объединить ОТО и квантовую теорию в одну теорию, которая может претендовать на роль полной теории природы.

Это называется *проблемой квантовой гравитации*.

За пределами аргументов, основывающихся на единстве природы, имеются проблемы, специфические для каждой теории, которая требует объединения с другой. Каждая теория имеет проблему бесконечностей. В природе мы еще не столкнулись с чем-то измеримым, что имеет бесконечную величину. Но как в квантовой теории, так и в общей теории относительности мы сталкиваемся с предсказаниями физически осмысленных величин, становящихся бесконечными. Это похоже на то, что природа таким путем наказывает нахальных теоретиков, которые осмелились разрушить ее единство.

ОТО имеет проблему с бесконечностями, поскольку внутри черной дыры плотность материи и напряженность гравитационного поля быстро становятся бесконечными. Это же проявляется и в очень ранней истории вселенной – по меньшей мере, если мы доверяем общей теории относительности для описания ее младенчества. В точке, в которой плотность становится бесконечной, уравнения ОТО распадаются. Некоторые люди интерпретируют такое поведение как остановку времени, но более умеренный взгляд заключается в том, что теория просто неадекватна. В течение долгого времени умудренные люди рассуждали о том, что эта неадекватность происходит от пренебрежения эффектами квантовой физики.

Квантовая теория, в свою очередь, имеет свои собственные неприятности с бесконечностями. Они возникают всякий раз, когда вы пытаетесь использовать квантовую механику для описания полей, вроде электромагнитного поля. Проблема в том, что электрическое и магнитное поля имеют величину в каждой точке пространства.

Это означает, что имеется бесконечное число переменных (даже в конечном объеме, где имеется бесконечное число точек, а отсюда бесконечное число переменных). В квантовой теории имеются неконтролируемые флуктуации в величинах каждой квантовой переменной. Бесконечное число неконтролируемо флуктуирующих переменных могут привести к уравнениям, которые «отбиваются от рук» и предсказывают бесконечные числа, когда вы задаете вопросы о вероятности наступления некоторого события или о величине некоторой силы.

Так что это является другим случаем, когда мы не можем помочь, но чувствуем, что существенная часть физики осталась за бортом. Долгое время была надежда, что, когда гравитация будет принята во внимание, флуктуации будут укрощены и все станет конечным. Если бесконечности являются знаком нарушения унификации, единая теория не будет их иметь. Это будет тем, что мы называем *конечной теорией*, теорией, которая отвечает на любой вопрос в терминах осмысленных, конечных чисел.

Квантовая механика была экстремально успешной в объяснении широчайшего круга явлений. Эта область простирается от излучения до свойств транзисторов и от физики элементарных частиц до действия ферментов и других больших молекул, которые являются строительными кирпичиками жизни. Ее предсказания подтверждались снова и снова в течение последнего столетия. Но некоторые физики всегда имели тревожные опасения по ее поводу, поскольку реальность, которую она описывает, столь эксцентрична. Квантовая теория содержит внутри себя некоторые очевидные концептуальные парадоксы, которые даже после восьмидесяти лет остаются неразрешенными. Электрон проявляется как волна и как частица. Так же ведет себя свет. Более того, теория дает только статистические предсказания субатомного поведения. Наша способность сделать что-нибудь лучше этого ограничивается *принципом неопределенности*, который говорит нам, что мы не можем в одно и то же время измерить положение и импульс частицы. Теория производит только вероятности. Частица – например, электрон в атоме – может быть где угодно, пока мы ее не измерим; наше наблюдение в некотором смысле определяет ее состояние. Все это указывает на то, что квантовая теория не рассказывает полную историю. В итоге, несмотря на ее успех, имеются многие эксперты, которые убеждены, что квантовая теория скрывает нечто существенное о природе, о чем нам нужно узнать.

Одна из проблем, которая с самого начала мучает теорию, заключается в вопросе о соотношении между реальностью и формализмом. Физики традиционно ожидают, что наука должна давать оценку реальности такой, какой она была бы в наше отсутствие. Физика должна быть больше, чем набор формул, которые предсказывают, что мы будем наблюдать в эксперименте; она должна давать картину того, какова реальность *на самом деле*. Мы являемся случайными потомками древних приматов, которые появились в истории мира лишь совсем недавно. Не может быть, что реальность зависит от нашего существования. Проблема отсутствия наблюдателей не может быть решена и путем обращения к возможности существования чужих цивилизаций, так как было время, когда мир существовал, но был слишком горячим и плотным, чтобы существовал организованный разум.

Философы называют такую точку зрения *реализмом*. Она может быть обобщена через высказывание, что «реальный мир не здесь» (RWOT – real world out there, сокращение, которое использовал для его обозначения мой первый учитель философии) должен существовать независимо от нас. Отсюда следует, что термины, в которых наука описывает реальность, не могут включать любым существенным образом тот факт, что мы выбираем, измерять нам или не измерять.

Квантовая механика, по меньшей мере, в той форме, в которой она была впервые предложена, не подгоняется легко под реализм. Это происходит из-за того, что теория предполагает разделение природы на две части. С одной стороны разделения имеется наблюдаемая система. Мы, наблюдатели, находимся с другой стороны. С нами имеются инструменты, которые мы используем при проведении экспериментов и осуществлении измерений, и часы, которые мы используем, чтобы записать, когда произошли те или иные вещи. Квантовая теория может описываться, если использовать новый вид языка, в диалоге между нами и системой, которую мы исследуем нашими инструментами. Этот квантовый язык содержит глаголы, которые обозначают наши приготовления и измерения, и существительные, которые обозначают, что затем наблюдается. Он ничего не говорит нам о том, как будет выглядеть мир в наше отсутствие.

С момента первого предложения квантовой теории бушуют дебаты между теми, кто принимает такой путь подхода к науке, и теми, кто отвергает его. Многие основатели квантовой механики, включая Эйнштейна, Эрвина Шредингера и Луи де Бройля, находили такой подход к физике отвратительным. Они были реалистами. Для них квантовая теория, независимо от того, насколько хорошо она работает, была неполной теорией, поскольку она не обеспечивала картину реальности в отсутствие нашего взаимодействия с ней. На другой стороне были Нильс Бор, Вернер Гейзенберг и многие другие. Вместо того, чтобы ужасаться, они принимали такой новый путь подхода к науке.

С тех пор реалисты добились некоторых успехов в обозначении непоследовательности существующей формулировки квантовой теории. Некоторые из этих очевидных непоследовательностей возникают вследствие того, что квантовая теория, если она универсальна, должна также описывать *нас самих*. При этом возникают проблемы из-за разделения мира, которое требуется, чтобы придать смысл квантовой теории. Одна трудность заключается в том, где вы должны провести разделительную линию, которая зависит от того, кто проводит наблюдение. Когда вы измеряете атом, вы и ваши инструменты находятся по одну сторону, а атом по другую сторону. Но допустим, что я наблюдаю за вашей работой через видеокамеру. Я настроился на вашу лабораторию. Я могу рассматривать всю вашу лабораторию – включая вас и ваши инструменты, точно так же, как и атомы, с которыми вы манипулируете, – как составные части одной системы, которую я наблюдаю. С другой стороны буду только я.

Следовательно, вы и я описываем две разные «системы». Ваша включает только атом. Моя включает вас, атом и все то, что вы используете для его исследования. То, что вы рассматриваете как измерение, я рассматриваю как две физические системы, взаимодействующие друг с другом. Таким образом, даже если вы согласны, что хорошо иметь воздействие наблюдателя как часть теории, теория как таковая не достаточна. Квантовая механика должна быть расширена, чтобы учесть многие другие описания, зависящие от того, кто наблюдатель.

Вся эта проблема известна под названием *проблемы обоснований квантовой механики*. Она является второй великой проблемой современной физики.

ПРОБЛЕМА 2: Решение проблемы обоснований квантовой механики или путем придания смысла теории в ее существующем виде, или путем изобретения новой теории, которая имеет смысл.

Имеется несколько различных путей, как это можно сделать.

1. Обеспечить осмысленный язык для теории, который разрешает все головоломки вроде той, что только что была упомянута, и включает в себя разделение мира на систему и наблюдателя как существенную особенность теории.

2. Найти новую интерпретацию теории – новый способ прочтения уравнений, – которая реалистична, так что измерение и наблюдение не будут играть роли в описании фундаментальной реальности.

3. Изобрести новую теорию, такую, которая бы дала более глубокое понимание природы, чем это делает квантовая механика.

Все три пути в настоящее время исследуются небольшим числом умных людей. К сожалению, не многие физики работают над данной проблемой. Временами это принимается за указание, что проблема или решена, или не важна. Ни то ни другое не верно. Это, вероятно, самая серьезная проблема, стоящая перед современной наукой. Просто она столь трудна, что прогресс очень мал. Я глубоко восхищаюсь физиками, которые работают над ней, как из-за чистоты их усилий, так и из-за их мужества игнорировать моду и атаковать тяжелейшую и самую фундаментальную из проблем.

Но, несмотря на их лучшие попытки, проблема остается нерешенной. Это указывает для меня на то, что дело не только в нахождении нового способа размышлений о квантовой теории. Те, кто изначально формулировал теорию, не были реалистами. Они не верили, что человек способен сформировать правильную картину мира, как он существует независимо от наших действий и наблюдений. Вместо этого они отстаивали совершенно иной взгляд на науку: с их точки зрения наука может быть ничем иным, как расширением обычного языка, который мы используем для описания наших действий и наблюдений, до другого языка.

В более давние времена такой взгляд казался оправданным – продукт времени, когда мы надеялись, что мы продвинулись вперед во многих отношениях. Те, кто продолжает защищать квантовую механику в том виде, как она была сформулирована, и предлагает ее как теорию мира, действуют так обычно под знаменем реализма. Они ратуют за переинтерпретацию теории в русле реализма. Однако, хотя они и сделали некоторые интересные предложения, никого полностью не убедили.

Возможно, что это связано с тем, что реализм как философия просто вымер, но это кажется невероятным. В конце концов, реализм обеспечивает мотивацию, двигающую большинство ученых. Для большинства из нас, верящих в «реальный мир не здесь» (RWOT) и в возможность правильного знания, он обеспечивает мотивацию для тяжелой работы, необходимой, чтобы стать ученым и внести свой вклад в понимание природы. Если признать неудачу реалистов в придании смысла квантовой теории в ее исходной формулировке, становится все более и более вероятным только путь три: открытие новой теории, которая будет более подвержена реалистической интерпретации.

Я должен признать, что я реалист. Я на стороне Эйнштейна и других, кто верил, что квантовая механика является неполным описанием реальности. Тогда где мы должны искать, что неверно в квантовой механике? Мне всегда казалось, что решение будет требовать более чем глубочайшего понимания самой квантовой физики. Я верю, что если проблема не была решена после всех прошедших времен, это происходит из-за некоторых ошибок, из-за некоторых связей с другими проблемами физики. Невероятно, чтобы проблема квантовой механики была решена изолированно, напротив, решение, вероятно, будет появляться по мере достижения нами прогресса в величайшей задаче унификации физики.

Но, если это верно, это работает в обе стороны: мы не сможем решить другие большие проблемы без нахождения также осмысленной замены для квантовой механики.

Идея, что физика должна быть унифицирована, вероятно, вызвала больше работ в физике, чем любая другая проблема. Но имеются различные пути, по которым физика может быть унифицирована, и мы должны постараться различить их. До сих пор мы обсуждали *унификацию через отдельный закон*. Непросто увидеть, как кто-то может не согласиться, что это необходимая цель.

Но имеются другие пути унификации мира. Эйнштейн, который определенно думал об этом более любого другого, подчеркивал, что мы должны различать два вида теорий. Это *теории принципов* и *конструктивные теории*. Теория принципов устанавливает систему взглядов, которая делает возможным описание природы. По определению, теория принципов должна быть универсальной: она должна быть применима ко всему, поскольку она устанавливает основной язык, который мы используем, чтобы говорить о природе. Не может быть двух различных теорий принципов, применимых к различным областям природы. Поскольку мир един, все, в конечном счете, взаимодействует со всем другим, и может быть только один язык, используемый для описания этих взаимодействий. Квантовая теория и общая теория относительности обе являются теориями принципов. Раз так, логика требует их объединения.

Другой вид теорий, конструктивные теории, описывают некоторые отдельные явления в терминах специфических моделей или уравнений.[8] Теория электромагнитного поля и теория электрона есть конструктивные теории. Такие теории не могут устанавливаться в одиночестве; они должны быть встроены в контекст теории принципов. Но до тех пор, пока теория принципов не появилась, могут существовать явления, подчиняющиеся различным законам. Например, электромагнитное поле подчиняется законам, отличным от законов, управляющих теоретически допустимой космологической темной материей (ее количество, как полагают, значительно превышает количество ординарной атомной материи в нашей вселенной). Одна из вещей, которую мы знаем о темной материи независимо от того, что она из себя представляет, это то, что она темная. Это означает, что она не испускает света, так что она, вероятно, не взаимодействует с электромагнитным полем. Поэтому две различные теории могут сосуществовать бок о бок.

Дело в том, что законы электромагнетизма не диктуют, что еще может существовать в мире. Там могут быть кварки или нет, нейтрино или нет, темная материя или нет. Аналогично, законы, которые описывают два взаимодействия – сильное и слабое, – которые действуют внутри атомных ядер, не обязательно требуют, чтобы там были и электромагнитные силы. Мы можем легко представить мир, в котором есть электромагнетизм, но нет сильного ядерного взаимодействия, или наоборот.

Но все еще возможно спросить, не могут ли силы, которые мы наблюдаем в природе, быть проявлениями единственной, фундаментальной силы. Тут кажется, насколько я могу судить, нет логических аргументов, что это *должно* быть верно, но это все еще является чем-то, что *может* быть верным.

Страстное желание объединить различные силы привело к нескольким существенным продвижениям в истории физики. Джеймс Клерк Максвелл в 1867 объединил электричество и магнетизм в одну теорию, а столетием позже физики обнаружили, что электромагнитное поле и поле, которое распространяет слабые ядерные силы (силы, отвечающие за радиоактивный распад), могут быть объединены. Такой теорией стала *электрослабая теория*, предсказания которой раз за разом подтверждались в экспериментах на протяжении последних тридцати лет.

Имеются две фундаментальных силы природы (из тех, что мы знаем), которые остаются за пределами объединения электромагнитных и слабых сил. Это гравитация и сильное ядерное взаимодействие, отвечающее за связь между собой частиц, именуемых кварками, чтобы сформировать протоны и нейтроны, составляющие атомные ядра. Можно ли объединить все четыре фундаментальные силы?

Это наша третья великая проблема.

ПРОБЛЕМА 3: Определить, могут или нет различные частицы и силы быть объединены в теорию,

которая объясняет их все как проявление единственной, фундаментальной сущности.

Назовем эту проблему *проблемой объединения частиц и сил*, чтобы отличить ее от унификации законов, которую мы обсудили ранее.

Во-первых, эта проблема легко появилась. Первое предположение, как объединить гравитацию с электричеством и магнетизмом, было сделано в 1914, и с тех пор было предложено намного больше. Все они работают, пока вы забываете одну вещь, что природа является квантовомеханической. Если вы исключаете квантовую физику из картины, унифицирующие теории легко придумываются. Но если вы включаете квантовую теорию, проблема становится намного, намного более тяжелой. Поскольку гравитация является одной из четырех фундаментальных сил природы, мы должны решить проблему квантовой гравитации (то есть, проблему номер 1: как примирить ОТО и квантовую теорию) вместе и параллельно с проблемой унификации.

За последнее столетие наше физическое описание мира значительно упростилось. Раз уж речь идет о частицах, они проявляются только в двух видах: кварки и лептоны. Кварки являются составляющими протонов и нейтронов и многих частиц, которые мы аналогично им открыли. Класс лептонов охватывает все частицы, не состоящие из кварков, включая электроны и нейтрино. Обобщая, известный мир объясняется шестью видами кварков и шестью видами лептонов, которые взаимодействуют друг с другом посредством четырех сил (или, как их еще называют, взаимодействий): гравитации, электромагнетизма, и слабых и сильных ядерных взаимодействий.

Двенадцать частиц и четыре взаимодействия это все, что нам нужно, чтобы объяснить все что угодно в известном мире. Мы также очень хорошо понимаем основную физику этих частиц и сил. Это понимание выражено в терминах теории, которая применима для всех этих частиц и всех сил, исключая гравитацию. Она называется *стандартной моделью физики элементарных частиц* – или стандартной моделью, для краткости. Эта теория не имеет отмеченных ранее проблем с бесконечностями. Все, что мы хотим рассчитать в этой теории, мы можем рассчитать, и результаты выражаются в конечных числах. За более чем тридцать лет с момента формулирования стандартной модели многие предсказания этой теории были экспериментально проверены. В каждом и любом случае теория подтверждалась.

Стандартная модель была сформулирована в начале 1970х. За исключением открытия, что нейтрино имеют массу, она не требовала до сих пор корректировки. Так почему физики не стало после 1975? Что осталось сделать?

При всей ее полезности стандартная модель имеет большую проблему. Она имеет длинный список подгоночных констант. Когда мы устанавливаем законы теории, мы должны определить величины этих констант. Насколько мы знаем, могут быть использованы любые величины, поскольку теория математически состоятельна вне зависимости от того, какие величины мы в нее вставляем. Эти константы определяют свойства частиц. Некоторые говорят нам о массах кварков и лептонов, другие говорят нам о величине сил. У нас нет идей, почему эти числа имеют ту величину, какую имеют, мы просто определяем их через эксперименты, а затем подставляем числа в теорию. Если вы подумаете о стандартной модели как о калькуляторе, то константы будут вводимыми числами, такими, что может быть набор любых позиций, которые вам нравятся, каждый раз, когда программа запускается на выполнение.

Имеется около двадцати таких констант, и тот факт, что имеется так много свободно определяемых констант, которые должны быть подставлены в фундаментальную теорию, является жутким затруднением. Каждая константа представляет некоторый основополагающий факт, который мы игнорируем: а именно, физический механизм или основания, отвечающие за выбор константы в ее наблюдаемой величине.

Это наша четвертая большая проблема.

ПРОБЛЕМА 4: Объяснить, как в природе выбираются величины свободных констант в стандартной модели физики частиц.

Есть глубокая надежда, что правильная единая теория частиц и сил даст однозначный ответ на этот вопрос.

В 1900м Вильям Томсон (лорд Кельвин), влиятельный британский физик, лихо объявил, что физика закончилась, исключая два маленьких облачка на горизонте. Эти «облачка» оказались ключами, которые привели нас к квантовой теории и теории относительности. Сегодня, даже если мы празднуем включение всех известных явлений в стандартную модель плюс ОТО, мы тоже осознаем два облачка. Это темная материя и темная энергия.

Отдельно от проблемы соотношения гравитации с квантами мы думаем, что мы очень хорошо понимаем гравитацию. Предсказания ОТО находятся в согласии с наблюдениями с очень большой степенью точности. Наблюдения по этим вопросам простираются от падающих тел и света на Земле, до детализированного движения планет и их лун, до масштабов галактик и скоплений галактик. Совершенно экзотические явления – вроде гравитационного линзирования, эффекта искривления пространства материей – сегодня настолько хорошо поняты, что используются для измерения распределений масс в скоплениях галактик.

Во многих случаях – когда скорости малы по сравнению со световой и массы не слишком компактны – ньютоновские законы гравитации и движения обеспечивают превосходное приближение к предсказаниям ОТО. Определенно, они должны нам помогать предсказывать, как массы звезд и другой материи в соответствующей галактике влияют на движение отдельной звезды. Но они не предсказывают. Гравитационный закон Ньютона говорит, что ускорение любого объекта при его обращении относительно другого пропорционально массе тела, вокруг которого он обращается. Чем тяжелее звезда, тем быстрее орбитальное движение планеты. Это означает, что если вокруг двух звезд обращаются планеты, и планеты находятся на одинаковых расстояниях от своих звезд, планета, обращающаяся вокруг более массивной звезды, будет двигаться быстрее. Таким образом, если вы знаете скорость тела на орбите вокруг звезды и его дистанцию до звезды, вы можете измерить массу этой звезды. То же самое сохраняется для звезд, обращающихся вокруг центра галактики; путем измерения орбитальной скорости звезд вы можете измерить распределение массы в этой галактике.

На протяжении последних десятилетий астрономы проделали очень простой эксперимент, в котором они измерили распределение масс в галактике двумя различными способами и сравнили результаты. Во-первых, они измерили массу через наблюдение орбитальных скоростей звезд; во-вторых, они провели более прямое измерение масс, оценив все звезды, газ и пыль, которые они могли видеть в галактике. Идея заключалась в сравнении двух измерений. Каждое должно было дать нам полную массу галактики и ее распределение. Полагая, что мы хорошо понимаем гравитацию, и что все известные формы материи испускают свет, два метода должны согласоваться.

Они не согласуются. Астрономы сравнили два метода измерения массы более чем в ста галактиках. Почти во всех случаях два измерения не совпадали, причем не на малую величину, а на фактор порядка 10. Более того, ошибка всегда была в одном направлении: почти всегда больше массы требовалось для объяснения наблюдаемого движения звезд, чем это следовало из прямой оценки всех звезд, газа и пыли.

Имеются только два объяснения этому. Или второй метод неверен из-за того, что в галактике намного больше массы, чем это видно, или ньютоновские законы не могут предсказать точное движение звезд в гравитационном поле их галактики.

Все формы материи, которые мы знаем, испускают свет или непосредственно как звездный свет, или отраженный от планет или межзвездных камней, газа и пыли. Так что, если есть нечто, что мы не видим, оно должно быть некоторой новой формой материи, которая не испускает и не отражает света. А поскольку расхождение столь велико, подавляющая часть материи в галактиках должна быть в этой новой форме.

Сегодня большинство астрономов и физиков уверены, что это и есть правильный ответ на загадку. Имеется потерянная материя, которая на самом деле здесь, но которую мы не видим. Эта мистическая потерянная материя названа *темной материей*. Гипотеза темной материи более предпочтительна, поскольку

единственная другая возможность, – что мы ошибаемся относительно законов Ньютона и их обобщения в ОТО, – слишком устрашающая, чтобы быть рассмотренной.

Вещи стали даже более мистическими. Недавно мы открыли, что когда мы проводим наблюдения на еще больших масштабах, соответствующих миллиардам световых лет, уравнения ОТО не удовлетворяются, даже когда добавлена темная материя. Расширение вселенной, запущенное Большим Взрывом около 13,7 миллиардов лет назад, оказывается ускоряющимся, тогда как с учетом наблюдаемой материи плюс рассчитанной оценки темной материи оно должно быть, напротив, – тормозящимся.

И опять тут возможны два объяснения. ОТО может просто быть неверна. Она была точно проверена только в пределах нашей солнечной системы и соседних систем в нашей собственной галактике. Возможно, когда мы переходим на масштабы, сравнимые с размерами целой вселенной, ОТО просто больше не применима.

Или имеется новая форма материи – или энергии (напомним знаменитое уравнение Эйнштейна $E = mc^2$, показывающее эквивалентность энергии и массы), – которая становится существенной на очень больших масштабах. Это означает, что эта новая форма энергии проявляется только в расширении вселенной. Чтобы делать это, она не может скапливаться вокруг галактик или даже скоплений галактик. Эта странная новая энергия, которую мы постулировали, чтобы соответствовать данным опытов, названа *темной энергией*.

Большинство видов материи находится под давлением, но темная энергия находится под растяжением – это означает, что она стягивает вещи вместе вместо того, чтобы расталкивать их в стороны. По этой причине растяжение временами называют отрицательным давлением. Несмотря на факт, что темная энергия находится под растяжением, она заставляет вселенную расширяться быстрее. Если вы озадачены этим, я вас поддерживаю. Можно подумать, что газ с отрицательным давлением будет действовать подобно резиновой ленте, связывающей галактики и замедляющей расширение. *Но оказывается, что когда отрицательное давление достаточно отрицательно, в ОТО оно имеет противоположный эффект*. Это вызывает расширение вселенной с ускорением.

Недавние измерения выявили вселенную, которая большей частью состоит из неизвестного. Полные 70 процентов плотности материи оказывается в форме темной энергии. Двадцать шесть процентов есть темная материя. И только 4 процента обычная материя. Так что менее 1 части из 20 построено из материи, которую мы наблюдаем экспериментально или описываем в стандартной модели физики частиц. Об оставшихся 96 процентах, за исключением только что отмеченных их свойств, мы не знаем абсолютно ничего.

В последние десять лет космологические измерения стали намного более точными. Частично это проявление эффекта Мура, который устанавливает, что каждые восемнадцать месяцев или около того скорость операций компьютерных чипов удваивается. Все новые эксперименты используют микрочипы или на спутниках, или на телескопах земного базирования, так что, поскольку чипы становятся лучше, постольку лучше становятся и наблюдения. Сегодня мы много знаем об основных характеристиках вселенной, таких как полная плотность материи и темп расширения. Теперь имеется стандартная модель космологии, точно так же, как имеется стандартная модель физики элементарных частиц. Почти подобно своему двойнику стандартная модель космологии имеет список свободных подгоночных констант – в этом случае около пятнадцати. Они обозначают, среди других вещей, плотность различных видов материи и энергии и темп расширения. Никто не знает ничего о том, почему эти константы имеют именно те значения, какие имеют. Как и в физике частиц, величины констант берутся из наблюдений, но еще не объясняются ни одной теорией.

Эти космологические головоломки составляют пятую великую проблему.

ПРОБЛЕМА 5: Объяснить темную материю и темную энергию. Или, если они не существуют, определить, как и почему гравитация модифицируется на больших масштабах. Более общо, объяснить, почему константы стандартной модели космологии, включая темную энергию, имеют те величины, которые имеют.

Эти пять проблем представляют границы современного знания. Они являются тем, что бодрит физиков-теоретиков даже по ночам. Все вместе они двигают большую часть текущей работы на переднем крае теоретической физики.

Любая теория, которая претендует на звание фундаментальной теории природы, должна ответить на каждую из них. Одна из целей настоящей книги заключается в оценке, насколько хорошо недавние физические теории, такие как теория струн, преуспели в достижении этой цели. Но перед тем, как мы сделаем это, нам необходимо посмотреть на более ранние попытки унификации. Мы должны многому научиться из успехов, – а также и из неудач.

2. Красивый миф

Самой заветной целью в физике, как в плохой романтической новелле, является объединение. Свести вместе две вещи, которые ранее понимались как различные, и осознать их как аспекты единой сущности, – когда мы можем сделать это, – это наиболее волнующая вещь в науке.

Единственный здравый отклик на предложенное объединение есть удивление. *Солнце является только еще одной звездой – а звезды являются только солнцами, которые удалены очень далеко!* Представьте себе реакцию кузнеца или актера конца шестнадцатого века на слух об этой дикой идее Джордано Бруно. Что могло бы быть более абсурдным, чем объединять Солнце со звездами? Люди были научены, что Солнце было великим огнем, созданным Богом, чтобы обогревать Землю, тогда как звезды были отверстиями в небесной сфере, которая преграждала путь свету небес. Объединение немедленно низвергает ваш мир с высот вниз. То, что вы использовали для веры, становится невозможным. *Если звезды являются солнцами, вселенная оказывается безмерно больше, чем вы думали! Небеса не могут быть прямо над головой!*

И даже более важно, что новое предложение об объединении приносит с собой ранее невообразимые гипотезы. *Если звезды являются другими солнцами, должны быть планеты вокруг них, на которых живут другие люди!* Следствия часто распространяются за пределы науки. *Если есть другие планеты с другими людьми на них, тогда или Иисус приходил ко всем им, а в этом случае его приход к Человеку был не уникальным событием, или все те люди потеряли возможность спасения!* Не удивительно, что католическая церковь сожгла Бруно живьем.

Великие объединения стали основополагающими идеями, на которых воздвиглись целые новые науки. Иногда следствия настолько угрожали нашему мировоззрению, что удивление быстро сменялось недоверием. Перед Дарвином каждый биологический вид находился в своей собственной вечной категории. Каждый вид был индивидуально создан Богом. Но эволюция при помощи естественного отбора означает, что все виды имеют общего предка. Они объединены в одну великую семью. Биология перед Дарвином и биология после него вряд ли являются одной и той же наукой.

Такая мощь новых прозрений быстро приводит к новым открытиям. *Если все живые существа имеют общего предка, они должны быть устроены сходным образом!* В самом деле, мы *были* сделаны из одинакового вещества, поскольку все живое оказывается состоящим из клеток. Растения, животные, грибки и бактерии кажутся весьма отличающимися друг от друга, но все они являются просто собраниями клеток, упорядоченных различными способами. Химические процессы, которые создают и поддерживают эти клетки, одни и те же во всей империи жизни.

Если предложения объединения являются столь шокирующими для нашего первоначального образа мыслей, как получается, что люди приходят к уверенности в них? Это во многих отношениях главный вопрос нашей истории, о нем история нескольких предложенных объединений, некоторые из которых стали сильной верой многих ученых. Но ни одно из них не достигло признания среди всех ученых. Как следствие, мы имеем активные разногласия и, временами, эмоциональные споры, результат попытки радикального изменения мировоззрений. Итак, когда кто-нибудь предлагает новое объединение, как мы можем сказать, является ли оно верным или нет?

Как вы можете представить, не все предложения объединения оказываются верными. В одно время химики предположили, что теплота является субстанцией, подобной материи. Она была названа *флогистоном*. Эта концепция объединяла теплоту и материю. Но она была ложной. Правильное предложение по объединению теплоты и материи в том, что теплота есть энергия хаотического движения атомов. Но, хотя атомизм был предложен древними индусами и греками, потребовалось время до конца девятнадцатого века, прежде чем теория теплоты как хаотического движения атомов была должным образом разработана.

В истории физики было много предложений объединяющих теорий, которые оказывались неправильными. Одной из знаменитых была идея, что свет и звук, по существу, являются одной и той же вещью: Они оба мыслились как колебания в материи. Поскольку звук есть колебания воздуха, было предположено, что свет является колебаниями нового вида материи, названного *эфиром*. Точно так же, как пространство вокруг нас заполнено воздухом, вселенная заполнена эфиром. Эйнштейн похоронил эту специфическую идею, предложив свой собственный вариант объединения.

Все важные идеи, которые теоретики изучают последние тридцать лет – такие как теория струн, суперсимметрия, высшие размерности, петли и другое – являются предложениями объединения. Как нам сказать, какие из них являются правильными, а какие нет?

Я уже отмечал два свойства, элементы которых содержатся в успешных объединениях. Первое, удивительность, не может быть недооценено. Если что-то не является удивительным, то идея или не интересна, или кое-что мы знали и раньше. Второе, следствия должны быть драматическими: Объединение должно быстро приводить к новым прозрениям и гипотезам, становясь двигателем, который форсирует прогресс в понимании.

Но есть и третий фактор, который побивает оба первых. Хорошая унифицирующая теория должна предлагать предсказания, которые никто и не думал сделать ранее. Она может даже предложить новые виды экспериментов, которые имеют смысл только в свете новой теории. И самое важное из всего, предсказания должны быть подтверждены экспериментом.

Эти три критерия – удивительность, новое прозрение и новые предсказания, подтвержденные экспериментом – являются тем, что мы будем искать, когда мы подойдем к оценке перспектив современных попыток объединения.

Физики, кажется, ощущают глубокую потребность в объединении, и некоторые говорят так, как будто любой шаг в направлении дальнейшей унификации должен быть шагом в направлении истины. Но жизнь не столь проста. В любой момент времени может существовать более чем один возможный путь к объединению известных нам вещей – пути, которые ведут науку в различных направлениях. В шестнадцатом столетии на столе было два очень отличающихся предложения по объединению. Это была старая теория Аристотеля и Птолемея, в соответствии с которой планеты были объединены с Солнцем и Луной как части небесных сфер. Но было и новое предложение Коперника, который объединил планеты с Землей. Каждый подход имел великие последствия для науки. Но, по большей части, только один мог бы быть верным.

Мы можем видеть здесь цену выбора ложного объединения. Если Земля является центром вселенной, это имеет потрясающие последствия для нашего понимания движения. В небе планеты изменяют направление, поскольку они прикреплены к кругам, чья природа заключается в вечном вращении. Этого никогда не

происходит с вещами на Земле: все, что мы толкнем или бросим, быстро приходит в покой. Это естественное состояние вещей, которые не прикреплены к космическим кругам. Таким образом, во вселенной Птолемея и Аристотеля имеется большое отличие между понятиями быть в движении и быть в покое.

В их мире имеется также большое отличие между небесами и Землей – вещи на Земле следуют законам, отличным от законов, которые мы получаем на небе. Птолемей предположил, что определенные тела в небе – Солнце, Луна и пять известных ему планет – двигаются по окружностям, которые сами двигаются по окружностям. Эти так называемые эпициклы давали возможность предсказывать затмения и движения планет – предсказания, которые имели точность в 1 часть на 1000, таким образом показывая плодотворность объединения Солнца, Луны и планет. Аристотель дал естественное объяснение для нахождения Земли в центре вселенной: она состоит из земного вещества, чья природа заключается не в движении по кругам, а в стремлении к центру.

Для того, кто получил образование в этой точке зрения и привык к тому, как мощно она объясняет то, что мы видим вокруг нас, предположение Коперника от том, что планеты должны рассматриваться единым с Землей, но не с Солнцем, образом, должно быть крайне выбивающим из колеи. Если Земля является планетой, тогда она и все на ней находится в непрерывном движении. Как это может быть? Это нарушало закон Аристотеля, что все, что не находится на небесных кругах, должно приходить в покой. Это также нарушало опыт, по которому, если Земля движется, то как мы можем не ощущать этого?

Ответ на эту загадку был величайшим среди всех объединением в науке: *объединением движения и покоя*. Оно было предложено Галилеем и выражено в первом законе движения Ньютона, а также названо *принципом инерции*: Тело в покое или в равномерном движении остается в этом состоянии покоя или равномерного движения, пока оно не возмущается силами.

Под равномерным движением Ньютон понимал движение с постоянной скоростью в одном направлении. Быть в покое становится только частным случаем равномерного движения – это просто движение с нулевой скоростью.

Как это может быть, что нет различия между движением и покоем? Главное тут осознать, что факт, двигается тело или нет, не имеет абсолютного смысла. Движение определяется только по отношению к наблюдателю, который сам может двигаться или нет. Если вы двигаетесь за мной с неизменным темпом, то чашка кофе, которую я воспринимаю покоящейся на моем столе, двигается относительно вас.

Но не может ли наблюдатель сказать, двигается он или нет? По Аристотелю ответ был, очевидно, да. Галилей и Ньютон настаивали на ответе: нет. Если Земля движется, а мы этого не ощущаем, тогда должно быть, что наблюдатели, двигаясь с постоянной скоростью, не ощущают никаких эффектов от своего движения. Поэтому мы не можем сказать, покоимся мы или нет, а движение должно определяться исключительно как относительная величина.

Тут имеется важное предостережение: мы говорим о равномерном движении – движении по прямой линии. (Хотя Земля, конечно, не двигается по прямой линии, отклонения от нее слишком малы, чтобы ощущаться непосредственно.) Когда мы изменяем скорость или направление нашего движения, мы это чувствуем. Такие изменения есть то, что мы называем *ускорением*, и ускорение *может* иметь абсолютный смысл.

Галилей и Ньютон достигли здесь тонкого и красивого интеллектуального триумфа. Для других было очевидно, что движение и покой являются полностью разными явлениями, легко различимыми. Но принцип инерции объединяет их. Чтобы объяснить, как получается, что они кажутся различными, Галилей придумал *принцип относительности*. Он говорит нам, что различие между движением и нахождением в покое имеет смысл только по отношению к наблюдателю. Поскольку разные наблюдатели двигаются по-разному, они по-разному различают, какие объекты двигаются, а какие покоятся. Так что факт, что каждый наблюдатель делает различие, сохраняется, как и должно быть. Таким образом, движется ли нечто или нет, перестало быть феноменом, который требует объяснения. Для Аристотеля, если нечто движется,

должна быть действующая на него сила. Для Ньютона, если движение однородное, оно сохраняется навсегда; не нужна сила, чтобы объяснить его.

Это является мощной стратегией, которая повторяется в более поздних теориях. Один из способов объединить вещи, которые проявляются как различные, заключается в том, чтобы показать, что видимые различия происходят из-за различия в точке зрения наблюдателей. Различие, которое ранее рассматривалось как абсолютное, становится относительным. Этот вид объединения бывает нечасто и представляет собой высшую форму научного творчества. Когда он достигнут, он радикально меняет наш взгляд на мир.

Предположения, что две, очевидно, очень разные вещи являются одной и той же, часто требуют очень много объяснений. Только иногда вы можете сформировать объяснение видимого отличия как следствие различных точек зрения. В иных случаях вещи, которые вы выбрали для объединения, являются поистине разными. Тогда необходимость объяснения, как вещи, которые кажутся различными, на самом деле являются в некотором смысле одним и тем же, может причинить теоретику много неприятностей.

Посмотрим на последствия предположения Бруно, что звезды на самом деле подобны нашему Солнцу. Звезды выглядят намного более тусклыми, чем Солнце. Если они, тем не менее, подобны Солнцу, тогда они должны быть очень далеко. Расстояния, которые он привлек, были намного, намного больше, чем в то время мыслилась вселенная. Так что предложение Бруно кажется, на первый взгляд, абсурдным.

Конечно, это была удобная возможность сделать новое предсказание: если бы вы могли измерить расстояние до звезд, вы нашли бы их, фактически, намного более удаленными, чем планеты. Если бы это было возможно во времена Бруно, он мог бы спастись от огня. Но это было за столетия до того времени, когда расстояние до звезд смогло быть измерено. С практической точки зрения то, что сделал Бруно, было формулирование утверждения, которое было не проверяемо при заданной технологии того времени. Предположение Бруно легко устанавливало звезды на таком расстоянии, что никто не мог бы проверить его идею.

Так что иногда необходимость объяснить, как вещи объединяются, заставляет вас постулировать новые гипотезы, которые вы просто не можете проверить. Это, как мы видели, не означает, что вы ошибаетесь, но это означает, что основатели новых унификаций могут легко оказаться на зыбком грунте.

На деле может быть еще хуже. Такие гипотезы имеют обыкновение зацепляться друг за друга. Фактически, Копернику нужно было, чтобы звезды были очень удаленными. Если бы звезды были так близко, как верил Аристотель, вы могли бы опровергнуть движение Земли – поскольку, если Земля движется, наблюдаемые положения звезд друг относительно друга менялись бы. Чтобы объяснить, почему этот эффект не виден, Коперник и его последователи поверили, что звезды очень далеко. (Конечно, мы знаем теперь, что звезды тоже двигаются, но они находятся на таких чудовищных расстояниях, что их положения в нашем небе изменяются экстремально медленно.)

Но если звезды столь далеки, как мы можем их видеть? Они должны быть очень яркими, вероятно, столь же яркими, как и Солнце. Поэтому предположение Бруно о вселенной, заполненной бесконечно большим числом звезд, естественно подходит к предположению Коперника, что Земля движется как планета.

Мы видим здесь, что различные предложения по унификации часто идут вместе. Предположение, что звезды объединяются с Солнцем, идет вместе с предположением, что планеты объединяются с Землей, и оба этих предположения требуют, чтобы движение и покой были объединены.

Эти идеи, новые в шестнадцатом столетии, противоположны другой группе идей. Предположение Птолемея, что планеты объединяются с Солнцем и Луной и что все они двигаются по эпициклам, шло рука об руку с теорией движения Аристотеля, которая объединяла все известные явления на Земле.

Итак, мы достигли двух групп идей, каждая из которых содержит несколько предположений по унификации. Следовательно, на кону часто оказывается целая группа идей, в которых различные вещи

унифицируются на различных уровнях. Перед тем, как споры разрешаются, имеются хорошие основания для уверенности с каждой стороны. Каждая сторона может поддерживаться наблюдениями. Иногда даже один и тот же эксперимент может быть интерпретирован как доказательство конкурирующих теорий унификации.

Чтобы увидеть, как это может происходить, рассмотрим мяч, падающий с вершины башни. Что происходит? Он падает на землю и приземляется у основания башни. Он не улетает в западном направлении. Ну, вы могли бы сказать, что Коперник и его последователи, очевидно, ошиблись, опыт доказывает, что Земля не вращается вокруг своей оси. Если бы Земля вращалась, мяч приземлился бы весьма далеко от основания башни.

Но Галилей и Ньютон могли бы также заявить, что падение мяча доказывает их теорию. Принцип инерции говорит нам, что если мяч движется в западном направлении вместе с Землей, когда он сброшен, он будет продолжать двигаться на запад и в процессе падения. Но мяч двигается на запад точно с той же скоростью, что и башня, так что он падает к основанию башни. То же самое доказательство, которое аристотелев философ мог бы использовать для подтверждения, что Галилей ошибся, принимается Галилеем как доказательство, что его теория корректна.

Как же нам, тем не менее, различить, какое предложенное объединение правильно, а какое ложно? В некотором смысле, тут имеется преобладание доказательства. Одна гипотеза оказывается настолько более плодотворна, чем другая, что рациональная личность не будет иметь выбора, кроме как согласиться, что первая доказана. Что касается ньютоновской революции, то тут, по существу, было реальное доказательство из наблюдения, что Земля движется относительно звезд. Но перед тем, как это произошло, точность ньютоновских законов была доказана в таком большом количестве инстанций, что тут не могло быть поворота назад.

Однако, в середине научной революции часто имеются рациональные основания, оказывающие поддержку соперничающим гипотезам. Мы находимся сейчас в таком периоде, и мы будем исследовать в последующих главах конфликтующие утверждения по объединению. Я сделаю все от меня зависящее, чтобы объяснить аргументы, которые поддерживают различные стороны, пока буду показывать, почему ученые еще достигают консенсуса.

Конечно, нам надлежит проявлять осторожность. Не все доказательства, высказанные в поддержку взгляда, надежно обоснованы. Иногда утверждения, придуманные в поддержку теории, испытывающей затруднения, являются только ее усовершенствованиями. Я недавно встретился с энергичной группой людей, стоящих в проходе на рейс из Лондона в Торонто. Они поздоровались и спросили меня, откуда я прибыл, и когда я сказал им, что я возвращаюсь с космологической конференции, они немедленно спросили меня про мой взгляд на эволюцию. "О, нет," – подумал я, тогда надо продолжать говорить им, что естественный отбор доказал свою правильность вне всяких сомнений. Они представились как члены Библейского колледжа, возвращающиеся после миссии в Африке, одна из целей которой, как оказалось, заключалась в проверке догматов креационизма. Так как они хотели втянуть меня в дискуссию, я предостерег их, что они проиграют, так как я знаю почти все доказательства. "Нет," – настаивали они, – «вы не знаете все факты.» Так что я пошел на это. Когда я сказал: "Но вы, конечно, согласитесь с фактом, что мы имеем ископаемые останки многих созданий, которые больше не живут," – они ответили: «Нет!»

«Почему вы полагаете, что нет? Как насчет динозавров?»

«Динозавры все еще живы и бродят по земле!»

«Это нелепо! Где?»

«В Африке.»

«В Африке? Африка полна людей. Динозавры на самом деле громадные. Как получается, что никто их не видит?»

«Они живут глубоко в джунглях.»

«Кто-то все равно должен был их видеть. Вы утверждаете, что знаете кого-нибудь, кто их видел?»

«Пигмеи говорили нам, что они видят их каждый раз все время. Мы смотрели, но мы не видели ни одного, но мы видели царапины, которые они сделали, на высоте от восемнадцати до двадцати футов на стволах деревьев.»

«Тогда вы согласитесь, что это гигантские животные. И ископаемые останки свидетельствуют, что они жили большими стадами. Как это могло бы быть, что никто, кроме пигмеев, их не видел?»

«Это просто. Они проводят большую часть своего времени в спячке в пещерах.»

«В джунглях? В джунглях есть пещеры?»

«Конечно, есть, почему нет?»

«Достаточно большие пещеры, чтобы туда поместился гигантский динозавр? Если пещеры столь велики, их должно быть легко найти, и вы могли бы заглянуть внутрь и увидеть их спящими.»

«Чтобы защитить себя во время своей спячки, динозавры закрывают входы своих пещер навозом, так что никто не может сказать, что они здесь.»

«Как они так хорошо закрывают свои пещеры, что их нельзя увидеть? Они используют свои лапы или, возможно, пихают навоз своим носом?»

В этом месте креационисты согласились, что они не знают, но они сказали мне, что «библейские биологи» из их школы находятся сейчас в джунглях в поисках динозавров.

"Будьте любезны, дайте мне знать, если они обнаружат хоть одного живого," – сказал я и вернулся на свое сидение.

Я это не выдумал, и я рассказал это не только для вашего развлечения. Это иллюстрирует, что рациональность не всегда является простым упражнением. Обычно рациональным является не верить в теорию, которая предсказывает нечто, что никто никогда не видел. Но иногда имеются веские основания для чего-то быть никогда не наблюдаемым. Как никак, если там *есть* динозавры, они должны где-то прятаться. Почему не в пещерах в джунглях Африки?

Это может показаться глупым, но физики, занимающиеся частицами, не один раз чувствовали необходимость придумать невидимые частицы, такие как нейтрино, чтобы придать смысл определенным теоретическим или математическим результатам. Чтобы объяснить, почему их тяжело зарегистрировать, они вынуждены были сделать нейтрино очень слабо взаимодействующими. В этом случае это была правильная стратегия, через много лет кто-то оказался в состоянии разработать эксперимент, который нашел нейтрино. И они взаимодействовали очень слабо.

Итак, иногда является рациональным не отбрасывать прочь хорошую теорию, если она предсказывает вещи, которые не могут наблюдаться. Иногда гипотезы, которые вы вынуждены были придумать, оказываются правильными. Придумывая такие специальные (*ad hoc*) гипотезы, вы не только можете сохранить правдоподобность идеи, но также иногда и предсказать новые явления. Но с некоторого момента вы начинаете перегибать палку. Обитающие в пещерах динозавры, вероятно, квалифицируются именно так. Когда вы проходите точку, где когда-то хорошая идея становится ничего не стоящей, неприятности первыми являются предметом критики. Это определенно тот самый случай, когда хорошо подготовленные, умные люди не соглашаются. Но, в конечном счете, достигается точка, где имеется такой перевес доказательств, что ни одна рациональная, ясно мыслящая персона не будет думать об идее, как о правдоподобной.

Одним из способов оценить, достигли ли вы этой точки, служит взгляд на однозначность. Во время научной революции в каждый момент времени на столе оказываются часто несколько предложений по унификации, угрожая повести науку в несовместимых направлениях. Это нормально, и в середине революции нет необходимости в рациональных основаниях, чтобы выбрать одно среди других. В такое время даже очень умные люди, которые выбирают между соревнующимися взглядами, слишком скоро и часто ошибутся.

Но одно предложение по объединению может завершиться объяснением намного большего, чем остальные, и обычно это простейшее предложение. В этот момент, когда отдельное предложение чрезвычайно превосходит остальные с точки зрения генерирования новых прозрений, согласия с экспериментом, объяснительной силы и простоты, это принимается за видимость однозначности. Мы говорим, что предложение попало в круг истины.

Чтобы увидеть, как это может произойти, рассмотрим три унификации, предложенные одной персоной, немецким астрономом Иоганном Кеплером (1571-1630). На протяжении жизни Кеплера его навязчивой идеей были планеты. Поскольку он верил, что Земля является планетой, он знал их шесть, от Меркурия до Сатурна. Их движения по небу наблюдались тысячи лет, так что было весьма много данных. Самые точные данные пришли от датского астронома Тихо Браге. Кеплер, в конце концов, пришел работать к Тихо Браге, чтобы овладеть его данными (и после смерти Браге он своровал их, но это другая история).

Каждая планетная орбита имеет радиус. Каждая планета также имеет орбитальную скорость. Надо добавить, что скорость не однородна, планеты ускоряются и замедляются, когда они двигаются вокруг Солнца по своим орбитам. Все эти числа кажутся случайными. Кеплер всю свою жизнь добивался принципа, который мог бы объединить движения планет, и, сделав это, объяснить данные по планетарным орбитам.

Сначала Кеплер занялся унификацией планет, лежащей на линии античной традиции, по которой космологическая теория должна использовать только простейшие фигуры. Одна из причин, по которой греки верили в круги, двигающиеся по кругам, заключается в том, что круг есть простейшая, а потому самая прекрасная из замкнутых фигур. Кеплер исследовал не менее прекрасные геометрические фигуры, которые могли объяснить размеры орбит планет. И он нашел очень элегантную идею, проиллюстрированную на Рис.1.

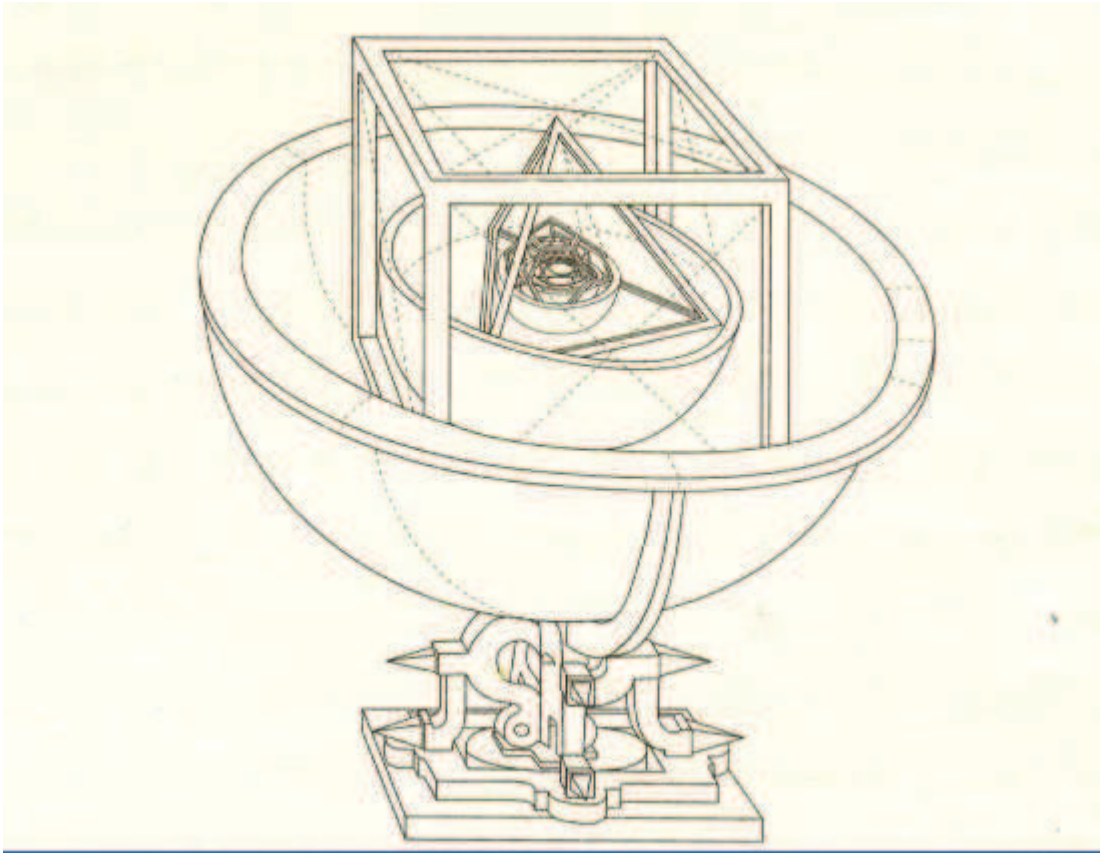

Рисунок 1. Первая теория Солнечной системы Кеплера, основанная на Платоновых телах.

Примем орбиту Земли как данную. Тогда необходимо объяснить пять чисел: пять отношений диаметров орбит других пяти планет к диаметру орбиты Земли. Если они могут быть объяснены, должна существовать некоторая красивая геометрическая конструкция, которая дает в точности эти пять чисел. Не больше и не меньше. Так что же, проблема в геометрии, для которой имеются точно пять ответов?

Да. Куб является совершенным видом тела, для которого каждая сторона такая же, как и любая другая, и каждое ребро имеет ту же длину, что и все остальные ребра. Такие тела называются Платоновыми телами. Сколько их? Точно пять: кроме куба, еще тетраэдр, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр.

Кеплеру долго не удавалось сделать ошеломляющее открытие. Впишем орбиту Земли в сферу. Опишем додекаэдр вокруг сферы. Опишем сферу вокруг него. Орбита Марса располагается на этой сфере. Опишем тетраэдр вокруг этой сферы и следующую сферу вокруг тетраэдра. Орбита Юпитера располагается на этой сфере. Вокруг орбиты Юпитера располагается куб, вне которого летает Сатурн. Внутри земной орбиты Кеплер расположил икосаэдр, вокруг которого вращается Венера, а внутри венерианской орбиты расположился додекаэдр, для Меркурия.

Эта объединяющая теория объясняла диаметры орбит планет, что ни одна теория не делала раньше. Это было математически красиво. Так почему в это не поверили? В той же степени, в какой теория была неотразима, она никуда не привела. На ее основе не было предсказано никаких новых явлений. Она даже не привела к пониманию орбитальных скоростей планет. Идея была слишком статической; она объединяла, но не приносила науке ничего интересного.

Кеплер думал об этом долгое время. Поскольку диаметры орбит были объяснены, ему нужно было только объяснить скорости различных планет. Наконец он предположил, что когда планеты путешествуют, их «пение» и частоты нот пропорциональны их скоростям. Высоты пения различных планет, когда они путешествуют по своим орбитам, составляют гармонию шести голосов, которые он назвал *гармонией сфер*.

Эта идея также имела античные корни, возвращаясь к открытию Пифагора, что корни музыкальной

гармонии находятся в отношениях чисел. Но она страдала от очевидной проблемы. Эта идея неоднозначна: имеется много красивых согласований шести голосов. Даже хуже, оказалось, что есть больше, чем шесть планет. И Галилей, современник Кеплера, открыл четыре луны, вращающихся вокруг Юпитера. Так что была еще и другая система орбит в небе. Если теория Кеплера была верна, она должна была быть применима и к вновь открытой системе. Но она была не применима.

Отдельно от этих двух предположений о математической структуре космоса Кеплер сделал три открытия, которые привели к реальному прогрессу в науке. Это были три закона, благодаря которым он сегодня широко известен, предложенные после многолетнего изнурительного кропотливого анализа данных, которые он украл у Тихо Браге. Они были не столь красивы, как другие предложения Кеплера, но они работали. Более того, один из них совершал нечто, чего Кеплер не смог бы сделать иным образом, а именно, было найдено соотношение между скоростями и диаметрами орбит. Три закона Кеплера не только согласуются с данными по всем шести планетам, они согласуются и с наблюдениями спутников Юпитера.

Кеплер открыл эти три закона потому, что он принял унификацию Коперника в свои логические заключения. Коперник сказал, что Солнце находится в центре (или, на самом деле, вблизи центра) вселенной, но в его теории планеты двигались бы тем же образом, было бы Солнце там или нет. Его единственной ролью было освещение сцены. Успех теории Коперника привел Кеплера к вопросу, а не может ли нахождение Солнца вблизи центра каждой планетной орбиты указывать на реальное совпадение центров. И не может ли Солнце, вместо этого, играть некоторую роль в определении планетных орбит. Может ли Солнце некоторым образом оказывать силу на планеты, и может ли эта сила быть объяснением их движения?

Чтобы ответить на эти вопросы, Кеплер выяснил роль точного положения Солнца в каждой орбите. Его первый большой прорыв заключался в открытии, что орбиты не являются кругами, они являются эллипсами. И у Солнца определенная роль: оно находится точно в фокусе эллипса каждой орбиты. Это был первый закон Кеплера. Вскоре после этого он открыл свой второй закон, который заключался в том, что скорости планет на их орбитах возрастают или уменьшаются, когда планеты двигаются ближе к Солнцу или дальше от него. Позднее он открыл третий закон, который управляет отношениями скоростей планет.

Эти законы отметили некоторый глубокий факт унификации солнечной системы, поскольку законы применимы ко всем планетам. Награда заключалась в том, что впервые мы имели теорию, которая могла делать предсказания. Предположим, открыта новая планета. Можем ли мы предсказать, какой будет ее орбита? До Кеплера никто бы не смог. Но, имея законы Кеплера, все, что нам нужно, это два наблюдения положения планеты, и мы сможем предсказать ее орбиту.

Эти открытия вымостили дорогу Ньютону. Великим прозрением Ньютона было увидеть, что сила, которую Солнце оказывает на планеты, является той же самой, как и сила гравитации, которая удерживает нас на Земле, и потому объединить физику небес с физикой на Земле.

Конечно, идея силы, испускаемой от Солнца на планеты, была абсурдной для большинства ученых того времени. Они верили, что пространство пустое, там нет носителя, который мог бы переправлять такую силу. Более того, не было никаких видимых ее проявлений – никакой руки, протянувшейся от Солнца до каждой планеты, – а невидимое ничто не может быть реальным.

Все это хорошие уроки для будущих объединителей/унификаторов. Первый в том, что математическая красота может ввести в заблуждение. Простые наблюдения, сделанные на основании данных, часто более важны. Другой урок в том, что корректные унификации имеют следствия для явлений, о которых не подозревали в момент, когда унификация придумывалась, как в случае с применением законов Кеплера к лунам Юпитера. Правильные объединения также поднимают вопросы, которые могут показаться абсурдными в тот момент, но которые приводят к дальнейшим унификациям, как это было с постулатом Кеплера о силе, действующей от Солнца на планеты.

Самое важное, мы увидели, что реальная революция часто требует нескольких новых предложений по

унификации, идущих вместе, чтобы поддерживать друг друга. В революции Ньютона было несколько предложенных унификаций, которые одновременно одержали триумф: объединение Земли с планетами, объединение Солнца со звездами, объединение покоя и равномерного движения и объединение гравитационной силы на Земле с силой, путем которой Солнце влияет на движение планет. Проще говоря, ни одна из этих идей не могла бы уцелеть, но вместе они побили своих противников. В результате получилась революция, которая трансформировала каждый аспект нашего понимания природы.

В истории физики была одна унификация, которая больше других может служить моделью того, что физики пытаются сделать в последние тридцать лет. Это объединение электричества и магнетизма, полученное Джеймсом Клерком Максвеллом в 1860е. Максвелл использовал мощную идею, именуемую полем, которая была придумана британским физиком Майклом Фарадеем в 1840е, чтобы объяснить, как сила может передаваться через пустое пространство от одного тела к другому. Идея в том, что поле есть величина, подобная числу, которое живет в каждой точке пространства. Когда вы движетесь сквозь пространство, величина поля изменяется непрерывно. Величина поля в каждой точке также эволюционирует во времени. Теория дает нам законы, которые говорят, как поле изменяется, когда мы движемся в пространстве и через время. Эти законы говорят нам, что величина поля в отдельной точке также подвержена влиянию поля в соседних точках. Поле в точке может также подвергаться влиянию материального тела в той же точке. Таким образом, поле может переносить силу от одного тела к другому. Тут не требуется верить в призрачное действие на расстоянии.

Одно из полей, которые изучал Фарадей, было электрическое поле. Это не число, но вектор, который мы можем изобразить как стрелку и который может изменять свою длину и направление. Представим такую стрелку в каждой точке пространства. Представим, что концы стрелок в близких точках соединены друг с другом резиновыми лентами. Если я потяну за одну, лента потянет и соседнюю. Стрелки также подвергаются влиянию электрических зарядов. Эффект влияния в том, что стрелки упорядочиваются так, что они подходят к близлежащим отрицательным зарядам и отходят от близлежащих положительных зарядов.

Фарадей также изучал магнетизм. Он ввел другое поле, другую коллекцию стрелок, которые он назвал магнитным полем; эти стрелки предпочитают указывать на полюса магнитов (см. Рис.2).

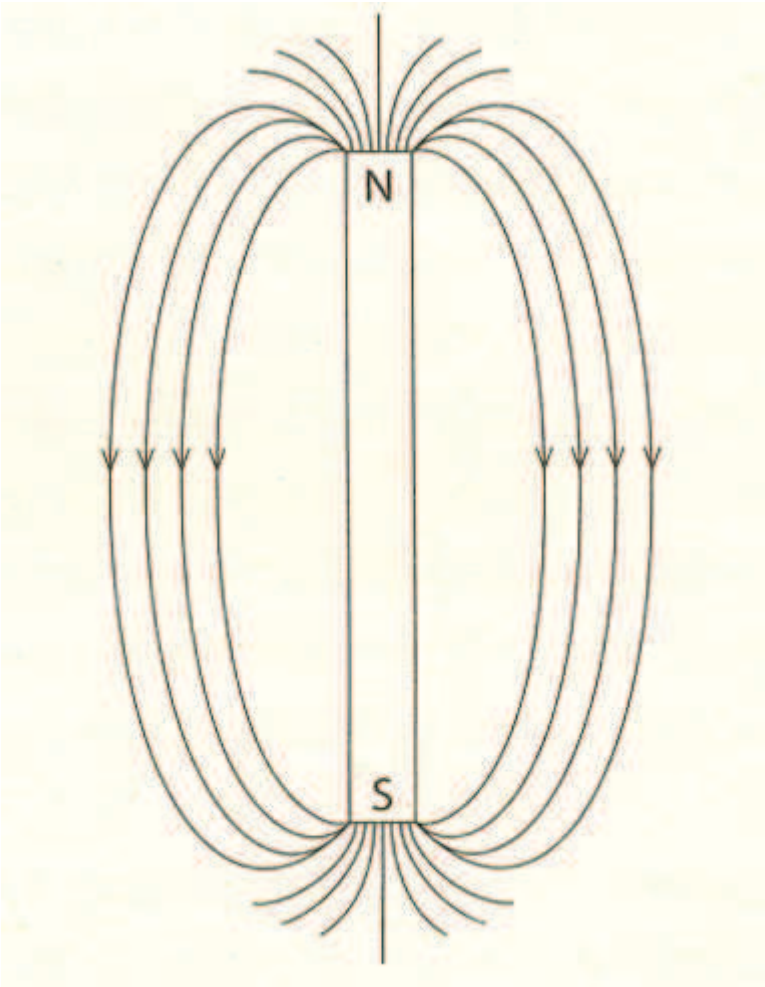

Рисунок 2. Силовые линии, сопровождающие магнитное поле, возникающее от стержневого магнита.

Фарадей записал простые законы для описания того, как стрелки электрического и магнитного полей изменяются под действием близких зарядов и магнитных полюсов, а также под действием стрелок близких полей. Он и другие проверили законы и нашли, что они дают предсказания, которые согласуются с экспериментом.

Среди открытий того времени было явление, которое смешивало электрические и магнитные эффекты. Например, движущийся по кругу заряд возбуждает магнитные поля. Максвелл осознал, что эти открытия указывают на объединение электричества и магнетизма. Чтобы полностью объединить их, он изменил уравнения. Когда он сделал это, просто добавив один член, его объединение стало объединением со следствиями.

Новые уравнения позволили электрическому и магнитному полям переходить друг в друга. Эти преобразования вызывают волны меняющихся рисунков, в которых первый есть электрическое поле, а затем магнитное поле, и которые двигаются через пространство. Такие движущиеся рисунки могут, среди других вещей, колебать электрический заряд назад и вперед. Надвигающиеся волны могут переносить энергию из одного места в другое.

Самая ошеломляющая вещь была в том, что Максвелл смог рассчитать скорость этих волн из своей теории, и нашел, что она такая же, как скорость света. Далее это принесло ему успех. *Волны, проходящие через электрические и магнитные поля, есть свет*. Максвелл не намеревался создать теорию света, он намеревался объединить электричество и магнетизм. Но, сделав это, он достиг кое-чего большего. Это пример того, как хорошая унификация будет иметь неожиданные следствия как для теории, так и для эксперимента.

Новые предсказания немедленно последовали. Максвелл осознал, что электромагнитные волны должны быть на всех частотах, а не только на частотах видимого света, и это приводит к открытию радио, инфракрасного света, ультрафиолетового света и так далее. Это иллюстрирует другой исторический урок: Когда кто-то предлагает правильную новую унификацию, следствия становятся очевидны очень быстро. Многие из этих явлений наблюдались в первые годы после того, как Максвелл опубликовал свою теорию.

Это заостряет вопрос, который станет важным, когда мы будем обсуждать другие предложения по унификации. Все унификации имеют следствия, поскольку они приводят к явлениям, которые возникают из-за того, что унифицированные вещи могут трансформироваться друг в друга. В хороших случаях эти новые явления вскоре наблюдаются – изобретатели имеют все основания прославить унификацию. Но мы увидим, что в других случаях предсказанные явления уже находятся в конфликте с наблюдениями. При таких несчастливых событиях сторонники или отказываются от своей теории, или ограничивают ее неестественным образом так, чтобы скрыть следствия унификации.

Но даже при всем триумфе объединение Максвеллом электричества и магнетизма столкнулось с труднопреодолимым препятствием. В середине девятнадцатого века большинство физиков верили, что физика была объединена потому, что все сущее было сделано из материи (или содержало материю, чтобы удовлетворить законам Ньютона). Для этих «механицистов» идею поля, просто колеблющегося в пространстве, было тяжело переварить. Теория Максвелла для них не имела смысла без некоторого материала, чье изгибание и растяжение должны были бы составить правильную реальность за электрическим и магнитным полями. Некоторый материал должен был бы колыхаться, когда волна света путешествует от цветка к глазу.

Фарадей и Максвелл сами были механицистами, и они посвятили много времени и волнений, чтобы рассмотреть эту проблему. Они были не одиноки, юный джентльмен тех времен делал хорошую карьеру в обновленных учреждениях, придумывая улучшение конструкций микроскопической оснастки, шкивов и ремней, чтобы они подразумевали лежащие в основе уравнения Максвелла. Тому, кто смог бы решить запутанные уравнения, были обещаны призы.

Имелось большое и очевидное проявление проблемы, которая заключалась в том, что свет путешествует до нас от Солнца и звезд, а внешнее пространство пусто и свободно от любой материи. Если бы в пространстве была любая материя, она замедляла бы движение планет, которые по этой причине давно бы упали на Солнце. Но как могут электрическое и магнитное поля находиться в вакууме?

Так механицисты придумали новую форму материи – *эфир* – и заполнили им пространство. Эфир имел парадоксальные свойства: он должен был быть экстремально плотным и неэластичным, чтобы свет был, по существу, звуковой волной через него. Гигантское отношение скорости света к скорости звука было бы следствием невообразимой плотности эфира. В то же время, эфир предполагался абсолютно не противодействующим прохождению через него обычной материи. Это тяжелее устроить, чем это выглядит. Можно просто сказать, что эфир и обычная материя не взаимодействуют друг с другом, – это означает, что они не оказывают друг на друга никакого силового воздействия. Но тогда почему обычная материя должна замечать свет – или электрические и магнитные поля, – если они являются просто искажениями в эфире? Не удивительно, что тому, кто умело это все обрабатывал, давали профессорство.

Могла ли быть более прекрасная унификация, чем теория эфира? Объединялись не только свет, электричество и магнетизм, эта унификация была их объединением с материей.

Однако, в то время, когда разрабатывалась теория эфира, концепция физиков по поводу материи также подвергалась изменениям. В начале девятнадцатого столетия большинство физиков думали о материи как о непрерывной, но позднее в том же веке был открыт электрон и идея, что материя состоит из атомов, была принята более серьезно – по меньшей мере, некоторыми физиками. Но это вызвало новый вопрос: что такое атомы и электроны в мире, сделанном из эфира?

Картина линий поля подобна линиям магнитного поля, следующих из северного полюса магнита к его

южному полюсу. Линии поля никогда не могут закончиться, кроме их окончания на полюсе магнита, это один из законов Максвелла. Но они могут замыкаться в круги, и такие круги могут завязываться в узлы. Так что, возможно, атомы есть узлы в магнитных силовых линиях.

Но, как знает любой моряк, имеются разные способы завязать узел. Может быть, это хорошо, поскольку есть разные виды атомов. В 1876 лорд Кельвин предположил, что различные атомы могли бы соответствовать различным узлам.

Это может показаться абсурдным, но повторим, что в то время мы очень мало знали об атомах. Мы ничего не знали о ядре и никогда не слышали о протонах или нейтронах. Так что это было не так уж сумасшедшим, как может показаться.

В то время мы также очень мало знали об узлах. Никто не знал, сколько способов имеется, чтобы связать узел, или как отличить его. Так что, с подачи этой идеи математики начали изучение проблемы, как различить различные возможные узлы. Это медленно переросло в целый раздел математики, именуемый *теория узлов*. Вскоре было доказано, что имеется бесконечное количество различных способов завязать узел, но потребовалось долгое время, чтобы изучить, как отличить его. Некоторый прогресс был сделан в 1980е, но до сих пор никто не знает процедуры, как отличить, являются ли два сложных узла одинаковыми или различными.

Заметим, как хорошая идея по унификации, даже если она оказалась ошибочной, может инспирировать новое направление исследований. Мы должны иметь в виду, однако, что только тот факт, что объединяющая теория плодотворна для математики, не означает, что физическая теория корректна. С другой стороны, успех теории узлов потребовался бы нам, если бы мы все еще верили, что атомы есть узлы в магнитном поле.

Имелась и дальнейшая проблема: теория Максвелла вступила в противоречие с принципом относительности из ньютоновской физики. Оказалась, что через проведение различных экспериментов, включая измерение скорости света, наблюдатели выяснили, что об электромагнитном поле можно было бы сказать, движется оно или нет.

Здесь конфликт между двумя унификациями, обе из которых являются центральными в ньютоновской физике: унификация всего как материи, подчиняющейся законам Ньютона, против унификации движения и покоя. Для многих физиков ответ был очевиден: идея материальной вселенной была более важна, чем, возможно, второстепенный факт, что тяжело регистрировать движение. Но несколько физиков определили принцип относительности как более важный. Одним из них был юный студент, обучавшийся в Цюрихе, по имени Альберт Эйнштейн. Он размышлял над загадкой около десяти лет, начав в возрасте 16 лет, и, наконец, в 1905 осознал, что ответ требует полного пересмотра наших представлений о пространстве и времени.

Эйнштейн решил загадку, сыграв в тот же самый великий трюк, в который исходно играли Галилей и Ньютон, чтобы установить относительность движения. Он осознал, что различие между электрическими и магнитными эффектами зависит от движения наблюдателя. Так что унификация Максвелла оказалась глубже, чем даже подозревал сам Максвелл. Электрическое и магнитное поля не только были различными аспектами одного явления, но и различные наблюдатели проводили бы это различие по-разному; это означает, что один наблюдатель может объяснять некоторое явление в терминах электричества, в то время как другой наблюдатель, движущийся относительно первого, мог бы объяснить то же самое явление в терминах магнетизма. Но оба согласятся по поводу того, что происходит. Так родилась специальная теория относительности (СТО) Эйнштейна как объединение галилеевской унификации покоя и движения с максвелловской унификацией электричества и магнетизма.

Из этого многое следует. Одно следствие в том, что свет должен иметь универсальную скорость, независимую от движения наблюдателя. Другое в том, что должна иметь место унификация пространства и времени. Ранее имелось явное различие: время было универсальным, и каждый согласился бы с тем, что

понимается под одновременным происхождением двух событий. Эйнштейн показал, что наблюдатели, двигающиеся по отношению друг другу, будут не согласны с тем, произошли ли два события в разных местах в одно и то же время или нет. Это объединение подразумевалось в его статье 1905 года, озаглавленной «К электродинамике движущихся тел», и было установлено явно в 1907 одним из его учителей, Германом Минковским.

Итак, тут мы опять имеем историю двух соревнующихся попыток унификации. Механицисты имели прекрасную идею, которая объединит физику: все сущее есть материя. Эйнштейн поверил в другой вид объединения: в унификацию движения и покоя. Чтобы поддержать это, он придумал еще более глубокую унификацию – пространства и времени. В каждом случае нечто, что раньше мыслилось как абсолютно различное, становилось различным только относительно движения наблюдателя.

В самом конце конфликт между двумя предложениями унификации был урегулирован экспериментом. Если вы верили механицистам, вы поверили бы, что наблюдатель мог бы измерить свою скорость через эфир. Если вы верили Эйнштейну, вы знали бы, что этого не могло быть, так как все наблюдатели эквивалентны.

Несколько попыток обнаружить движение Земли через эфир были сделаны перед 1905, когда Эйнштейн предложил СТО, и они провалились.[9] Защитники теории эфира все корректировали свои предсказания так, чтобы сделать тяжелее и тяжелее обнаружение движения Земли через эфир. Это было легко сделать, поскольку, когда они проводили свои расчеты, они использовали теорию Максвелла, которая, когда она корректно интерпретируется, согласуется с ожиданиями Эйнштейна, что эфирное движение не детектируемо. Это означает, что механицисты уже имели правильные уравнения, они только имели неправильные интерпретации.

Что касается самого Эйнштейна, неясно, насколько он был осведомлен о ранних экспериментах, но они не могли иметь для него значения, поскольку он уже убедился, что эфирное движение Земли не детектируемо. Эйнштейну, фактически, оставалось только взяться за дело. Как мы увидим в следующей главе, его унификация пространства и времени была подвергнута углубленному рассмотрению. Со временем большинство физиков согласились с ним и признали СТО, при этом сам Эйнштейн уже ушел далеко за ее пределы.

3. Мир как геометрия

Первые десятилетия двадцатого века показали несколько попыток унификации. Немногие удались, остальные потерпели неудачу. Коротко ознакомившись с их историями, мы можем извлечь урок, который поможет нам понять кризис современных попыток унификации.

От Ньютона до Эйнштейна доминировала одна идея: *мир сделан ни из чего другого, как из вещества*. Даже электричество и магнетизм были аспектами вещества – просто искажениями эфира. Но эта красивая картина была разрушена с триумфом СТО, ибо если целое понятие быть в покое или в движении является бессмысленным, эфир должен быть фикцией.

Поиски унификации велись тут и там, но на самом деле было только одно направление движения. Это была противоположность теории эфира: если поля не сделаны из вещества, вероятно, *поля* являются фундаментальной материей. *Материя тогда должна быть сделана из полей*. Уже были модели электронов и атомов как напряжений в полях, так что это был не такой уж большой шаг.

Но как раз, когда эта идея приобретала приверженцев, все еще оставались загадки. Например, имелось два различных вида полей, гравитационное поле и электромагнитное поле. Почему два поля, а не одно поле? И конец ли это истории? Стремление к унификации вынудило физиков спросить, не являются ли гравитация и электромагнетизм сторонами одного явления. Таким образом родились поиски того, что мы сегодня называем *единой теорией поля*.

Поскольку Эйнштейн только что встроил электромагнетизм в свою СТО, самым логичным путем продолжения было модифицировать ньютоновскую теорию гравитации так, чтобы сделать ее согласующейся с СТО. Это оказалось легко сделать. И не только это, эта модификация привела к чудесному открытию, которое стало ядром единых теорий до сегодняшнего дня. В 1914 финский физик по имени Гуннар Нордстрём нашел, что все, что вам нужно было сделать, чтобы объединить гравитацию и электромагнетизм, это нужно было повысить размерность пространства на единицу. Он написал уравнения, которые описывали электромагнетизм в мире с четырьмя измерениями пространства (и одним измерением времени), а вылезла гравитация. Только за счет дополнительного пространственного измерения вы получаете унификацию гравитации и электромагнетизма, которое, к тому же, совершенно согласуется с СТО Эйнштейна.

Но если это верно. Не должны ли мы быть в состоянии видеть в этом новом измерении, как мы видим в трех пространственных измерениях? Если нет, не является ли тогда теория, очевидно, неправильной? Чтобы избежать эту мучительную проблему, мы можем сделать новое измерение круговым, так что, когда мы глядим в него, мы на самом деле путешествуем вокруг него и возвращаемся на то же место.[10] Тогда мы можем сделать диаметр круга очень маленьким, так что тяжело увидеть, что дополнительное измерение вообще здесь есть. Чтобы понять, как сжатие чего-нибудь может сделать невозможным его наблюдение, напомним, что свет состоит из волн и каждая световая волна имеет длину волны, которая равна расстоянию между пиками. Длина волны света устанавливает предел, насколько маленькую вещь вы можете увидеть; для вас нельзя различить объект, меньший, чем длина волны света, который вы используете, чтобы смотреть на него. Поэтому нельзя обнаружить существование дополнительной размерности, меньшей, чем длина волны света, которую можно ощутить.

Можно подумать, что Эйнштейн, как и все люди, мог бы воспользоваться этой новой теорией. Но в это время (1914) он уже двигался по совершенно другой дороге. В отличие от своих современников Эйнштейн выбрал маршрут к унификации гравитации с относительностью, который привел его назад к самому основанию принипа относительности: к унификации движения и покоя, открытой Галилеем несколькими столетиями ранее. Эта унификация касается только равномерного движения – это означает, движения по прямой линии с постоянной скоростью. Начав около 1907, Эйнштейн сначала задал себе вопрос о других типах движения, таких как ускоренное движение. Это движение, скорость или направление которого изменяются. Не должно ли различие между ускоренным и неускоренным движением быть неким образом уничтожено?

Сначала это кажется ошибочным шагом, ведь в то время, как мы не можем чувствовать равномерное движение, мы определенно чувствуем эффекты ускорения. Когда самолет отрывается от земли, мы чувствуем, как нас вдавливает назад в наши сидения. Когда лифт начинает подниматься, мы чувствуем ускорение в форме дополнительного давления, вжимающего нас в пол.

Именно в этом моменте Эйнштейн сделал свое наиболее экстраординарное прозрение. Он осознал, что *эффекты ускорения неотличимы от эффектов гравитации*. Подумаем о женщине, стоящей в лифте в ожидании, когда он тронется. Она уже чувствует силу, вдавливающую ее в пол. То, что происходит, когда лифт начинает подниматься, не отличается по виду, а только по степени: Она чувствует ту же самую силу, но возросшую. Допустим, что лифт все еще стоит, но сила тяжести моментально возросла. Эйнштейн осознал, что она будет чувствовать в точности то же самое, как если бы лифт двигался с ускорением вверх.

Имеется и обратное к сказанному утверждение. Допустим, что трос, удерживающий лифт, перерезан и кабина вместе с находящимися в ней начинает падать. В свободном падении пассажиры лифта будут чувствовать невесомость. Они будут чувствовать точно то, что чувствует астронавт на орбите. Таким

образом, можно сказать, что ускорение падающего лифта может точно ликвидировать эффекты гравитации.

Эйнштейн напомнил наблюдение, что персона, падающая с крыши здания, не будет чувствовать никакого воздействия гравитации, пока она падает. Он назвал это «самой удачной мыслью моей жизни», и оформил ее в виде принципа, который он назвал *принципом эквивалентности*. Он гласит, что эффекты ускорения неотличимы от эффектов гравитации.[11]

Так Эйнштейн преуспел в унификации всех видов движения. Однородное движение не отличимо от покоя. И ускорение не отличается от состояния покоя, но в приложенном гравитационном поле.

Объединение ускорения с гравитацией было унификацией с великими следствиями. Даже до того, когда концептуальные выводы были выработаны, имелись гигантские последствия для эксперимента. Некоторые предсказания могли бы даже быть выведены из вузовской алгебры – например, что часы будут замедляться в гравитационном поле, что было со временем подтверждено. Другое предсказание, – впервые сделанное Эйнштейном в 1911, – было в том, что свет отклоняется, когда он проходит через гравитационное поле.

Отметим здесь, что, как и в успешных унификациях, обсуждавшихся ранее, одновременно происходит более, чем одно объединение. Объединяются два различных вида движения; больше нет необходимости проводить различие между равномерным и ускоренным движениями. И эффекты ускорения объединяются с эффектами гравитации.

Даже если Эйнштейн мог иметь основания для нескольких предсказаний из принципа эквивалентности, новый принцип не был завершенной теорией. Формулирование полной теории было величайшей задачей его жизни и потребовало для завершения около десяти лет. Чтобы увидеть, почему так, попытаемся понять, что означает сказать, что гравитация изгибает световые лучи. До этого особого прозрения Эйнштейна всегда и всюду имелись два вида вещей: вещи, которые живут в пространстве, и само пространство.

Мы не привыкли размышлять о пространстве как о сущности со своими собственными свойствами, но они определенно есть. Пространство имеет три измерения, а также оно имеет определенную геометрию, которую мы изучаем в школе. Названная евклидовой геометрией – по имени Евклида, который разработал ее постулаты и аксиомы более двух тысяч лет назад, – она представляет собой изучение свойств самого пространства. Теоремы евклидовой геометрии говорят нам, что происходит с треугольниками, окружностями и линиями, проведенными в пространстве. И они относятся ко всем объектам, материальным и воображаемым.

Следствием теории электромагнетизма Максвелла было то, что световые лучи двигаются по прямым линиям. Таким образом, она придавала смысл использованию световых лучей для отслеживания геометрии пространства. Но, если мы принимаем эту идею, мы немедленно видим, что эйнштейновская теория имеет великие следствия. В виде искривления световых лучей гравитационным полем, которое, в свою очередь, отвечает присутствию материи. Отсюда выводится единственное заключение, что присутствие материи влияет на геометрию пространства.

В евклидовой геометрии, если две прямые линии изначально параллельны, они никогда не встретятся. Но два световых луча, которые изначально были параллельны, могут встретиться в реальном мире, поскольку, если они проходят по обе стороны от звезды, они будут отклоняться по направлению друг к другу. Так что евклидова геометрия не верна для реального мира. Более того, геометрия постоянно меняется, поскольку материя постоянно движется. Геометрия пространства не подобна бесконечной плоскости. Она подобна поверхности океана – невероятно динамичной, с большими волнами и мелкой рябью на ней.

Таким образом, геометрия пространства оказалась еще одним полем. В самом деле, геометрия пространства почти то же самое, что и гравитационное поле. Чтобы объяснить, почему так, напомним частичное объединение пространства и времени, которое Эйнштейн достиг в СТО. В этой унификации пространство и время вместе образуют четырехмерную сущность, названную пространством-временем. Оно имеет геометрическую аналогию с евклидовой геометрией в следующем точном смысле.

Рассмотрим прямую линию в пространстве. Две частицы могут двигаться вдоль нее, но одна путешествует с постоянной скоростью, тогда как другая постоянно ускоряется. Что касается пространства, две частицы двигаются по одинаковому пути. *Но они двигаются по разным путям в пространстве-времени*. Частица с постоянной скоростью двигается по прямой линии не только в пространстве, но и в пространстве-времени. Ускоренная частица двигается в пространстве-времени по искривленному пути (см. Рис.3).

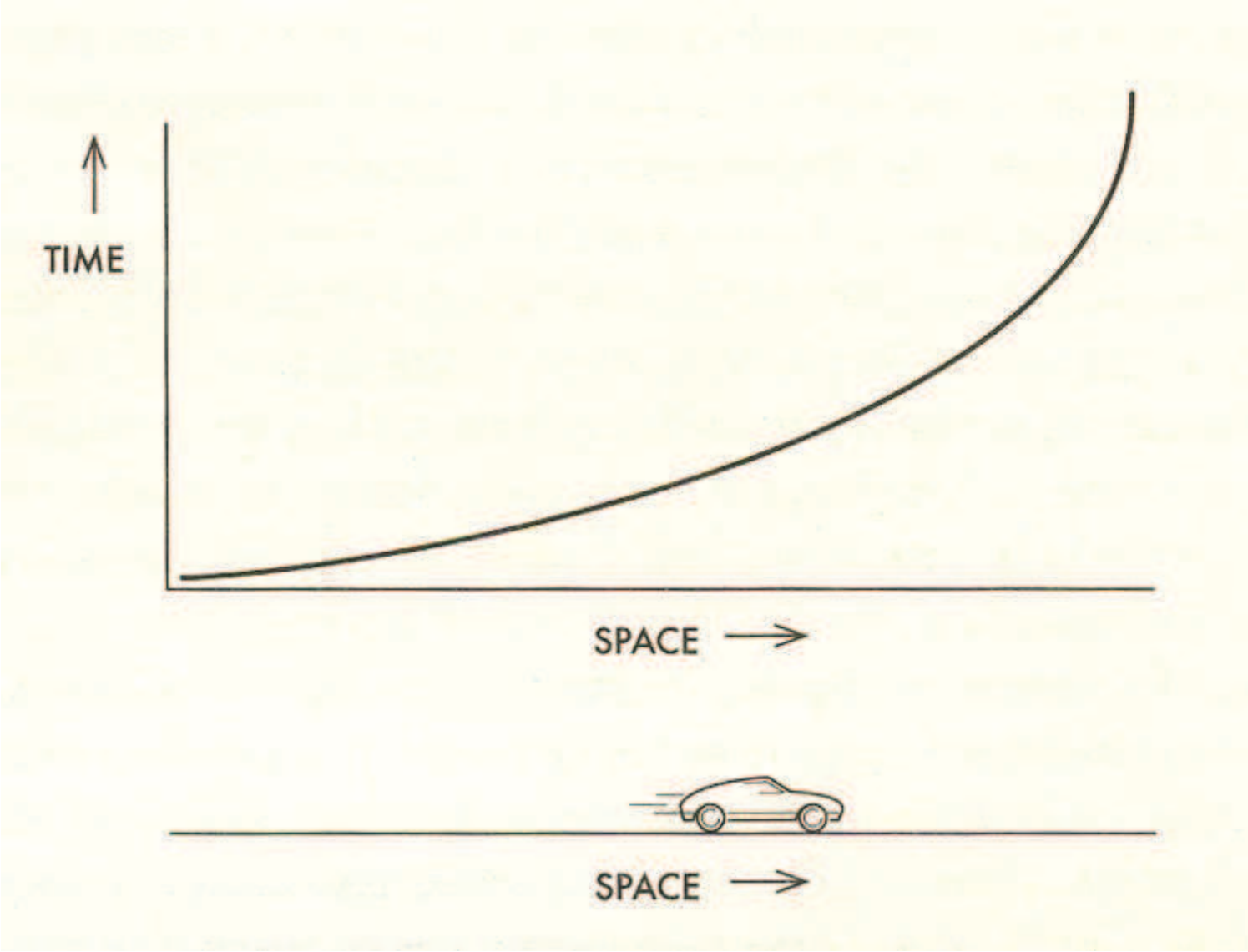

Рисунок 3. Автомобиль, тормозящийся вдоль прямой в пространстве, путешествует по искривленному пути в пространстве-времени.

Поэтому, точно так же, как геометрия пространства может различить прямую линию от искривленного пути, геометрия пространства-времени может различить частицу, движущуюся с постоянной скоростью, от ускоренной частицы.

Но эйнштейновский принцип эквивалентности говорит нам, что эффекты гравитации не могут быть различимы на малых расстояниях от эффектов ускорения.[12] Поэтому, говоря о том, какие траектории ускоренные, а какие нет, геометрия пространства-времени описывает эффекты гравитации. Следовательно, геометрия пространства-времени и есть гравитационное поле.

Таким образом, двойная унификация, задаваемая принципом эквивалентности, становится тройной унификацией: все движения эквивалентны, как только эффекты гравитации приняты во внимание,

гравитация неотличима от ускорения, и гравитационное поле объединяется с геометрией пространства-времени. Когда это было разработано в деталях, это стало эйнштейновской *общей теорией относительности* (ОТО), которую он опубликовал в полном виде в 1915.

Неплохо для парня, который не смог сначала получить академическую работу.

Таким образом, к 1916 имелось два весьма различающихся предложения по будущему физики, оба из которых базировались на глубокой идее по поводу объединения гравитации с остальной физикой. Это было элегантное объединение гравитации с электромагнетизмом Нордстрёма через простой постулат о дополнительном, скрытом измерении пространства. И это была ОТО Эйнштейна. Обе казались последовательными теориями, и каждая делала нечто неожиданно элегантное.

Обе они не могли бы быть верными, так что необходимо было сделать выбор. К счастью, две теории делали различные предсказания для выполнимого эксперимента. ОТО Эйнштейна предсказывала, что гравитация должна искривлять световые лучи – и точно предсказывала, насколько. В теории Нордстрёма такого эффекта не было: свет всегда двигается по прямым линиям, точка.

В 1919 великий британский астрофизик Артур Эддингтон повел экспедицию на западное побережье Африки для проведения эксперимента, который закончился подтверждением того, что гравитационное поле Солнца на самом деле отклоняет свет. Этот эффект наблюдался во время полного солнечного затмения, которое позволило увидеть вблизи края закрытого Солнца свет от звезд, которые фактически находились прямо за Солнцем. Если бы солнечная гравитация не искривила их свет, эти звезды не могли бы быть видны. Но они были. Так что выбор между двумя совершенно разными направлениям унификации был сделан единственным способом, который мог бы быть, – через эксперимент.

Это важный пример, поскольку он показывает пределы того, что может быть усовершенствовано одними размышлениями. Некоторые физики заявляли, что ОТО представляет собой случай, в котором было достаточно чистой мысли, чтобы показать путь вперед. Но реальная история противоположна. Без эксперимента большинство теоретиков, вероятно, выбрали бы унификацию Нордстрёма; она проще и сводится к мощной новой идее об объединении через дополнительные измерения.

Эйнштейновское объединение гравитационного поля с геометрией пространства-времени сигнализировало о глубочайшей трансформации того, как мы постигаем природу. До Эйнштейна пространство и время мыслились как имеющие свойства, которые были навечно фиксированы: Геометрия пространства была, есть и всегда будет такой, как ее описывал Евклид. Время движется независимо ни от чего. Вещи двигаются в пространстве и изменяются во времени, но сами пространство и время никогда не видоизменяются.

Для Ньютона пространство и время составляли абсолютный фон. Они обеспечивали фиксированную сцену, на которой разыгрывалась великая драма. Геометрия пространства и времени была нужна, чтобы придать смысл вещам, которые изменяются, таким как положения и движения частиц. Но сами они никогда не менялись. Мы имеем название для теорий, которые зависят от такого фиксированного, абсолютного каркаса: мы называем их *зависимыми от фона теориями*.

ОТО Эйнштейна совершенно иная. Здесь нет фиксированного фона. Геометрия пространства и времени меняется и эволюционирует, как и все остальное в природе. Разные геометрии пространства-времени описывают истории различных вселенных. Мы больше не имеем полей, двигающихся в фиксированной фоновой геометрии. Мы имеем сгустки полей, которые все взаимодействуют друг с другом, все динамические, все влияют друг на друга, одно из которых является геометрией пространства-времени. Мы называем такую теорию *независимой от фона теорией*.

Отметим разницу между зависимыми от фона и независимыми от фона теориями. История, которая раскрывается на протяжении этой книги, крутится вокруг различия между ними.

Эйнштейновская ОТО удовлетворяет всем тестам, которые мы предложили в последней главе для

успешной унификации. Тут были глубокие концептуальные следствия, которые подразумевались включенными в унификацию. Они быстро привели к предсказаниям новых явлений, таких как расширяющаяся вселенная, Большой Взрыв, гравитационные волны и черные дыры, и для всех из них имеются хорошие свидетельства. Все наше понятие космологии было развернуто в их направлении. Предположения, которые некогда казались радикальными, вроде искривления света материей, сейчас используются как рабочие инструменты для отслеживания распределения материи во вселенной.

И всякий раз, когда предсказания теории детально тестировались, они прекрасно подтверждались.[13]

Но ОТО была только стартом. Даже перед тем, как Эйнштейн опубликовал окончательную версию теории, он и другие формулировали новые виды единых теорий. В целом они имели простую идею: если гравитационная сила могла бы пониматься как проявление геометрии пространства, почему это не могло бы быть верным и для электромагнетизма? В 1915 Эйнштейн написал Дэвиду Гильберту, вероятно, величайшему из живших тогда математиков: "Я часто мучил свой разум, чтобы перебросить мост через пропасть между гравитацией и электромагнетизмом."[14]

Но потребовалось время до 1918, чтобы появилась по-настоящему хорошая идея об этой особой унификации. Эта теория, придуманная математиком Германом Вейлем, содержала красивую математическую идею, которой предстояло стать ядром стандартной модели физики частиц. Однако теория потерпела неудачу, поскольку в исходной версии Вейля она давала большие следствия, которые не согласовывались с экспериментом. Одно заключалось в том, что длина объекта должна зависеть от пути его получения. Если вы берете два метровых бревна, разделяете их, а затем сводите их назад вместе и сравниваете, они должны будут в общем случае иметь разную длину. Это намного радикальнее, чем СТО, которая содержит положение, что метровые бревна могут на самом деле стать разными по длине, но только когда они двигаются друг относительно друга, а не когда они сравниваются в покое. Это, конечно, не согласуется с нашим ощущением природы.

Эйнштейн не поверил в теорию Вейля, но он восхищался ей, написав Вейлю: "За исключением [отсутствия] согласия с реальностью это в любом случае великолепное интеллектуальное свершение."[15] Ответ Вейля показывает силу математической красоты: "Отклонение Вами теории тяжело для меня, ... Но мой собственный разум все еще сохраняет веру в нее."[16]

Конфликт между теми, кто попался на очарование красивой теории, которую они придумали, и более трезвыми умами, настаивающими на связи с реальностью, является историей, которую мы снова и снова будем видеть в более поздних попытках унификации. В этих случаях нет легкого решения, поскольку теория может быть фантастически красивой, плодотворной для развития науки и, в то же время, полностью неправильной.

Но даже если первая попытка унификации Вейля провалилась, он придумал современную концепцию объединения, которая в конце концов привела к теории струн. Он был первым, но далеко не последним, кто заявил: "Я достаточно нахален, чтобы верить, что целые физические явления могут быть выведены из единственного универсального мирового закона величайшей математической простоты."[17]

Годом позже теории Вейля немецкий физик по имени Теодор Калуца нашел другой путь для объединения гравитации и электромагнетизма, пересмотрев идею Нордстрёма о скрытой размерности. Но он сделал эту размерность скрученной. Нордстрём нашел гравитацию, применив теорию электромагнетизма Максвелла к пятимерному миру (в котором четыре измерения пространственные и одно временное). Калуца сделал обратное: он применил ОТО Эйнштейна к пятимерному миру и нашел электромагнетизм.

Вы можете наглядно представить это новое пространство, добавив маленькую окружность к каждой точке обычного трехмерного пространства (см. Рис.4). Эта новая геометрия может быть искривлена новыми способами, поскольку маленькие окружности могут присоединяться к различным точкам по-разному. Тогда в каждой точке оригинального трехмерного пространства может быть измерено нечто новое. Эта информация, оказывается, выглядит в точности как электрическое и магнитное поля.

Другой удивительный побочный результат заключается в том, что оказывается, что заряд электрона связан с радиусом маленькой окружности. Это не должно быть удивительным: если электрическое поле есть просто проявление геометрии, электрический заряд должен быть тоже проявлением геометрии.

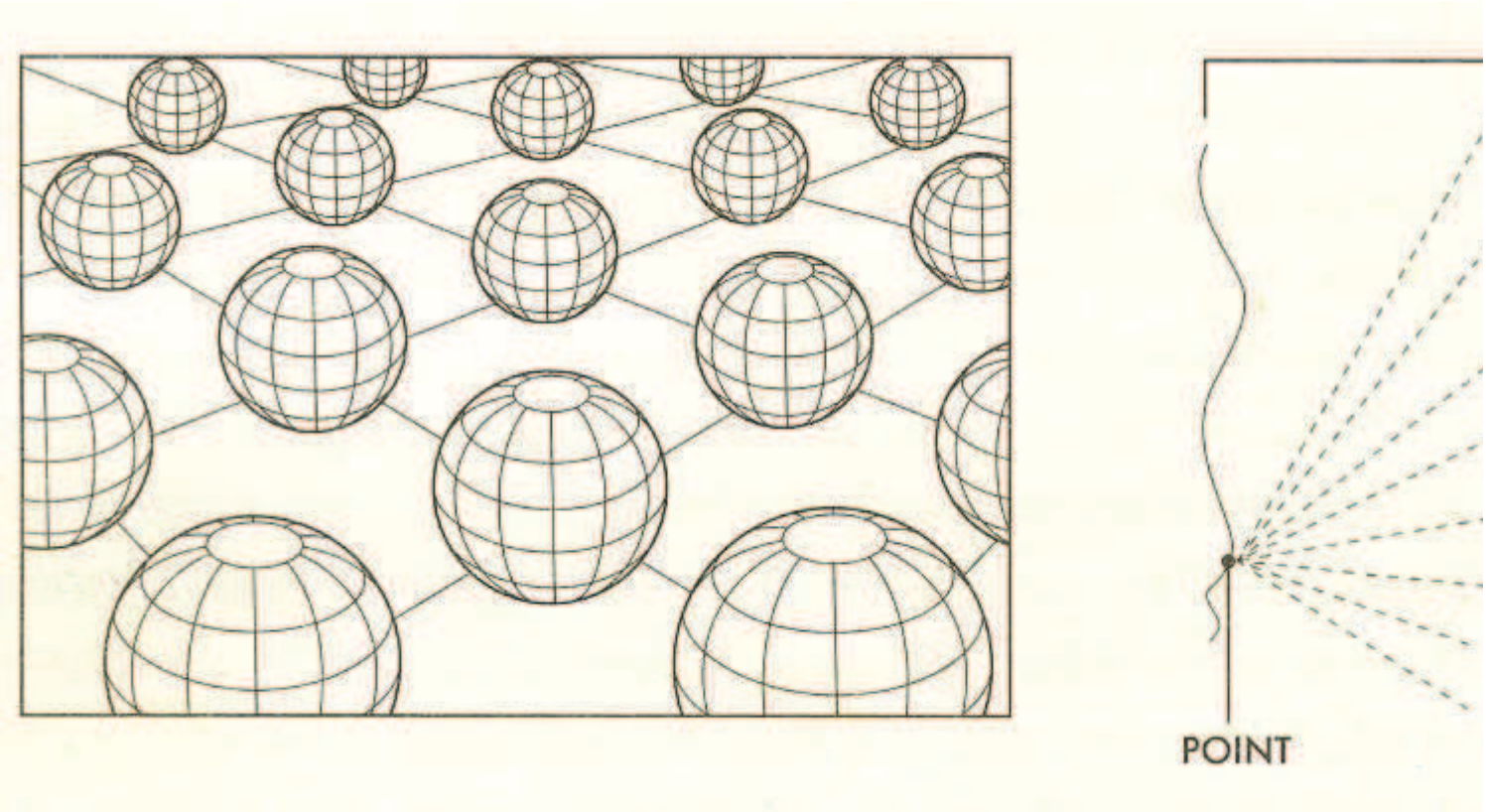

Рисунок 4. Скрученные дополнительные размерности, использованные в теории Калуцы-Кляйна. Слева: сферы расположены в каждой точке обычного трехмерного пространства, создавая пятимерное пространство. Справа: маленькая окружность расположена на одномерном пространстве. Издалека пространство выглядит одномерным, но при ближайшем рассмотрении видно, что оно двумерно.

И не только это. ОТО описывает динамику пространства-времени в терминах определенных уравнений, называемых уравнениями Эйнштейна. Мне не нужно выписывать их, чтобы описать ключевой факт: эти же самые уравнения могут быть применены к пятимерному миру, который мы только что описали. До тех пор, пока мы наложили одно простое условие, они оказываются правильными уравнениями для описания электрического и магнитного полей и гравитации, объединенных вместе. Таким образом, если эта теория верна, электромагнитное поле является просто другим названием для геометрии пятого измерения.

Идея Калуцы была переоткрыта и разработана дальше в 1920е шведским физиком Оскаром Кляйном. Его теория на самом деле была красива и неотразима. Гравитация и электромагнетизм были объединены одним ударом, и уравнения Максвелла были объяснены как вытекающие из уравнений Эйнштейна, и все благодаря простому акту добавления одного измерения к пространству.

В это время Эйнштейн был покорен. В апреле 1919 он написал Калуце: "Идея достижения [единой теории] через пятимерный цилиндр никогда у меня не возникала. ... На первый взгляд Ваша идея нравится мне чрезвычайно."[18] Несколькими годами позже в письме датскому физику Хендрику Лоренцу он радовался: "Оказывается, что союз гравитации и теории Максвелла достигается полностью удовлетворительным образом посредством пятимерной теории."[19] Известный физик Джордж Уленбек вспоминал, как он впервые услышал об идее Кляйна в 1926: "Я почувствовал разновидность экстаза! Теперь кто-то понимает мир."[20]

К сожалению, Эйнштейн и другие энтузиасты ошибались. Как и с теорией Нордстрёма, идея унификации через добавление скрытой размерности потерпела неудачу. Важно понять, почему.

Я говорил раньше, что для того, чтобы предложенная унификация была успешной, она должна завоевать свое место, сделав новые предсказания, которые подтвердит эксперимент. Успешные унификации также генерируют обилие новых прозрений, которые приводят к новым открытиям. Оказалось, как это не раз бывало, что ни одна из этих вещей не произошла в случае теории Калуцы-Кляйна. Причина проста: теория наложила упомянутое ранее внешнее условие, согласно которому дополнительное измерение скручено в окружность, чей радиус слишком мал, чтобы его разглядеть. И не только это: чтобы получить электромагнетизм из теории, радиус кольца должен быть заморожен, не изменяться ни в пространстве, ни во времени.

Это ахиллесова пята всего предприятия, именно она приводит прямо к его краху. Причина в том, что замораживание радиуса дополнительного измерения подрывает саму суть ОТО Эйнштейна, которая в том, что геометрия является динамической. Если мы добавим другое измерение к пространству-времени, которое описывается ОТО, геометрия этого дополнительного измерения должна быть также динамической. А это будет реально в том случае, если позволить радиусу маленькой окружности свободно изменяться. При этом теория Калуцы и Кляйна будет иметь бесконечно много решений, в которых радиус окружности варьируется в пространстве и изменяется во времени. Это будет иметь удивительные следствия, поскольку это приводит к процессам, в которых гравитационные и электрические эффекты преобразуются друг в друга. Это также приводит к процессам, в которых электрические заряды меняются во времени.

Но, если унификация Калуцы-Кляйна является правильной, пятое измерение нельзя было бы рассматривать отдельно от других: маленькой окружности нужно было бы позволить изменяться. Поэтому результирующие процессы являются необходимыми следствиями объединения электричества и геометрии. Если бы они когда-либо наблюдались, это было бы прямым подтверждением, что геометрия, гравитация, электричество и магнетизм все являются аспектами одного явления. К сожалению, такие эффекты никогда не наблюдались.

Этот случай не из тех, в которых теоретики могли быстро отпраздновать следствия унификации; вместо этого они должны были скрыть их, настойчиво утверждая, что исследовано только бесконечно малая часть решений, где радиус пятого измерения заморожен в пространстве и во времени.

Дело было еще хуже, поскольку такие решения, как оказалось, нестабильны. Подв*и*гаем хоть на йоту геометрию, и маленькие окружности быстро сколлапсируют в сингулярность, отмечая конец времен. Подв*и*гаем ее иным образом, и окружности вырастут, так что вскоре дополнительная размерность станет видимой, совсем дискредитируя теорию. В результате предсказания теории должны быть скрыты, чтобы закрыть тот факт, что она становится настолько неправильной.

На этом этапе даже Эйнштейн потерял свой энтузиазм. Он писал своему другу Паулю Эренфесту: "Это ненормально, заменить четырехмерный континуум пятимерным, а затем, позднее, искусственно связать одно из этих пяти измерений, чтобы установить соответствие факту, что оно не проявляет себя."[21]

Как если бы этого было не достаточно, физики нашли и другие причины отбросить эту теорию. К 1930м люди узнали, что в мире имеется больше сил, чем гравитация и электромагнетизм. Они узнали о сильном и слабом ядерных взаимодействиях, так что стало бессмысленно оставлять их за пределами унификации. Но никто не знал, как включить их в эти единые теории. Тем не менее, со временем поиски единой теории продолжились усилиями Эйнштейна. Некоторые из великих математиков и физиков того времени внесли вклад в эти попытки, включая Вольфганга Паули, Эрвина Шредингера и Вейля. Они нашли другие пути для модификации геометрии пространства-времени так, чтобы объединить гравитацию с электромагнетизмом. Они были уверены в глубоких математических прозрениях, но они тоже никуда не пришли, они или не делали новых предсказаний, или делали предсказания явлений, которые не наблюдались. К 1940м Эйнштейн и несколько других людей, кто все еще искал единую теорию поля, главным образом, вызывали насмешки.

Моя первая работа после получения степени доктора философии была в 1979 в Институте перспективных исследований в Принстоне. Одной из главных причин для меня принять ее была надежда соприкоснуться с некоторым живым наследием Эйнштейна, который умер двадцатью четырьмя годами ранее. В этом я разочаровался. Здесь не было следов его времени, за исключением его бюста в библиотеке. Ни один студент или последователь Эйнштейна не мог быть найден. Только несколько людей, которые знали его, вроде физика-теоретика Фримена Дайсона, все еще были здесь.

В первую мою неделю там Дайсон, в высшей степени джентльмен, подошел и пригласил меня на ланч. После расспросов о моей работе он поинтересовался, есть ли что нибудь, что он мог бы сделать, чтобы я почувствовал себя в Принстоне как дома. Я имел всего один вопрос. Я спросил: «Не могли бы Вы мне сказать, как на самом деле выглядел Эйнштейн?» Дайсон ответил: «Мне очень жаль, но это единственная вещь, в которой я не могу вам помочь.» Удивившись, я стал настаивать: «Но Вы появились тут в 1947, и вы были коллегами с ним до его смерти в 1955.»

Дайсон объяснил, что он тоже пришел в институт в надежде узнать Эйнштейна. Так он подошел к секретарю Эйнштейна, Элен Дукас, чтобы договориться о встрече. За день до встречи он начал волноваться, что не имеет чего-то особенного для обсуждения с великим человеком, так что он получил у госпожи Дукас копии недавних научных статей Эйнштейна. Они все были об усилиях Эйнштейна сконструировать единую теорию поля. Прочитав их тем же вечером, Дайсон решил, что это негодный хлам.

На следующее утро он осознал, что, хотя он не мог бы предстать перед Эйнштейном и сказать, что его работа была хламом, он не мог бы и не сказать ему ничего.

Так что он не пришел на встречу и, как он сказал мне, исчерпал в результате все восемь лет, пока смерть Эйнштейна не отменила все.

Я смог только сказать очевидное: «Вы не думаете, что Эйнштейн мог бы защититься и объяснить вам свою мотивацию?»

"Определенно," – ответил Дайсон, – «Но я стал намного старше, прежде чем эта мысль посетила меня.»

Одна из проблем, которая стояла перед Эйнштейном и несколькими теоретиками, занимавшимися единой теорией поля, была (исключая насмешки со стороны физиков, занимающихся частицами) в том, что этот вид унификации оказался слишком простым. Вместо того, чтобы быть тяжелыми для поиска, единые теории поля были по пятачку пучок. Было множество различных путей для их достижения и никаких оснований для выбора одной среди других. За десятилетия трудов было только одно реальное продвижение: Была решена проблема присоединения двух ядерных сил. Оказалось, что все, что требуется, это добавить еще больше дополнительных размерностей. Поля, необходимые для описания слабого и сильного ядерных взаимодействий, появлялись, когда к ОТО были добавлены еще несколько размерностей. История почти та же, что и в попытках Калуцы с электромагнетизмом: Заморозили геометрию дополнительных измерений, убедились, что их геометрия никогда не изменяется во времени и в пространстве, и сделали их размер слишком маленьким, чтобы их разглядеть. Когда все это сделано корректно, необходимые уравнения (известные как уравнения Янга-Миллса) возникают из применения уравнений ОТО к высшим измерениям.

Тот факт, что уравнения Янга-Миллса были скрыты в высокоразмерных обобщениях ОТО, не был открыт до 1950х, но их значение не было осознано до 1970х, когда мы, наконец, поняли, что эти уравнения описывают слабые и сильные ядерные силы. Когда люди, наконец, установили эту взаимосвязь, было несколько попыток пересмотреть идеи Калуцы-Кляйна, но они не зашли очень далеко. К тому моменту мы узнали, что в природе отсутствует определенная симметрия – такая как равноправие между правым и левым. А именно, все нейтрино являются тем, что называется левоспиральными (это означает, что направление их спина всегда противоположно направлению их линейного импульса). Это означает, что если вы посмотрите на мир через зеркало, вы увидите неправильный мир – в котором нейтрино являются

правоспиральными. Так что мир, который виден в зеркале, не является возможным миром. Но эту асимметрию оказалось тяжело объяснить в мире, описываемом теорией Калуцы-Кляйна.

Кроме сказанного, теории с высшими размерностями продолжали не делать никаких новых предсказаний. Условия, которые мы налагали на дополнительные размерности, чтобы получить ожидаемую физику, были семенами разрушения теорий. В самом деле, чем больше размерностей вы включали, тем большую цену вы платили за замораживание их геометрии. Чем больше измерений, тем больше степеней свободы – и тем больше свободы соответствует геометрии дополнительных измерений, чтобы убежать от жесткой геометрии, необходимой для воспроизведения сил, известных в нашем трехмерном мире. Проблема нестабильности становится все хуже и хуже.

Более того, как только имеется более одного скрытого измерения, имеется много различных способов их скручивания. Вместо того, чтобы быть только одним – окружностью – возникает бесконечное число способов, которыми скрытые размерности могут быть скручены, так что возникает бесконечное число возможных версий теории. Как природа выбирает среди них?

Снова и снова в ранних попытках объединения физики через дополнительные размерности мы сталкивались с той же самой историей. Имеется несколько решений, которые приводят к наблюдаемому нами миру, но они являются нестабильными островами в безбрежном ландшафте возможных решений, оставшаяся часть которого совсем непохожа на наш мир. И раз уж были наложены условия, чтобы удалить лишнее, там нет «дымящегося пистолета» – явной улики – нет следствий от унификации, которые еще не наблюдались, но могли бы наблюдаться, если экспериментаторы поискали бы их. Так что тут нечего праздновать, но есть очень много чего прятать.

Но здесь имеется даже еще более фундаментальная проблема, которая проявляется через соотношение единых теорий с квантовой теорией. Ранние попытки что-то сделать в теориях единого поля имели место до того, как квантовая механика была полностью сформулирована, в 1926. Конечно, несколько сторонников квантовой теории интересовались умозрительными построениями по поводу соотношения между дополнительными размерностями и квантовой теорией. Но после 1930 или около того произошел раскол. Большинство физиков игнорировали проблему унификации и, вместо этого, сконцентрировались на приложениях квантовой теории к громадному массиву явлений от свойств материалов до процессов, с помощью которых звезды производят энергию. В то же время, те немногие, кто упорно продолжал работать над едиными теориями, все больше и больше игнорировали квантовую теорию. Эти люди (Эйнштейн среди них) работали так, как если бы Планк, Бор, Гейзенберг и Шредингер никогда не существовали. Они жили после квантовомеханической революции, но пытались работать в умозрительной вселенной, в которой эта революция никогда не происходила. Они казались своим современникам похожими на старомодное сообщество аристократов российской эмиграции, которые в 1920е и 1930е проводили свои тщательно разработанные социальные ритуалы в Париже и Нью-Йорке так, как если бы они вернулись назад в царский Санкт-Петербург.

Конечно, Эйнштейн не был прямо уж неким отвергнутым интеллектуалом-эмигрантом из потерянного мира (даже если он был интеллектуалом-эмигрантом из потерянного мира). Он знал полностью, что он игнорирует квантовую теорию, но он имел причину: он в нее не верил. Даже если он сам поджег квантовую революцию со своим осознанием, что фотон реален, он отвергал следствия. Он надеялся открыть более глубокую теорию квантовых явлений, которая была бы для него приемлема. Это именно туда, как он надеялся, приведет его единая теория поля.

Но она не привела. Мечта Эйнштейна об окончании бегов вокруг квантовой теории потерпела неудачу, и она более или менее умерла вместе с ним. К тому времени немногие почитали его и еще меньше следовали за ним. Физики в то время думали, что у них есть лучшие вещи для занятий, чем игра с фантастическими идеями об унификации. Они были загружены тяжелой работой по каталогизации множества новых частиц, которые были открыты, и по оттачиванию теорий двух вновь открытых фундаментальных сил. То, что некоторые могут рассуждать о том, что мир имеет более чем три пространственных измерения, скрученных в слишком малый размер, чтобы их было видно, казалось им столь же сумасшедшим и непродуктивным,

как изучение НЛО. Не было выводов для эксперимента, не было новых предсказаний, так что в период, когда теория разрабатывалась рука об руку с экспериментом, не было смысла уделять этому внимание.

Но предположим на минуту, что, несмотря на все препятствия, мы все еще серьезно ожидали получить идеи по единому полю. Могли ли эти теории быть сформулированы на языке квантовой теории? Ответ был безоговорочно: нет. Никто не знал в то время, как сделать даже ОТО согласующейся с квантовой теорией. Все ранние попытки сделать это провалились. Когда вы добавляли больше измерений или больше искажений в геометрию, вещи всегда становились хуже, а не лучше. Чем больше число измерений, тем быстрее уравнения вырываются из-под контроля, раскручиваясь в бесконечные величины и противоречия.

Так что, хотя идея унификации с привлечением высших размерностей была очень привлекательной, от нее отказались, и по веской причине. Она не делала проверяемые предсказания. Даже если такая теория производила специальные решения, которые описывали наш мир, имелось, как отмечалось, намного больше решений, которые наш мир не описывали. А те несколько решений, которые описывали, были нестабильными и могли легко эволюционировать в сингулярности или в миры, совершенно не похожие на наш собственный мир. И, наконец, они не могли быть согласованы с квантовой теорией. Запомним эти причины – еще раз, потому, что успех или неудача новейших предложений по унификации, таких как теория струн, зависит от того, смогут ли они решить эти настоящие проблемы.

К тому времени, когда я начал изучение физики в начале 1970х, идея объединения гравитации с другими силами была так же мертва, как и идея непрерывной материи. Это был урок глупости некогда великих мыслителей. Эрнст Мах не верил в атомы, Джеймс Клерк Максвелл верил в эфир, а Альберт Эйнштейн занимался поисками единой теории поля. Жизнь непростая штука.

4. Объединение становится наукой

После того, как идея объединения всех четырех фундаментальных сил через придумывание новых размерностей потерпела крах, большинство физиков-теоретиков отказались от идеи связать гравитацию и другие силы, решение, которое имело смысл, поскольку гравитация значительно слабее, чем остальные три силы. Их внимание вместо этого привлек зоопарк элементарных частиц, который экспериментаторы наоткрывали на своих ускорителях частиц. Они исследовали данные в поисках новых принципов, которые могли бы, по меньшей мере, объединить все различные виды частиц.

Игнорирование гравитации означает шаг назад, к пониманию пространства и времени до ОТО Эйнштейна. Это была рискованная вещь, сделать так на долгом пути, так как это означает работать с идеями, которые уже были смещены. Но это имело и преимущества, так как этот подход привел к величайшему упрощению проблемы. Главный урок ОТО заключался в том, что нет фиксированной геометрии пространства и времени; игнорирование этого означало, что вы можете просто выбрать фон. Это отсылает нас назад к ньютоновской точке зрения, согласно которой частицы и поля населяют фиксированный фон пространства и времени – фон, чьи свойства фиксированы навечно.

Однако, нет необходимости проходить весь обратный путь к Ньютону. Можно работать в рамках описания пространства и времени, данного в СТО Эйнштейна в 1905. В соответствии с ней геометрия пространства и времени является той, которую задал Евклид, и ее изучали многие из нас в начале высшей школы; однако, пространство и время перемешаны, чтобы приспособиться к двум постулатам Эйнштейна, относительности наблюдателей и постоянства скорости света. Теория не может адаптировать гравитацию, но это правильные установки для максвелловской теории электрических и магнитных полей.

Раз квантовая механика была полностью сформулирована, квантовые теоретики обратили свое внимание на объединение электромагнетизма с квантовой теорией. Поскольку основным феноменом электромагнетизма являются поля, унификация, которая была в итоге получена, названа *квантовой теорией поля*. А поскольку СТО Эйнштейна является правильным подходом к электромагнетизму, эти теории можно также рассматривать как унификацию квантовой теории и СТО.

Было очень много стимулирующих проблем, чтобы применить квантовую теорию к частицам, поскольку поле имеет величину в каждой точке пространства. Если мы предположим, что пространство непрерывно, – как это декларируется в СТО, – то получим непрерывную бесконечность переменных. В квантовой теории каждая переменная подвержена принципу неопределенности. Одно следствие заключается в том, что чем более точно вы пытаетесь измерить переменную, тем более неконтролируемо она флуктуирует. Бесконечное число неконтролируемо флуктуирующих переменных может легко отбиться от рук. Когда вы задаете вопросы теории, вы должны быть очень аккуратны, чтобы не получить бесконечные или противоречивые ответы.

Квантовые теоретики уже знали, что для каждой электромагнитной волны имеется квантовая частица, *фотон*. Потребовалось всего несколько лет, чтобы разработать это в деталях, но в результате получилась просто теория свободно двигающихся фотонов; следующий этап заключался в присоединении заряженных частиц, таких как электроны и протоны, и в описании, как они взаимодействуют с фотонами. Целью была полностью последовательная теория квантовой электродинамики или КЭД. Это было намного более заманчивым. Впервые КЭД была прояснена японским физиком Син-Итиро Томонагой во время Второй мировой войны, но новости не достигли остального мира до 1948 или около того. К этому времени КЭД была еще дважды независимо сконструирована молодыми американцами Ричардом Фейнманом и Джулианом Швингером.

Когда КЭД была понята, встала задача распространить квантовую теорию поля на сильные и слабые ядерные силы. Это заняло следующую четверть века, и ключевым моментом стало открытие двух новых принципов: Первый определил, что общего имеют электромагнетизм и эти ядерные взаимодействия. Это было названо *калибровочным принципом* и, как я буду описывать, привело к объединению всех трех сил. Второй принцип объяснил, почему, хотя и объединенные, эти три силы столь различны. Он был назван *спонтанным нарушением симметрии*. Вместе эти два принципа формируют краеугольный камень стандартной модели физики частиц. Их точное применение привело к открытию, что частицы, вроде протона и нейтрона, не являются таки элементарными; вместо этого они построены из кварков.

Протон и нейтрон каждый имеют по три кварка, тогда как другие частицы, названные мезонами, имеют два (более точно, кварк и антикварк). Это открытие было сделано в начале 1960х независимо Мюрреем Гелл-Манном в Калтехе и Джорджем Цвейгом в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Вскоре после этого Джеймс Бьоркен в Стэнфордском линейном ускорительном центре (SLAC) и Ричард Фейнман в Калтехе предложили эксперименты, которые, когда их позднее провели в SLAC, подтвердили, что протон и нейтрон на самом деле состоят из трех кварков каждый.

Открытие кварков было существенным шагом в направлении унификации, поскольку взаимодействие протонов, нейтронов и других частиц было чрезвычайно сложным. Но имелась надежда, что сами силы между кварками могут быть простыми и что наблюдаемые сложности возникают из-за того, что протоны и нейтроны являются составными объектами. Этот вид представлений был уже подтвержден ранее: в то время как силы между молекулами сложны, силы между атомами, которые их составляют, могут быть легко поняты в терминах электромагнетизма. Эта идея заставила теоретиков бросить попытки понять силы между протонами и нейтронами в фундаментальных терминах и, вместо этого, поинтересоваться, как эти силы влияют на кварки. Это редукционизм в действии – старый трюк, при котором законы, управляющие частями, часто проще, чем законы, управляющие целым, – и, в конце концов, он был награжден открытием глубокой общности, которая соединяет две ядерные силы, сильную и слабую, с электромагнетизмом. Все три взаимодействия являются следствиями простого, но мощного калибровочного принципа.

Калибровочный принцип лучше всего понять в терминах того, о чем физики говорят как о *симметрии*. На

простом языке симметрия есть операция, которая не изменяет то, как себя ведет некоторая вещь по отношению к внешнему миру. Например, если вы вращаете мяч, вы не изменяете его, он все еще остается сферой. Так что, когда физики говорят о симметрии, они могут иметь в виду операцию в пространстве, вроде вращения, которая не изменяет результат эксперимента. Но они могут также говорить о другом виде изменения, которое мы проделываем над экспериментом, которое не изменяет его результата. Например, представим, что вы берете две группы котов – скажем, восточных котов и западных котов – и проверяете их способности к подпрыгиванию. Если нет разницы в среднем прыжке, который может сделать кот, тогда мы говорим, что подпрыгивание кота является симметричным относительно операции замены всех ваших восточных котов на западных котов.

Вот другой пример, упрощенный и идеализированный, чтобы сконцентрировать внимание. Рассмотрим эксперимент, в котором пучок протонов ускоряется, а затем направляется на мишень, состоящую из определенного вида ядер. Вы, как экспериментатор, наблюдаете узор, который создают протоны, когда они рассеиваются на ядрах в мишени. Теперь без изменения энергии или мишени вы заменяете протоны на нейтроны. В определенных случаях рисунок рассеяния почти не изменяется. Эксперимент обнаруживает, что вовлеченные в процесс силы действуют одинаково на протоны и нейтроны. Иными словами, акт замены протонов на нейтроны является *симметрией* сил, действующих между ними и ядрами в мишени.

Знание симметрий хорошая вещь, так как они говорят вам кое-что о вовлеченных силах. В первом примере мы узнали, что сила гравитации, действующая на котов, не зависит от их места происхождения; во втором примере мы узнали, что определенные ядерные силы не могут обнаружить отличие между протонами и нейтронами. Иногда все, что мы получаем из симметрии, есть такая частичная информация о силах. Но есть специальные ситуации, в которых симметрии полностью определяют силы. Это оказывается именно так для класса сил, именуемых *калибровочными силами*. Я не хочу докучать вам точными подробностями, как это работает, так как это нам не понадобится.[22] Но факт, что все свойства сил могут быть определены из знания симметрий, является одним из самых важных открытий физики двадцатого столетия. В этой идее смысл калибровочного принципа.[23]

Две вещи о калибровочном принципе нам необходимо знать. Первая, что силы, к которым он приводит, переносятся частицами, названными *калибровочными бозонами*. Вторая вещь, которую нам надо знать, это что электромагнитные, сильные и слабые силы все оказываются силами такого типа. Калибровочный бозон, который соответствует электромагнитной силе, называется фотон. Калибровочный бозон, который соответствует сильному взаимодействию, удерживающему кварки вместе, называется *глюон*. Калибровочные бозоны для слабых сил имеют менее интересное название – они называются просто *слабые бозоны*.

Калибровочный принцип и есть та «красивая математическая идея», отмеченная в главе 3, которая была открыта Германом Вейлем в его неудавшейся попытке по объединению гравитации и электромагнетизма в 1918. Вейль был одним из самых глубоких математиков, когда-либо размышлявших над уравнениями физики, и именно он понял, что структура теории Максвелла полностью объясняется калибровочными силами. В 1950х некоторые люди поинтересовались, а не могут ли и другие теории поля быть сконструированы с использованием калибровочного принципа. Оказалось, что это может быть сделано на основе симметрий, включающих различные виды элементарных частиц. Эти теории теперь называются теориями Янга-Миллса в честь двух их изобретателей.[24] Сначала никто не знал, что делать с этими новыми теориями. Новые силы, которые они описывали, должны были иметь бесконечную область распространения подобно электромагнетизму. Физики знали, что каждая из двух ядерных сил имеет короткую область распространения, так что, казалось, что они не могут быть описаны калибровочной теорией.

Что делает теоретическую физику в той же степени искусством, как и наукой, так это то, что лучшие теоретики имеют интуитивное шестое чувство о том, какие результаты могут быть проигнорированы. Таким образом, в начале 1960х Шелдон Глэшоу, тогда постдок* в Институте Нильса Бора, предположил, что слабая сила на самом деле описывается калибровочной теорией. Он просто постулировал, что некий неизвестный механизм ограничивает область распространения слабой силы. Если эта проблема области

распространения могла бы быть решена, то слабая сила могла бы быть объединена с электромагнетизмом. Но все еще стояла глобальная проблема: как вы могли бы объединить силы, которые проявляются столь различным образом, как электромагнетизм и сильные и слабые ядерные силы?

---

* Постдок – разновидность стажерства, временная исследовательская позиция (от года до нескольких лет), предоставляемая западными институтами для обладателей докторской (PhD) степени. – *(прим. перев.)*

Это пример общей проблемы, которая является напастью при любой попытке унификации. Явления, которые вы надеетесь объединить, различны – в противном случае не было бы ничего удивительного в их объединении. Так что даже если вы открыли некоторое скрытое единство, вам все еще надо понять, почему и как получилось, что они оказались различными.

Как мы говорили раньше, Эйнштейн нашел чудесный путь решения этой проблемы для СТО и ОТО. Он осознал, что кажущаяся разница между явлениями не является внутренней для явлений, а происходит полностью вследствие необходимости описания явлений с точки зрения наблюдателя. Электричество и магнетизм, движение и покой, гравитация и ускорение – все они были объединены Эйнштейном таким способом. Различия, которые наблюдатели ощущают между ними, зависят от обстоятельств, которые отражают только точку зрения наблюдателей.

В 1960х было предложено другое решение для этой общей проблемы: различия между объединяемыми явлениями зависят от обстоятельств, но не только от точки зрения отдельных наблюдателей. Вместо этого физики сделали то, что, на первый взгляд, кажется элементарным наблюдением: Законы могут иметь симметрию, которая не соответствует всем особенностям мира, к которому они применяются.

Позвольте мне сначала проиллюстрировать это с помощью наших социальных законов. Наши законы применяются одинаково ко всем людям. Мы можем расценить это как симметрию законов. Замените одну персону на любую другую, и вы не измените законов, которым они должны подчиняться. Все должны платить налоги, все не должны превышать лимит скорости. Но это равенство или симметрия перед законом не нуждается и не требует того, чтобы наши обстоятельства были одинаковыми. Некоторые из нас богаче других. Не все из нас имеют автомобили, а среди тех, кто имеет, склонности к превышению лимита скорости могут значительно различаться.

Более того, в идеальном обществе мы все стартуем с одинаковых возможностей. К сожалению, на самом деле это не так, но если бы это было так, мы могли бы говорить о симметрии в наших стартовых возможностях. В ходе жизни эта начальная симметрия заканчивалась бы. К моменту достижения двадцатилетия мы имеем очень различающиеся возможности. Некоторые из нас имеют возможность быть концертирующими пианистами, а некоторые олимпийскими атлетами.

Мы можем описать эту дифференциацию, сказав, что начальное равенство нарушено с течением времени. Физики, которые говорят о равенстве как о симметрии, скажут, что симметрия между нами при рождении нарушена посредством ситуаций, с которыми мы сталкиваемся, и посредством выбора, который мы делаем. В некоторых случаях будет тяжело предсказать способ, по которому симметрия будет нарушена. Мы знаем, что она должна нарушиться, но, глядя на полный младенцев детский сад, мы очень затруднимся предсказать, как это произойдет. В подобных случаях физики говорят, что симметрия *спонтанно нарушена*. Под этим мы понимаем, что необходимо, чтобы симметрия нарушилась, но точный способ, по которому она нарушается, в высшей степени зависит от обстоятельств. Спонтанное нарушение симметрии является вторым великим принципом, который лежит в основе стандартной модели физики частиц.

Есть и другой пример из человеческой жизни. Как член профессорско-преподавательского состава я иногда имел возможность прийти на встречу с новыми студентами. Наблюдая за ними на встречах друг с другом, я, случалось, видел, что в последующие годы некоторые становились друзьями, некоторые любовниками, а некоторые даже женились. В тот первый момент, когда они сталкивались друг с другом как чужие люди, в помещении наблюдалось много симметрии, многие возможные связи и дружеские союзы могли бы быть

придуманы в этой группе. Но симметрия с необходимостью должны быть нарушена, так как настоящие человеческие взаимоотношения вырабатываются из намного большего пространства возможных взаимосвязей. Это тоже пример спонтанного нарушения симметрии.

Почти вся структура мира, как социального, так и физического, является следствием требования, что мир в его реальности нарушает симметрии, присутствующие в пространстве возможностей. Важное свойство этого требования заключается во взаимообмене между симметрией и стабильностью. Симметричная ситуация, в которой мы все являемся потенциальными друзьями и романтическими партнерами, нестабильна. В реальности мы должны сделать выбор, и это приводит к большей стабильности. Мы меняем нестабильную свободу потенциальных возможностей на стабильное ощущение реальности.

То же самое верно и в физике. Общим примером из физики является карандаш, балансирующий на своем острие. Это симметричное состояние, в котором, пока он балансирует на своем острие, все направления (падения) столь же хороши, как и любые другие. Но это состояние нестабильно. Когда карандаш падает, что неизбежно должно произойти, он упадет хаотически в том или ином направлении, нарушив симметрию. Но, раз уж он упал, состояние стало стабильным, но больше оно не проявляет симметрии – хотя симметрия все еще здесь, в лежащих в основании законах. Законы описывают только пространство того, что может произойти; реальный мир управляется теми же законами, включающими выбор одной реализации из множества возможностей.

Этот механизм спонтанного нарушения симметрии можно применить к симметриям между частицами в природе. Когда с симметриями происходит то, что из калибровочного принципа возникают силы природы, это приводит к различию в их свойствах. Силы становятся различимыми; они могут иметь различные области распространения и различные величины. Перед нарушением симметрии все четыре фундаментальные силы имели бесконечную область распространения, как у электромагнетизма, но после нарушения симметрии некоторые из них стали конечными, подобно двум ядерным силам. Как отмечалось, это одно из самых важных открытий физики двадцатого века, поскольку вместе с калибровочным принципом оно позволяет нам объединить фундаментальные силы, которые кажутся несоизмеримыми.

Идея объединения спонтанного нарушения симметрии с калибровочным принципом была придумана Франсуа Энглером и Робертом Броутом в Брюсселе в 1962 и, независимо, несколькими месяцами позже Петером Хиггсом из Эдинбургского университета. Ее стоило бы назвать ЭБХ-феноменом, но, к сожалению, обычно ее называют только феноменом Хиггса. (Это один из многочисленных примеров, в которых нечто в науке получает название по последней персоне, которая это нечто открыла, вместо того, чтобы по первой). Эти трое также показали, что имеется частица, чье существование является следствием спонтанного нарушения симметрии. Она называется *Хиггсовым бозоном*.

Несколькими годами позже, в 1967, Стивен Вайнберг и пакистанский физик Абдус Салам независимо открыли, что комбинация калибровочного принципа и спонтанного нарушения симметрии может быть использована для конструирования конкретной теории, которая объединяет электромагнитные и слабые ядерные силы. Теория носит их имя: модель Вайнберга-Салама *электрослабых сил*. Это была определенно унификация со следствиями, которую надо было отпраздновать; она быстро привела к предсказаниям новых явлений, которые были успешно проверены. Она предсказала, например, что должны существовать частицы – аналоги фотону, который переносит электромагнитное взаимодействие, – для передачи слабого ядерного взаимодействия. Таких частиц три с названиями W+, W- и Z. Все три были найдены и проявили предсказанные свойства.

Использование спонтанного нарушения симметрии в фундаментальной теории имело чрезвычайные последствия не только для законов природы, но и для более общего вопроса о том, что из себя представляют законы природы; до этого мы думали, что свойства элементарных частиц определяются непосредственно вечно заданными законами природы. Но в теории со спонтанным нарушением симметрии был введен новый элемент, который заключается в том, что свойства элементарных частиц зависят отчасти от истории и от окружения. Симметрия может нарушиться различными способами в зависимости от условий вроде плотности и температуры. Более общо, свойства элементарных частиц зависят не только от

уравнений теории, но и от того, какое решение этих уравнений имеет отношение к нашей вселенной.

Это сигнализирует об отходе от обычного редукционизма, в соответствии с которым свойства элементарных частиц вечны и устанавливаются абсолютным законом. Это открывает возможность, что многие – или даже все – свойства элементарных частиц зависят от обстоятельств и от того, какое решение законов выбрано в нашем регионе вселенной или в нашу отдельную эру. Они могут отличаться в различных регионах.[25] Они могут даже изменяться во времени.

В спонтанном нарушении симметрии имеется величина, которая сигнализирует, что симметрия нарушена и каким образом. Эта величина обычно является полем, названным полем Хиггса. Модель Вайнберга-Салама требует, чтоб поле Хиггса существовало и чтобы оно проявлялось как новая элементарная частица, именуемая Хиггсовым бозоном, который переносит силы, ассоциирующиеся с полем Хиггса. Из всех предсказаний, требуемых унификацией электромагнитных и слабых сил, только это предсказание еще не было подтверждено на опыте. Одна трудность в том, что теория не позволяет нам точно предсказать массу Хиггсова бозона, она является одной из свободных констант, которые теория требует задать извне. Было много экспериментов, направленных на поиски Хиггсова бозона, но все, что мы знаем, это что, если он существует, его масса должна быть больше, чем примерно 120 масс протона. Одной из главных целей будущих экспериментов на ускорителях является ее поиск.

В начале 1970х калибровочный принцип был применен к сильному ядерному взаимодействию, которое связывает кварки, и было найдено, что калибровочное поле также отвечает и за это. Итоговая теория названа *квантовой хромодинамикой*, или КХД для краткости. (Слово *хромо* от греческого «цвет» указывает на образное обозначение, использованное для указания на факт, что кварки бывают трех версий, которые для красоты названы цветами). КХД тоже выдержала строгий экспериментальный тест. Вместе с моделью Вайнберга-Салама она составляет основу стандартной модели физики элементарных частиц.

Открытие, что все три силы являются выражениями единого объединяющего принципа – калибровочного принципа, – является глубочайшим достижением теоретической физики частиц на сегодняшний момент. Сделавшие это люди являются настоящими героями науки. Стандартная модель является результатом десятилетий тяжелого, часто разочаровывающего экспериментального и теоретического труда сотен людей. Она была завершена в 1973 и поддержана за тридцать лет широким массивом экспериментов. Мы, физики, справедливо гордимся ею.

Но рассмотрим, что произошло дальше. Все три силы теперь понимаются как выражения одного и того же принципа, и было очевидно, что они должны быть объединены. Чтобы объединить все частицы, однако, вам нужно больше симметрии, чем они все содержат. Тогда вы применяете калибровочный принцип, приводящий к трем силам. Чтобы различить все частицы и силы, вы устанавливаете их так, что любая конфигурация системы, в которой реализована симметрия, является нестабильной, тогда как стабильные конфигурации асимметричны. Это нетрудно сделать, поскольку, как я обсуждал, симметричные ситуации часто нестабильны в природе. Таким образом, симметрия, включающая все частицы вместе, будет спонтанно нарушена. Это может быть сделано так, что в итоге три силы окажутся именно с теми свойствами, с которыми они наблюдаются.

Идея великого объединения была не только в том, чтобы свести все силы вместе, но и в том, чтобы придумать симметрию, которая переводит кварки (частицы, управляемые сильным взаимодействием) в лептоны (частицы, управляемые электрослабым взаимодействием), поэтому объединение двух основных видов частиц приводит только к одному виду частиц и к одному калибровочному полю. Простейший кандидат на это великое объединение известен как симметрия *SU(5)*. Название кодирует пять видов частиц, трансформирующихся друг в друга при симметрии: три цветных кварка каждого вида и два лептона (электрон и его нейтрино). *SU(5)* не только объединяет кварки и лептоны, она делает это с беспримерной элегантностью, лаконично объясняя все, что делалось в стандартной модели, и делая необходимым многое из того, что ранее было случайным. *SU(5)* объясняет все предсказания стандартной модели и, даже лучше, делает некоторые новые предсказания.

Одно из этих новых предсказаний заключалось в том, что должны существовать процессы, посредством которых кварки могут видоизмениться в электроны и нейтрино, поскольку в *SU(5)* кварки, электроны и нейтрино являются только различными проявлениями одного и того же основополагающего вида частиц. Как мы видели, когда две вещи объединяются, должны проявиться новые физические процессы, путем которых они могут переходить друг в друга. *SU(5)* на самом деле предсказывает такие процессы, которые сходны с радиоактивным распадом. Это чудесное предсказание, характеризующее великое объединение. Это требуется теорией и характерно только для нее.

Распад кварка на электроны и нейтрино должен был бы иметь наблюдаемые последствия. Протон, содержащий этот кварк, больше не был бы протоном; он распался бы на более простые части. Таким образом, протоны больше не являются стабильными частицами – они подвергаются разновидности радиоактивного распада. Конечно, если бы это происходило очень часто, наш мир распался бы, так как все стабильное в нем состоит из протонов. Так что, если протоны распадаются, темп распада должен быть очень малым. И это именно то, что предсказывает теория: темп менее одного такого распада каждые 10^{33} лет.

Но даже если этот эффект экстремально редок, он в пределах достижимости осуществимого эксперимента, поскольку в мире имеется гигантское количество протонов. Итак, в *SU(5)* мы имели лучший вид унифицирующей теории, в котором были удивительные следствия, которые не противоречили тому, что мы знаем и можем немедленно подтвердить. Мы могли бы компенсировать экстремальную редкость распада протона, построив гигантскую емкость и наполнив ее ультрачистой водой, чтобы был шанс, что где-то в емкости протон распадется не реже раза в год. Вы должны были бы защитить емкость от космических лучей, поскольку эти лучи, постоянно бомбардирующие Землю, могут разорвать протон на части. Затем, поскольку распад протона производит много энергии, все, что вам было бы нужно, это окружить емкость детекторами и ждать. Средства были выделены, и гигантская емкость была построена в шахтах глубоко под землей. Результат с нетерпением ожидался.

После примерно двадцати пяти лет мы все еще ждали. Ни один протон не распался. Мы ждали достаточно долго, чтобы понять, что унификация *SU(5)* не верна. Это прекрасная идея, но, кажется, из тех, что природа не приняла.

Недавно я случайно встретил друга из аспирантуры – Эдварда Фархи, который с тех пор стал директором Центра теоретической физики в Массачусетском технологическом институте. Мы не имели серьезного общения, вероятно, двадцать лет, но мы нашли, что имеем очень много, о чем поговорить. Мы оба наблюдали за тем, что происходило и что не происходило в физике частиц за двадцать пять лет с тех пор, как мы получили наши степени доктора философии. Эдди сделал важный вклад в теорию частиц, но сейчас работает, большей частью, в быстро развивающейся области квантовых компьютеров. Я спросил его, почему, и он сказал, что в сфере квантовых компьютеров, в отличие от физики частиц, мы знаем, каковы принципы, мы можем выработать следствия, и мы можем провести эксперименты, чтобы проверить сделанные нами предсказания. Он и я искали место приложения сил, когда физика частиц начала переставать быть быстро развивающейся областью, что в свое время повлекло нас в аспирантуру. Мы оба пришли к заключению, что поворотным пунктом было открытие того, что протон не распадается за то время, которое предсказано теорией великого объединения *SU(5)*. "Я готов был побиться об заклад на свою жизнь – ладно, не на свою жизнь, но ты знаешь, что я имею в виду, – что протон должен распадаться," – так он это определил, – «*SU(5)* была такой красивой теорией, все встраивалось в нее совершенным образом, – и она оказалась не верной.»

В самом деле, было тяжело переоценить последствия отрицательного результата. *SU(5)* была самым элегантным из вообразимых способов объединения кварков с лептонами, и она приводила к кодификации свойств стандартной модели в простых терминах. Даже после двадцати пяти лет я все еще нахожу ошеломляющим тот факт, что *SU(5)* не работает.

Не то, чтобы это было тяжело для нас, теоретиков, выбраться из текущей неудачи. Вы можете просто добавить в теорию несколько симметрий и частиц, так что там будет больше констант для подгонки. С

большим количеством подгоночных констант вы можете устроить распад протона столь редким, как вам нравится. Так что вы можете легко защитить теорию от экспериментальной неудачи.

Как упоминалось, ущерб уже нанесен. Мы потеряли шанс наблюдения поразительного и однозначного предсказания глубокой новой идеи. В его простейшей версии великое объединение сделало предсказание относительно темпа распада протона. Если великое объединение верно, но более сложно, так что темп распада протона может быть подогнан ко всему, что нам нравится, теория теряет способность к объяснению. Надежда была в том, что объединение сможет оценить величины констант в стандартной модели. Вместо этого великое объединение, если оно имеет силу, вводит новые константы, которые должны быть заданы руками, чтобы скрыть эффекты, которые не согласуются с экспериментом.

Мы видим здесь иллюстрацию общего урока, описанного ранее. Когда вы объединяете различные частицы и силы, вы рискуете внести в мир нестабильности. Это происходит потому, что появляются новые взаимодействия, через которые объединенные частицы могут преобразовываться друг в друга. Нет способа избежать этих нестабильностей; на самом деле, такие процессы сами по себе являются доказательством объединения. Единственный вопрос в том, работаем ли мы с хорошим случаем – подобным стандартной модели, которая делает недвусмысленные предсказания, которые быстро подтверждаются, – или с неподходящим случаем, в котором мы играем с теорией, чтобы скрыть последствия. Такова дилемма современных теорий унификации.

5. От объединения к суперобъединению

Крах первой из теорий великого объединения вызвал кризис в науке, который продолжается до сегодняшнего дня. До 1970х теория и эксперимент разрабатывались рука об руку. Новые идеи проверялись в течение нескольких лет, самое большее десяти. Каждое десятилетие с 1780х по 1970е демонстрировало значительный прогресс в нашем понимании основ физики, и в каждом продвижении вперед теорию поддерживал эксперимент, но с конца 1970х не было ни одного настоящего прорыва в нашем понимании физики элементарных частиц.

Когда рушится большая идея, есть два пути реакции на это. Вы можете понизить планку и отступить к небольшому приросту науки, медленно исследуя границы знания с помощью новых теоретических и экспериментальных методик. Многие физики, работавшие в области частиц, сделали это. В результате стандартная модель очень хорошо проверена экспериментально. Самая большая побочная находка последней четверти века заключается в том, что нейтрино имеют массу, но это открытие может быть согласовано минимальной подгонкой стандартной модели. Кроме этого не было сделано никаких модификаций.

Другой путь реагирования на крах большой идеи заключается в попытке сделать даже больше нее. Сначала несколько теоретиков, затем растущее их число выбрали эту дорогу. Это дорога, которую нам стоило бы оставить в покое; до сегодняшнего дня ни одна из новых идей не получила никакой экспериментальной поддержки.

Из больших идей, которые были придуманы и изучены за эти годы, одна, которая получила наибольшее внимание, называется *суперсимметрией*. Если она верна, она станет столь же фундаментальной частью нашего понимания природы, как теория относительности и калибровочный принцип.

Мы видели, что большие унификации находят скрытые взаимосвязи между аспектами природы, которые раньше мыслились различными. Пространство и время исходно были очень разными концепциями; СТО

их объединила. Геометрия и гравитация были некогда совсем не связанными; ОТО их объедиила. Но все еще есть два больших класса вещей, которые составляют населяемый нами мир: частицы (кварки, электроны и т. д.), которые составляют вещество, и силы (или поля), с помощью которых они взаимодействуют.

Калибровочный принцип объединил три силы. Но мы все еще остаемся с этими двумя различными сущностями: частицами и полями. Их унификация была целью двух предыдущих попыток, теории эфира и единой теории поля, и каждая провалилась. Суперсимметрия является третьей попыткой.

Квантовая теория говорит, что частицы являются волнами и волны являются частицами, но это на самом деле не приводит к объединению частиц с силами. Причина в том, что в квантовой теории остаются два широких класса элементарных объектов. Они называются *фермионами* и *бозонами*.

Все частицы, которые составляют вещество, такие как электроны, протоны и нейтрино, являются фермионами. Все силы состоят из бозонов. Фотон является бозоном, и такими же являются частицы, вроде W и Z частиц, связанные с другими калибровочными полями. Частица Хиггса также бозон. Суперсимметрия предлагает способ объединить эти два больших класса частиц, бозоны и фермионы. И она делает это очень творческим способом, предположив, что каждая известная частица имеет до этого не виданного *суперпартнера*.

Грубо говоря, суперсимметрия является процессом, при котором вы можете заменить один из фермионов на бозон в некотором эксперименте без изменения вероятностей различных возможных исходов. Это сложно сделать, поскольку фермионы и бозоны имеют очень разные свойства. Фермионы подчиняются *принципу запрета (или исключения)*, найденному Вольфгангом Паули в 1925, который говорит, что два фермиона не могут занимать одно и то же квантовое состояние. По этой причине все электроны в атоме не сидят на низшей орбитали; раз уж один электрон находится на отдельной орбите или в квантовом состоянии, вы не можете поместить другой электрон в то же состояние. Принцип запрета Паули объясняет многие свойства атомов и материалов. Бозоны, однако, ведут себя противоположным образом: Они любят делить состояния. Когда вы помещаете фотон в определенное квантовое состояние, вы делаете более вероятным, что другой фотон найдет свой путь в это же самое состояние. Это влечение объясняет многие свойства полей, подобных электромагнитному полю.

Так что сначала кажется сумасшедшим, что вы могли бы придумать теорию, в которой вы могли бы заменить бозон на фермион и все еще получить стабильный мир. Но правдоподобно это или нет, четверо русских нашли, что они могли бы записать последовательную теорию именно с такой симметрией, которую мы сегодня называем суперсимметрией. Это были Евгений Лихтман и Юрий Гольфанд в 1971 и Владимир Акулов и Дмитрий Волков в 1972.

В те дни ученые на Западе были явно лишены контактов с учеными в Советском Союзе. Советским ученым только изредка позволялось путешествовать, и им чинились препятствия в публикациях в несоветских журналах. Большинство западных физиков не читали переводы советских журналов, так что в Советском Союзе было несколько открытий, которые не были приняты во внимание на Западе. Открытие суперсимметрии было одним из них.

Так суперсимметричные теории были придуманы еще дважды. В 1973 некоторые их разновидности были открыты двумя европейскими физиками, Джулиусом Вессом и Бруно Зумино. В отличие от русских, их труд был замечен и идеи были быстро развиты. Одна из их новых теорий заключалась в расширении электромагнетизма, в котором фотон объединялся с частицей, весьма похожей на нейтрино. Другое открытие суперсимметрии связано с теорией струн, и мы рассмотрим его детально позже.

Может ли суперсимметрия быть верной? Нет в своей исходной форме, которая постулировала, что для каждого фермиона имеется бозон с той же самой массой и зарядом. Это означает, что должет быть бозон с той же самой массой и зарядом, что и у электрона. Эта частица, существуй она, должна была бы называться *сэлектроном* или суперэлектроном. Но, если бы она существовала, мы должны были бы уже

видеть ее на ускорителях.

Эта проблема, однако, может быть урегулирована через применение идеи спонтанного нарушения симметрии к суперсимметрии. Результат простой. Сэлектрон приобретает большую массу, так что он становится намного тяжелее электрона. Подгоняя свободные константы теории – которых оказывается имеется много – вы можете сделать сэлектрон столь тяжелым, как вам нравится. Но имеется верхний предел того, насколько массивную частицу может произвести любой данный ускоритель частиц. Таким образом, вы можете объяснить, почему сэлектрон еще не был виден ни на одном из существующих ускорителей частиц.

Заметим, что эта история имеет сходные повороты с другими, которые мы описывали. Кто-то постулирует новую унификацию. Имеются большие следствия для эксперимента. К сожалению, эксперимент не соответствует. Тогда ученые усложняют теорию способом, который привлекает несколько подгоночныех констант. Наконец, они подгоняют эти константы, чтобы скрыть ошибочное предсказанное явление, таким образом объясняя, почему унификация, если она верна, не видна ни в одном из наблюдений. Но такое маневрирование делает теорию трудной для фальсификации, поскольку вы всегда можете немедленно объяснить любой отрицательный результат подгонкой констант.

История суперсимметрии является одной из тех, в который с самого начала игра заключалась в сокрытии последствий унификации. Это не означает, что суперсимметрия не имеет силу, но она должна объяснить, почему даже после трех десятилетий интенсивного развития все еще нет недвусмысленных проверяемых предсказаний.

Я могу только представить, как себя чувствуют Весс, Зумино и Акулов (только один из их русских коллег все еще жив). Они могли сделать самое важное открытие своего поколения. Или они могли просто придумать теоретическую игрушку, которая не имеет ничего общего с природой. До сих пор нет подтверждения ни одного из вариантов. В последние тридцать лет первая вещь, которая делалась на любом новом ускорителе элементарных частиц, как только он запускался, был поиск частиц, которые предсказывает суперсимметрия. Ничего не было найдено. Константы просто подгонялись вверх, и мы опять ждем следующего эксперимента.

Сегодня это означает обращение взоров на Большой Адронный Коллайдер (или LHC – Large Hadron Collider), в настоящее время конструирующийся в ЦЕРНе. Если все пойдет по плану, он должен заработать в 2007*. Среди физиков, занимающихся частицами, есть великая надежда, что эта машина освободит нас от кризиса. Прежде всего, мы ожидаем LHC, чтобы увидеть частицу Хиггса, массивный бозон, отвечающий за перенос Хиггсова поля. Если этого не произойдет, мы будем в больших неприятностях.

---

* В июне 2007 было официально объявлено о переносе запуска LHC на май 2008. – *(прим. перев.)*

Но идея с самой высокой ставкой есть суперсимметрия. Если LHC увидит суперсимметрию, определенно будет Нобелевская премия для ее изобретателей. Если нет, это будут дурацкие колпаки – не для тех, для кого нет позора в изобретении нового вида теории, но для всех тех из моего поколения, кто потратил свои карьеры на распространение этой теории.

Так много надежд возлагается на LHC потому, что то, что он найдет, скажет нам очень много об одной из пяти ключевых проблем, отмеченных в главе 1: как объяснить величины свободных констант в стандартной модели. Чтобы увидеть, почему, нам необходимо понять одно очень замечательное свойство этих величин, заключающееся в том, что они или очень велики или очень малы. Один из примеров – дико отличающиеся величины сил. Электрическое отталкивание между двумя протонами сильнее их гравитационного притяжения на гигантский фактор, около 10^{38}. Имеется также гигантская разница в массах частиц. Например, масса электрона составляет 1/1800 массы протона. А бозон Хиггса, если он существует, имеет массу, по меньшей мере, в 120 раз большую, чем протон.

Способом обобщения данных является замечание, что физика частиц кажется скорее иерархической, чем демократической. Четыре силы разбросаны в широком диапазоне величин, формируя иерархию от сильных к слабым, если двигаться от ядерной физики к гравитации. Различные массы в физике также формируют иерархию. На вершине находится планковская масса, которая соответствует энергии (напомним, что масса и энергия на самом деле одна и та же вещь), при которой станут важными эффекты квантовой гравитации. Возможно, в тысячу раз легче планковской массы находится масштаб, при котором должна проявится разница между электромагнетизмом и ядерными силами. Эксперименты проводимые при этой энергии, которая называется *масштабом унификации*, будут видеть не три силы, а одну единственную силу. Снижаясь дальше по иерархии до 10^{-16} от планковского месштаба, получаем ТэВ (тера электрон-вольт или 10^{12} электрон-вольт), энергию, при которой имеет место объединение слабых и электромагнитных сил. Этот масштаб называется *масштабом слабого взаимодействия*. Это область, в которой мы должны видеть Хиггсов бозон, а также здесь многие теоретики ожидают увидеть суперсимметрию. LHC строится, чтобы исследовать физику именно на этом масштабе. Масса протона составляет 1/1000 от этой величины, снижение еще на фактор 1/1000 приводит нас к электрону, и, возможно, 1/1 000 000 от этой величины составляет масса нейтрино. Далее по пути вниз на дно находится вакуумная энергия, которая существует в пространстве даже в отсутствие вещества.

Все это составляет красивую, но загадочную картину. Почему природа столь иерархична? Почему разница между величинами сильнейшей и слабейшей из сил столь гигантская? Почему массы протонов и электронов так незначительны по сравнению с планковской массой или масштабом унификации? Эта проблема в целом обозначается как *проблема иерархии*, и мы надеемся, что LHC прольет свет на нее.

Так что мы точно должны увидеть на LHC? Это был центральный вопрос физики частиц со времени триумфа стандартной модели в начале 1970х. Теоретики имели тридцать лет для подготовки ко дню запуска LHC в эксплуатацию. Мы готовы? Со смущением констатируем, что ответ: нет.

Если бы мы были готовы, мы имели бы неотразимые теоретические предсказания того, что увидит LHC, и мы просто ожидали бы подтверждения. Фиксируя все, что мы знаем о физике частиц, стоит удивиться, что тысячи умнейших людей планеты оказались не способны достичь неоспоримых предположений о том, что обнаружит следующий великий экспериментальный скачок. Но, за исключением надежды, что будет обнаружен Хиггсов бозон, мы не имеем ясных недвусмысленных предсказаний.

Вы можете подумать, что в отсутствие консенсуса могли бы быть, по меньшей мере, несколько соперничающих теорий, делающих такие предсказания. Но реальность намного неприятнее. Мы имеем на столе несколько различных предложений по унификации. Все они потенциально до некоторой степени работают, но ни одна не проявляется как однозначно более простая или более способная к предсказаниям, чем другие. Ни одна еще не имеет печати истины. Чтобы объяснить, почему тридцати лет не хватило, чтобы привести наш теоретический дом в порядок, мы должны более близко взглянуть на проблему иерархии. Почему имеется такой гигантский разброс масс и других констант?

Проблема иерархии содержит два вызова. Первый заключается в определении, что устанавливает константы, что делает их отношения большими. Второй заключается в том, как они установились на данном уровне. Эта стабильность удивительна, поскольку квантовая механика имеет странную тенденцию сталкивать все массы вместе в направлении величины планковской массы. Нам здесь не нужно анализировать, почему так, но результат таков, как если бы некоторые действия, которые мы используем, чтобы уменьшить константы, были связаны резиновыми лентами, которые неизменно натягиваются.

Как следствие, мы можем удержать большие отношения констант в стандартной модели, но чтобы сделать это, нам надо точно подобрать константы. Чем больше отношение реальных масс мы хотим иметь, тем более точно мы, теоретики, должны приспособить внутренние массы (массы в отсутствие квантовых эффектов), чтобы удержать их в отдалении. Причем, насколько точно, зависит от видов задействованных частиц.

Массы калибровочных бозонов не являются большой проблемой; симметрия, по существу, предотвращает

выталкивание их масс (к большим значениям) резиновыми лентами. И как до, так и после принятия во внимание квантовых эффектов фотон, который является бозоном-переносчиком электромагнитного поля, совсем не имеет массы, так что тут тоже нет проблемы. Также ведут себя составляющие вещества, кварки и лептоны; части их масс, которые происходят от квантовых эффектов, пропорциональны их внутренним массам. Если внутренние массы малы, таковы будут и полные массы. Мы говорим, следовательно, что массы калибровочных бозонов и фермионов *защищены*.

Проблема связана с незащищенными частицами, под которыми в стандартной модели понимается Хиггс и только Хиггс. Оказывается, что, чтобы защитить массу Хиггса от выталкивания к планковской массе, мы должны настроить константы стандартной модели до ошеломляющей точности: до тридцать второго знака после запятой. Любая неточность в любом месте из этих тридцати двух десятичных разрядов – и Хиггсов бозон окажется намного тяжелее, чем он, как предсказывалось, должен быть.

Задача тогда заключается в укрощении Хиггса – чтобы привести его вниз к тому масштабу, как сказано. Многие из значительных идей, которые физики, занимающиеся частицами, рассматривали с 1975 года, имели целью именно это.

Одним из способов укрощения Хиггса является предположение, что он не является полностью элементарной частицей. Если он сделан из частиц, которые ведут себя менее диким образом, проблема могла бы быть устранена. Имеется несколько предположений, из чего мог бы быть сделан Хиггсов бозон. Самая элегантная и редкая теория предлагает гипотезу, что Хиггсовы бозоны являются связанными состояниями очень тяжелых кварков или лептонов. Не добавляется совсем ничего нового – ни новых частиц, ни новых параметров для настройки. Теория только постулирует, что тяжелые частицы связываются вместе новым способом. Единственной проблемой в этом виде теорий является то, что тяжело проделать вычисления, требуемые для ее проверки и выработки следствий. Это находилось за пределами возможностей нашей технологии, когда это было впервые предложено в 1960, и все еще остается за их пределами.

Следующая из самых элегантных гипотез заключается в том, что Хиггсов бозон сделан из нового вида кварков, отличающихся от тех, из которых построены протоны и нейтроны. Поскольку это вначале казалось «техническим» решением проблемы, это было названо *техникварками*. Они связаны вместе новым видом силы, сходной с сильным ядерным взаимодействием, которое связывает кварки в протоны и нейтроны. Поскольку силу в квантовой хромодинамике временами называют «цветом», новая сила названа, конечно, *техниколор*.

Эта идея больше поддается вычислениям. Проблема в том, что тяжело согласовать эту теорию со всеми аспектами наблюдений. Но это не невозможно, поскольку тут имеется много вариантов. Большинство были исключены, несколько остались жизнеспособными.

Третья альтернатива заключается в том, чтобы сделать *все* элементарные частицы составными частицами. Эта идея была рассмотрена несколькими людьми в конце 1970х. Была попытка рассмотреть естественную вещь: Если протоны и нейтроны сделаны из кварков, то почему надо на этом останавливаться? Возможно, существует дальнейший уровень структуры, на котором кварки, электроны, нейтрино и, возможно, даже Хиггсовы и калибровочные бозоны окажутся сделанными из частиц, которые еще более фундаментальны и которые мы можем назвать *преонами*. Такие теории работают очень элегантно. Эксперимент к тому времени дал доказательство существования сорока пяти фундаментальных фермионов, и все они могли бы собираться воедино из комбинаций только двух видов преонов.

Более того, эти преонные модели объясняют некоторые свойства, наблюдаемые в природе, но не объясняемые в стандартной модели. Например, кварки имеют два свойства, – цвет и заряд, – которые кажутся не связанными друг с другом. Каждый вид кварка проявляется в трех версиях, именуемых цветами. Эта тройственность обеспечивает симметрию, необходимую для калибровочной теории. Но почему три цвета? Почему не два или четыре? Каждый кварк имеет также электрический заряд, и они складываются из единиц, которые равны 1/3 или 2/3 от заряда электрона. Число 3 возникает в каждом

случае, что наводит на мысль,что эти два свойства, цвет и заряд, могли бы иметь общее происхождение. Ни стандартная модель, ни, насколько мне известно, теория струн не обращаются к этому совпадению, но оно очень просто объясняется преонной моделью.

К сожалению, были важные вопросы, на которые преонная теория была не в состоянии ответить. Приходилось иметь дело с неизвестными силами, которые должны были связывать преоны вместе в частицы, которые мы наблюдаем. Задача была удержать наблюдаемые частицы такими малыми, какие они есть, одновременно сохраняя их очень легкими. Поскольку преонные теоретики не смогли решить эту проблему, преонные модели к 1980 скончались. Недавно я разговаривал с хорошо известными физиками, которые получили свои степени доктора философии после этого и никогда даже не слышали о преонах.

Итак, обобщая, попытки сделать Хиггсов бозон составным были не убедительными. Со временем стало казаться, что мы, теоретики, растратили возможности выбора. Если Хиггсов бозон является элементарным, то как его свойства могут быть обузданы?

Одним из способов ограничить свободу частицы является связывание ее поведения с другой частицей, чье поведение заключено в некие пределы. Мы знаем, что калибровочные бозоны и фермионы защищены; их массы не ведут себя диким образом. Может ли здесь быть симметрия, которая связывает Хиггс с частицами, чья масса защищена? Если бы мы смогли сделать это, возможно, Хиггс был бы наконец укрощен. Единственная симметрия, известная, чтобы сделать это, есть суперсимметрия, поскольку суперсимметрия связывает фермионы с бозонами, поэтому в суперсимметричной теории будет фермион, являющийся партнером Хиггса, названный *хиггсино*. (В теории суперсимметрии есть соглашение, что названия суперпартнеров фермионов начинаются на «с», вроде сэлектрона, тогда как названия суперпартнеров бозонов оканчиваются на «ино».) Поскольку это фермион, масса хиггсино будет защищена от квантового прироста массы. Хорошо, суперсимметрия говорит нам, что два партнера имеют одинаковую массу. Тогда масса Хиггса должна быть тоже защищена.

Эта идея может хорошо объяснить, почему масса Хиггса мала по сравнению с планковской массой. Как указано, эта идея определенно элегантна – но на практике она усложняется.

Прежде всего, теория не может быть частично суперсимметричной. Если одна частица имеет суперпартнера, все остальные тоже должны. Таким образом, каждый кварк выступает с бозонным партнером, *скварком*. Фотон имеет партнером новый фермион, *фотино*. Взаимодействия тогда настраиваются так, что если все кварки заменить на скварки в то же самое время, как мы заменим все фотоны на фотино, вероятности различных возможных исходов опытов останутся неизменными.

Конечно, это простейшая возможность. Не могут ли две частицы, которые мы уже наблюдаем, быть партнерами? Возможно, фотон и нейтрино идут вместе? Или Хиггс и электрон? Открытие новых взаимосвязей среди уже известных частиц определенно было бы элегантным – и убедительным.

К сожалению, никто когда-либо успешно не постулировал суперсимметрию, содержащуюся между двумя известными частицами. Вместо этого, во всех суперсимметричных теориях число частиц, по меньшей мере, удваивается. Новый суперпартнер просто постулируется идущим вместе с каждой известной частицей. Там есть не только скварки, слептоны и фотино, там также имеются снейтрино как партнеры нейтрино, хиггсино как партнеры Хиггсов, гравитино, идущие с гравитонами. Каждой твари по паре, обычный Ноев ковчег частиц. Раньше или позже, запутавшись в паутине новых «сназваний» и «обозначино», вы начинаете чувствовать себя подобно клоуну «Сбозо». Или «клоунино» Бозо.* Или «скем» бы то ни было еще.

---

* Клоун Бозо – главный персонаж одноименного детского телевизионного шоу, поставленного студией «Ларри Хармон Пикчерс» (США). – *(прим. перев.)*

К лучшему или к худшему, но природа не похожа на это. Как отмечалось, ни один эксперимент когда-либо

не давал доказательств существования сэлектрона. До настоящего времени не показывались ни скварки, ни слептоны, ни снейтрино. Мир содержит гигантское количество фотонов (более миллиарда на каждый протон), но никто никогда не видел даже одного фотино.

Выходом из этого является постулат, что суперсимметрия спонтанно нарушена. Мы обсуждали в главе 4, как происходит спонтанное нарушение симметрии. Спонтанное нарушение может быть распространено и на суперсимметрию. Можно сконструировать теории, которые описывают миры, в которых силы суперсимметричны, но в которых их законы так искусно подогнаны, что низшее энергетическое состояние, – что означает, состояние, в котором симметрия пропадает, – не является суперсимметричным. В результате суперсимметричные партнеры частиц не обязаны иметь те же самые массы, которые имеют частицы.

Это делает теорию уродливой. Чтобы нарушить симметрию, мы добавляем еще больше частиц, аналогичных Хиггсу. Они также требуют суперпартнеров. Возникает еще больше свободных констант, которых можно подогнать, чтобы описать их свойства. Тогда все константы теории подгоняются так, что все эти новые частицы слишком тяжелы, чтобы быть наблюдаемыми.

Применяя это к стандартной модели физики элементарных частиц без дополнительных предположений, получаем новое хитроумное изобретение, именуемое *минимальной суперсимметричной стандартной моделью*, или МССМ. Как отмечалось в главе 1, оригинальная стандартная модель имеет около 20 свободных констант, которые мы подгоняем руками, чтобы получить предсказания, которые согласуются с экспериментом. МССМ добавляет еще 105 свободных констант. Теоретик свободен подогнать их всех, чтобы обеспечить согласие теории с экспериментом. Если эта теория верна, Бог является технологическим дегенератом. Он из тех парней или девушек, кому нравятся музыкальные системы, в которых так много исполнителей, как это возможно, или парусные шлюпки с 16 различными линями, чтобы регулировать форму каждого паруса.

Конечно, природа может быть похожа на это. Теория имеет потенциал, чтобы разрешить проблему точной настройки. Так что, что вы получаете, увеличив число настроек с 20 до 125, так это то, что ни одна из новых настроек не должна быть столь же точно подогнана, как старые настройки. С таким большим количеством настроек для подгонки теория все еще затруднительна для подтверждения или опровержения экспериментаторами.

Имеется много установок для настроек, для которых суперсимметрия нарушается и каждая частица имеет массу, отличную от массы ее суперпартнера. Чтобы скрыть отсутствие большей половины частиц, мы приспосабливаем настройки таким образом, чтобы все отсутствующие частицы в конечном счете оказались с намного большими массами, чем те, которые мы видим. Вам следует проделать это правильно, ибо если теория предсказывает, что скварки легче кварков, мы будем в неприятностях. Но не надо беспокоиться. Тут, оказывается, есть множество различных способов подгонки настроек, чтобы обеспечить, что все частицы, которых мы не видим, настолько тяжелы, что они к настоящему моменту не видимы.

Если тонкая настройка объяснена, тогда теория должна давать объяснение, почему Хиггсов бозон имеет большую массу, которую, мы думаем, он имеет. Как отмечалось, нет точных предсказаний для массы Хиггса даже в стандартной модели, но она должна быть больше, чем примерно 120 масс протона. Чтобы предсказать это, суперсимметричная теория должны быть так настроена, что на этом масштабе суперсимметрия восстанавливается. Это означает, что отсутствующие суперпартнеры должны иметь массы примерно в этом масштабе, а если так, LHC должен их увидеть.

Многие теоретики ожидают, что это именно то, что LHC увидит – множество новых частиц, которые могут быть интерпретированы как недостающие суперпартнеры. Если LHC это сделает, это, определенно, будет триумфом последних тридцати лет теоретической физики. Однако, я напоминаю вам, что тут нет ясных предсказаний. Даже если МССМ верна, имеется множество других путей настройки ее 125 параметров, чтобы согласовать ее с тем, что в настоящее время известно. Это приводит, по меньшей мере, к дюжине сильно различающихся сценариев, которые делают совершенно разные предсказания о том, что точно увидит LHC.

Но это заботы будущего. Предположим, что LHC произвел новые частицы. Установив, что теория суперсимметрии выступает во множестве различных сценариев, получаем, что даже если суперсимметрия не верна, возможно, что она все еще может быть подстроена, чтобы соответствовать первым наблюдениям LHC. Чтобы подтвердить суперсимметрию, требуется намного больше. Мы откроем множество новых частиц и объясним их. И они могут не все быть суперпартнерами частиц, о которых нам известно. Новые частицы могут быть суперпартнерами еще и других, все еще не видимых новых частиц.

Единственный безупречный путь доказать правильность суперсимметрии будет в демонстрации, что там на самом деле есть симметрия – что означает, что вероятности различных возможных результатов экспериментов не меняются (или меняются определенным, очень ограниченным образом), когда мы заменяем частицу на ее суперпартнера. Но это нечто, что будет нелегко выполнить на LHC, по крайней мере, в начале. Так что даже в лучшем случае пройдет еще весьма много лет, прежде чем мы узнаем, является ли суперсимметрия правильным объяснением для проблемы тонкой настройки.

Между тем, очень многие теоретики кажутся уверенными в суперсимметрии. И тут есть несколько хороших причин думать, что она является усовершенствованием старых идей по унификации. Во-первых, Хиггсов бозон, если он не точечный, не должен быть очень большим. Это благоприятствует суперсимметрии, хотя исключается некоторыми (если не всеми) теориями техниколора. Имеется также аргумент, который вытекает из идеи великого объединения. Как мы обсуждали ранее, эксперименты, проводимые на (энергетическом) масштабе унификации, не должны показать различие между электромагнитными и ядерными силами. Стандартная модель предсказывает этот вид объединяющего масштаба, но требует небольших подгонок. Суперсимметричная версия задает унификацию более непосредственно.

Суперсимметрия, определенно, является очень убедительной теоретической идеей. Идея унификации сил и вещества предлагает разрешение глубочайшей дуальности в фундаментальной физике. Не удивительно, что так много теоретиков не могут себе представить, что мир не суперсимметричен.

В то же время, некоторые физики озабочены, что суперсимметрия, если она есть, должна была бы уже быть видна в эксперименте. Вот достаточно типичная выдержка из введения к недавней статье: "Другая проблема возникает из того факта, что LEP II (большой электронно-позитронный ускоритель, также в ЦЕРНе) не открыл суперчастиц или Хиггсова бозона."[26] Пол Фрэмптон, известный теоретик из Университета Северной Каролины, недавно написал мне:

"Одно общее наблюдение, которое я сделал за последние десять лет или больше, заключается в том, что большинство исследователей (имеется несколько исключений), работающие над феноменологией нарушения суперсимметрии на масштабе ТэВ, думают что вероятность того, что суперсимметрия на масштабе ТэВ будет обнаружена в эксперименте, намного меньше 50 процентов, оценка 5 процентов является вполне типичной."[27]

Мое собственное предположение о том, что заслуживает внимания, заключается в том (по меньшей мере, в изучавшейся до настоящего времени форме), что суперсимметрия не объяснит наблюдения на LHC. В любом случае суперсимметрия разрешима экспериментом, и, каковы бы ни были наши эстетические предпочтения, мы все будем заинтригованы получением ответа на вопрос, является ли она правильной картиной природы или нет.

Но даже если суперсимметрия будет обнаружена, она сама по себе не будет решением ни одной из пяти больших проблем, которые я перечислил в главе 1. Константы стандартной модели не будут объяснены, поскольку МССМ имеет намного больше свободных констант. Возможные выборы квантовой теории гравитации не будут сокращены, поскольку все ведущие теории совместимы с мирами, являющимися суперсимметричными. Может быть, что темная материя состоит из суперпартнеров, но нам потребуется подтвердить это непосредственно.

Причина этой большой недостаточности в том, что, хотя суперсимметричные теории имеют намного

больше симметрии, они не проще. Фактически, они намного более сложны, чем теории с меньшей симметрией. Они не уменьшают количество свободных констант – они его решительно увеличивают. И они не способны объединить никакие две вещи, о которых мы уже знаем. Суперсимметрия была бы абсолютно убедительна, – как убедительно максвелловское объединение электричества и магнетизма, – если бы она открыла глубокую общность между двумя известными вещами. Скажем, если фотон и электрон оказались бы суперпартнерами или даже нейтрино и Хиггс, это было бы фантастикой.

Но это не то, что делает любая из суперсимметричных теорий. Вместо этого они постулируют целый новый набор частиц и делают каждую частицу симметричной либо с известной частицей, либо с другой неизвестной частицей. Этот вид теоретического достижения далеко не слишком прост. Придумать целый новый мир неизвестного, а затем сделать теорию с многими параметрами – параметрами, которые могут быть подогнаны, чтобы скрыть всю новую материю, – это не очень впечатляет, даже если технически побуждает справиться с задачей. Это вид теоретизирования, который не может потерпеть неудачу, поскольку любое расхождение с существующими данными можно устранить тонкой настройкой некоторых констант. Он может рухнуть только тогда, когда столкнется с экспериментом.

Конечно, ничто из этого не означает, что суперсимметрия не реальна. Она может существовать, и, если это так, есть шанс, что она будет открыта в следующие несколько лет на LHC. Но факт, что суперсимметрия не делает всего того, чего мы ожидали, наводит на мысль, что ее сторонники высиживают выход из положения на ветке далеко от прочного ствола эмпирической науки. Возможно, что стоит поискать место для сверления там, где, как говорил Эйнштейн, дерево более тонкое.

6. Квантовая гравитация: развилка на дороге

В то время, как большинство физиков игнорировали гравитацию, несколько отважных личностей в 1930х начали думать о примирении ее с быстро развивающейся квантовой механикой. В течение более полстолетия в области квантовой гравитации работало не более горстки первопроходцев и несколько человек уделяли ей некоторое внимание. Но проблема квантовой гравитации не могла быть проигнорирована навсегда. Из пяти вопросов, которые я описывал в первой главе, это первый, который не мог быть отпущен нерешенным. В отличие от остальных, поиски решения этого вопроса нужно рассматривать не менее, чем поиски языка, на котором записаны законы природы. Пытаться решить любую из оставшихся проблем, не решив эту, все равно, что пытаться обсуждать условия контракта в стране, где нет закона.

Поиск квантовой гравитации является правильным поиском. Пионеры этого дела были разведчиками в новом ландшафте идей и возможных миров. Теперь этим занимаются многие из нас, и некоторая часть ландшафта хорошо картографирована. Некоторые тропинки были исследованы, но привели только к тупикам. И хотя некоторые еще освещаются, а на нескольких даже стало тесно, мы до сих пор не можем сказать, что проблема решена.

Большая часть этой книги была написана в 2005, в столетнюю годовщину первого великого достижения Эйнштейна. Год был заполнен конференциями и событиями, отмечающими юбилей. Это был столь же хороший повод привлечения внимания к физике, как и любой другой, но это было не без иронии. Некоторые из открытий Эйнштейна были столь радикальны, что даже сегодня они недостаточно оценены большинством физиков-теоретиков, но ведущим среди них является достигнутое им понимание пространства и времени в ОТО.

Главный урок ОТО в том, что геометрия пространства не фиксирована. Она динамически эволюционирует,

изменяясь во времени, когда материя движется туда и сюда. Имеются даже волны – гравитационные волны, – которые путешествуют через геометрию пространства. До Эйнштейна законы евклидовой геометрии, которые мы изучали в школе, рассматривались как вечные законы: всегда было и всегда будет верным, что углы треугольника складываются к 180 градусам. Но в ОТО углы треугольника могут складываться к чему угодно, поскольку геометрия пространства может искривляться.

Это не означает, что имеется некоторая другая фиксированная геометрия, которая характеризует пространство, – что пространство подобно сфере или седловой поверхности вместо плоскости. Суть в том, что геометрия может быть совершенно любой, поскольку она изменяется во времени, реагируя на материю и силы. Вместо закона, который устанавливает, какова геометрия, имеется закон, который устанавливает, как геометрия изменяется, – точно так же, как ньютоновские законы говорят нам не о том, где находятся объекты, а о том, как они двигаются, определяя, как силы влияют на их движение.

До Эйнштейна геометрия мыслилась как часть законов. Эйнштейн обнаружил, что геометрия пространства эволюционирует во времени в соответствии с другими, более глубокими законами.

Важно полностью осознать этот момент. *Геометрия пространства не является частью законов природы*. Следовательно, в этих законах нет ничего, что устанавливает, какой является геометрия пространства. Таким образом, прежде, чем решать уравнения ОТО Эйнштейна, вы не имеете никакой идеи о том, какова геометрия пространства. Вы найдете ее только после того, как решите эти уравнения.

Это означает, что законы природы должны быть выражены в форме, которая не предполагает, что пространство имеет любую фиксированную геометрию. В этом суть эйнштейновского урока. Мы оформили это в принцип, который описали ранее: *независимость от фона*. Принцип устанавливает, что законы природы могут быть полностью определены без любого предварительного предположения о геометрии пространства. В старой картине, где геометрия была фиксирована, она должна была мыслиться как часть фона, неизменной сцены, на которой разворачивается спектакль природы. Сказать, что законы физики не зависят от фона, означает, что геометрия пространства не фиксирована, а эволюционирует. Пространство и время появляются из законов, вместо того, чтобы обеспечивать арену, на которой происходят вещи.

Другой аспект независимости от фона состоит в том, что нет предпочтительного времени. ОТО описывает историю мира более фундаментально, в терминах событий и соотношений между ними. Главные соотношения должны действовать вместе с причинностью; одно событие может быть в цепочке причин, приводя к другому событию. С этой точки зрения пространство является вторичной концепцией. Концепция пространства, фактически, полностью зависит от понятия времени. Задавая часы, мы можем думать обо всех событиях, которые одновременны с отбиванием часами полдня. Они и составляют пространство.

Важный аспект ОТО в том, что там нет предпочтительного способа отсчета времени. Любой сорт часов подойдет, пока они показывают причины, предшествующие следствиям. Но, поскольку определение пространства зависит от времени, имеется так же много различных определений пространства, как и времени. Только что выше я говорил о геометрии пространства, эволюционирующей во времени. Это сохраняется не для отдельного универсального понятия времени, а для любого возможного понятия времени. То, как все это работает, является частью замысловатой красоты эйнштейновской ОТО. Для наших целей достаточно будет помнить, что уравнения этой теории говорят нам, как геометрия пространства эволюционирует во времени не только для одного, но для любого возможного определения времени.

На самом деле, независимость от фона означает даже больше, чем это. Имеются другие аспекты природы, которые фиксируются в обычных выражениях законов физики. Но, возможно, их не должно быть. Например, факт, что имеется только три измерения пространства, является частью фона. Может ли существовать более глубокая теория, в которой мы не делаем заранее никаких предположений о числе пространственных измерений? В такой теории три измерения могут возникать как решение некоторого

динамического закона. Вероятно, в такой теории число пространственных измерений может даже меняться во времени. Если бы мы смогли придумать такую теорию, она смогла бы объяснить нам, почему наша вселенная имеет три измерения. Это бы составило прогресс: объяснить в конце концов нечто, что ранее просто предполагалось.

Так что идея независимости от фона в ее наиболее широком выражении является частью мудрости действия физики: Делать более лучшие теории, в которых вещи, которые сегодня предполагаются, объясняются путем позволения таким вещам эволюционировать, подчиняясь некоторому новому закону. Эйнштейновская ОТО сделала для геометрии пространства в точности это.

Ключевой вопрос квантовой теории гравитации тогда следующий: можем ли мы распространить на квантовую теорию принцип, что пространство не имеет фиксированной геометрии? То есть, можем ли мы сделать квантовую теорию не зависящей от фона, по меньшей мере, по отношению к геометрии пространства? Если мы сможем это сделать, мы автоматически свяжем гравитацию и квантовую теорию, поскольку гравитация уже понимается как аспект динамической геометрии пространства-времени.

Тогда имеется два подхода к соединению гравитации и квантовой теории: тот, который достигает фоновой независимости, и тот, который нет. Поле квантовой гравитации разделилось вдоль этих линий давным давно, в 1930х, хотя большинство изучаемых сегодня подходов является фоново-независимыми. Единственное исключение составляет подход, который исследуют большинство сегодняшних физиков, – теория струн.

Как случилось, что высочайшее достижение самого знаменитого ученого двадцатого столетия было фактически проигнорировано большинством тех, кто шумно следовал по его стопам, есть одна из наиболее странных историй в истории науки. Эта история должна быть тут обсуждена, поскольку она является центральной для вопросов, которые я поднял во Введении. В самом деле, вы можете удивиться: если ОТО Эйнштейна так хорошо принята, почему кто-то пытается развивать новую теорию, которая не берет на борт ее центральный принцип? Ответ является целой историей, и, подобно многим историям в этой книге, она начинается с Эйнштейна.

Уже в 1916 Эйнштейн осознал, что имеются гравитационные волны и что они переносят энергию. Он тотчас же заметил, что согласование с атомной физикой потребует, чтобы энергия, переносимая гравитационными волнами, была описана в терминах квантовой теории. В самой первой статье, когда-либо написанной по гравитационным волнам, Эйнштейн сказал, что "кажется, что квантовая теория должна будет модифицировать не только теорию электромагнетизма Максвелла, но и новую теорию гравитации."[28]

Тем не менее, несмотря на то, что Эйнштейн был первым, кто поставил проблему квантовой гравитации, его глубокое прозрение было проигнорировано большинством из тех, кто с тех пор над ней работал. Как такое могло быть?

Тут *есть* причина, и она в том, что никто в то время не знал, как подойти к непосредственному применению развивающейся тогда квантовой теории к ОТО. Вместо этого, прогресс оказался возможным по непрямому маршруту. Те, кто хотел применить квантовую механику к ОТО, встали перед двумя проблемами. Исключая независимость от фона, они споткнулись о факт, что ОТО является полевой теорией. Имеется бесконечное число возможностей для геометрии пространства, а поэтому и бесконечное число переменных.

Как я описывал в главе 4, как только квантовая механика была полностью сформулирована, физики начали применять ее к полевым теориям, таким как теория электромагнитного поля. Они и формулировались в фиксированном пространственно-временном фоне, так что проблема независимости от фона не возникала. Но они дали физикам опыт оперирования с проблемой бесконечного количества переменных.

Первым большим успехом квантовой теории поля была квантовая электродинамика (КЭД), объединение максвелловской теории электромагнетизма с квантовой теорией. Примечательно, что в их первой статье по

КЭД в 1929 Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули, два основателя квантовой механики, уже продумывали расширение своей работы на квантовую гравитацию. Они, очевидно, чувствовали, что это будет не слишком сложно, поскольку они написали, что "квантование гравитационного поля, которое кажется необходимым по физическим причинам, может быть проведено без каких-либо новых сложностей посредством формализма, полностью аналогичного использованному здесь."[29]

Более чем семьдесят пять лет спустя, мы можем только удивиться степени, до которой эти два выдающихся человека недооценили сложность проблемы. Но о чем они могли бы думать? Ну, я знаю, поскольку с той поры многие люди имели те же мысли, и тупик, в который они приводят, был тщательно исследован.

Гейзенберг и Паули думали, что когда гравитационные волны очень слабые, их можно рассматривать как мелкую рябь, возмущающую фиксированную геометрию. Если вы бросите камень в пруд тихим утром, это вызовет мельчайшую рябь, которая едва нарушит плоскую поверхность воды, так что легко подумать, что рябь движется по фиксированому фону, заданному этой поверхностью. Но когда водяные волны сильные и бурные, как вблизи пляжа в штормовой день, не имеет смысла рассматривать их как возмущение чего-то фиксированного.

ОТО предсказывает, что во вселенной имеются регионы, где геометрия пространства-времени эволюционирует бурно, подобно волнам, обрушивающимся на пляж. Но Гейзенберг и Паули думали, что будет проще сначала изучить случай, в котором гравитационные волны экстремально слабые и могут рассматриваться как мелкая рябь на фиксированном фоне. Это позволило им применить те же самые методы, которые они разработали, чтобы изучить квантовые электромагнитные поля, двигающиеся на фиксированном фоне пространства-времени. И, фактически, было нетрудно применить квантовую механику к свободно двигающимся очень слабым гравитационным волнам. Результат был такой, что каждая гравитационная волна может быть рассмотрена квантовомеханически как частица, именуемая гравитоном, – аналог фотона, который является квантом электромагнитного поля. Но на следующем этапе они столкнулись с большой проблемой, поскольку гравитационные волны взаимодействуют друг с другом. Они взаимодействуют со всем, что имеет энергию, и они сами переносят энергию. Эта проблема не возникает с электромагнитными волнами, поскольку, хотя фотоны взаимодействуют с электрическими и магнитными зарядами, сами они не заряжены, так что они проходят прямо друг сквозь друга. Эту важную разницу между двумя видами волн Гейзенберг и Паули упустили.

Последовательное описание самодействия гравитонов оказалось крепким орешком. Теперь мы понимаем, что неудача в решении этой проблемы является следствием того, что не принимался всерьез эйнштейновский принцип независимости от фона. Раз уж гравитационные волны взаимодействуют друг с другом, они не могут больше рассматриваться как двигающиеся на фиксированном фоне. Они *изменяют* фон, когда путешествуют по нему.

Несколько людей поняли это уже в 1930е. Вероятно, первой диссертацией на степень доктора философии из когда-либо написанных по проблеме квантовой гравитации была диссертация русского физика Матвея Петровича Бронштейна в 1935. Те, кто вспоминал его, думали о нем как об одном из двух самых выдающихся советских физиков его поколения. Он писал в 1936 в статье, что «устранение ... логических противоречий требует ... отказа от обычных представлений о пространстве и времени и замены их какими-то гораздо более глубокими и лишенными наглядности понятиями.» Затем он сослался на немецкую поговорку: "Пусть сомневающийся платит *талер*."[30] Взгляды Бронштейна поддержал молодой выдающийся французский физик Жак Соломон.

К настоящему времени почти любой, кто серьезно думал о квантовой гравитации, согласен с Бронштейном, но на это потребовалось семьдесят лет. Одна из причин в том, что даже такие блестящие умы как Бронштейн и Соломон не смогли уберечься от безумия своего времени. Годом позже после написания Бронштейном статьи, которую я только что процитировал, он был арестован НКВД, а затем казнен расстрельной командой 18 февраля 1938. Соломон стал членом французского Сопротивления и был убит немцами 23 мая 1942. Их идеи были потеряны для истории. Я работал над проблемой квантовой гравитации всю мою жизнь, но я изучил эти идеи только тогда, когда заканчивал эту книгу.

Работа Бронштейна была забыта, и большинство физиков вернулись к изучению квантовой теории поля. Как я описывал в главе 4, потребовалось время до конца 1940х, чтобы КЭД была разработана. Этот успех затем побудил нескольких людей еще раз поднять проблему объединения гравитации с квантовой теорией. Сразу же возникли два противоположных лагеря. Один из них следовал Бронштейну, принимая всерьез фоновую независимость ОТО. Другой игнорировал независимость от фона и следовал маршруту Гейзенберга и Паули в их попытках применить квантовую теорию к гравитационным волнам, рассматривая их движущимися на фиксированном фоне.

Поскольку независимость от фона является одним из принципов ОТО, кажется осмысленным включить ее в попытки объединить эту теорию с квантовой теорией. Но, как оказалось, вещи не так просты. Некоторые люди – подобные британскому физику П.А.М. Дираку и немцу Петеру Бергманну, который начинал свою карьеру в качестве ассистента Эйнштейна в Принстоне, – попытались сконструировать фоново-независимую теорию квантовой гравитации. Они нашли ее трудной задачей. Такие попытки не приносили плодов вплоть до середины 1980х, но с тех пор достигнут большой прогресс в понимании квантовой гравитации с фоново-независимой точки зрения. Большинство теоретиков по квантовой гравитации сегодня работают в одном из нескольких независимых от фона подходов. Мы вернемся к ним в книге позже, ибо они составляют наиболее важные альтернативы теории струн.

Но ни один из этих многообещающих знаков не был очевиден, когда люди стартовали вдоль дороги квантовой гравитации в 1950х. Ограниченный прогресс, достигнутый с использованием независимых от фона методов, выглядел ничтожным по сравнению с великими шагами, которые были сделаны в КЭД. Так что до конца 1980х большинство людей выбрали другой маршрут, который заключался в попытках применить методы КЭД к ОТО. Это, наверное, можно было понять. После формулирования КЭД люди узнали много о фоново-зависимых квантовых теориях, но ни один не знал хоть что-нибудь о том, на что может быть похожа фоново-независимая квантовая теория, если она вообще существует.

Поскольку это был маршрут, который привел к теории струн, стоит проследовать вдоль него. Поскольку работы из 1930х были забыты, их стоило открыть заново. Теория гравитонов была выработана повторно в диссертации на доктора философии Брюсом ДеВиттом, который был студентом Джулиана Швингера в Гарварде в конце 1940х. Благодаря этому и множеству его последующих открытий мы относимся к ДеВитту, как к одному из основателей теории квантовой гравитации.

Но, как отмечалось, теории гравитона было недостаточно. Теория гравитона прекрасна, пока гравитоны просто двигаются через пространство, но если это все, что они делают, нет гравитации и, определенно, нет динамической и искривленной геометрии. Так что это была не унификация ОТО или гравитации с квантовой теорией, а просто унификация слабых гравитационных волн с квантовой теорией. Проблемы с теорией гравитонов снова всплыли в начале 1950х, как только люди снова начали изучать, как они могут взаимодействовать друг с другом. С тех пор и до начала 1980х было потрачено много трудов на эту проблему самодействия, чтобы удержать ее от несовместимости с принципами квантовой теории. Ни один из этих трудов не достиг успеха.

Может быть, полезно было бы остановиться и подумать о том, что это означает в человеческих выражениях. Мы говорим о тридцати годах непрерывной тяжелой работы, содержащей много сложных вычислений. Представьте, что вы платите подоходный налог каждый день все дни в течение недели и все еще не получили расчеты, чтобы непротиворечиво согласовать сумму. Где-то вы сделали ошибку, но вы не можете найти, где. Теперь представьте, что месяц прошел таким образом. Сможете вы растянуть его до года? Теперь представьте двадцать лет. Теперь представьте, что имеется пара дюжин людей во всем мире, проводящих время подобно вам. Некоторые друзья, некоторые конкуренты. Все они имеют свои собственные схемы того, как делать их работу. Каждая схема до настоящего времени приводила к неудаче, но если вы попытаетесь слегка изменить подход или объединить два подхода, возможно, вы достигнете успеха. Один раз или дважды в год вы приезжаете на международную конференцию, где вы можете представить свою новую схему другим фанатикам. Такой была область квантовой гравитации до 1984.

Ричард Фейнман был одним из первых, кто атаковал указанную проблему гравитона. А почему нет? Он

сделал такую хорошую работу в КЭД, почему он не должен применить те же методы к квантовой гравитации? Так в начале 1960х он провел несколько месяцев вне физики частиц, чтобы посмотреть, не сможет ли он проквантовать гравитацию. Чтобы дать вам представление о том, что затем вынес на берег прилив квантовой гравитации, приведем письмо Фейнмана, которое он написал своей жене в 1962 о собрании в Варшаве, где он представил свою работу:

"Я не получил ничего от этой встречи. Я ничему не научился. Поскольку тут нет экспериментов, эта область не относится к активным, так что немногие из лучших людей трудятся в ней. В результате имеются толпы присосавшихся здесь ... и это не есть хорошо для моего кровяного давления. Напомни мне больше не ходить ни на какие гравитационные конференции."[31]

Тем не менее, он сделал хороший прогресс и весьма прояснил техническую проблему, связанную с вероятностями, которые представляют собой числа между 0 и 1. Обо всем, что определенно происходит, говорят как об имеющем вероятность 1, так что вероятность того, что *что-нибудь вообще* произойдет, равна 1. До того, как Фейнман сделал свою работу, никто не мог сделать вероятности того, что различные вещи произойдут в квантовой гравитации, сходящимися к 1. На самом деле, Фейнман сделал вероятности сходящимися только на первом уровне приближения; несколькими годами позже Брюс ДеВитт понял, как сделать, чтобы это работало на всех уровнях. Годом или около того позже то же самое поняли двое русских, Людвиг Дмитриевич Фаддеев и Виктор Николаевич Попов. Они не могли знать работу ДеВитта, поскольку журнал послал его статью экспертам для отзыва, и рецензентам потребовалось больше года, чтобы внимательно изучить ее. Так кусочек за кусочком люди решали некоторые проблемы, – но, даже если вероятности могут быть сделаны сходящимися к 1, теория гравитона как целое никогда не работала.

Имелась некоторая сторона, свидетельствующая в пользу этого труда. Тот же метод мог быть применен к теориям Янга-Миллса, на которых была основана стандартная модель. Так что со временем Стивен Вайнберг и Абдус Салам использовали эти теории, чтобы объединить слабое и электромагнитное взаимодействия, технология использовалась вместо реальных вычислений. Результаты оказались лучше, чем в квантовой гравитации. Как, наконец, доказал в 1971 датский теоретик Герард т'Хоофт, теории Янга-Миллса являются полностью осмысленными как квантовые теории. На самом деле т'Хоофт, как и другие до него, изучал теорию Янга-Миллса отчасти для разогрева перед атакой на проблему квантовой гравитации. Так что тридцать лет работ над квантовой гравитацией не были полностью растраченными усилиями; по меньшей мере, это позволило нам сделать осмысленную физику частиц.

Но осталась неупокоенной сама квантовая гравитация. Люди использовали все сорта методов аппроксимации. Поскольку стандартная модель физики частиц была сделана осмысленной, для доказательства ее различных свойств было разработано много методов. Один за одним, каждый из них был применен к проблеме квантовой гравитации. Каждый потерпел неудачу. Не имеет значения, как вы организовали квантовую теорию гравитационных волн, как только вы принимаете за факт, что они взаимодействуют друг с другом, поднимают свою голову бесконечные величины. Не имеет значения, как вы обходили проблему стороной, бесконечности не укрощаются. Много лет работы, множество статей, множество диссертаций на звание доктора философии, множество презентаций на конференциях. Та же самая ситуация. Итог заключался в том, что к 1974 стало ясно, что зависимый от фона подход к объединению ОТО с квантовой теорией не имеет смысла.

Имелась, однако, одна вещь, которую можно было бы сделать с фоново-зависимыми методами. Вместо того, чтобы пытаться проквантовать гравитацию и, тем самым, понять влияние, которое квантовая теория имеет на гравитационные волны, мы могли бы перевернуть проблему и спросить, какое влияние гравитация может оказывать на квантовые явления. Чтобы сделать это, мы могли бы изучить движение квантовых частиц в пространствах-временах, где гравитация важна, таких как черные дыры или расширяющаяся вселенная. Начавшись в 1960х, в этом направлении был достигнут большой прогресс. Это важное направление, поскольку некоторые открытия приводят к загадкам, на решение которых направлены более поздние подходы, такие как теория струн.

Первым успехом было предсказание, что когда гравитационное поле быстро меняется во времени, должны

рождаться элементарные частицы. Эта идея смогла быть применена к ранней вселенной, когда она быстро расширялась, и привела к предсказаниям, которые используются по сей день в изучении ранней вселенной.

Успех этих вычислений побудил нескольких физиков попытаться сделать нечто более тяжелое, которое заключалось в изучении влияния, которое черная дыра может оказывать на квантовые частицы или поля. Проблема здесь в том, что, хотя черные дыры имеют область, где геометрия очень быстро эволюционирует, эта область скрыта за горизонтом. Горизонт представляет собой саван для света, который стоит на месте. Он отмечает границу региона, в пределах которого весь свет втягивается вовнутрь, по направлению к центру черной дыры. Так что никакой свет не может спастись из-под горизонта. Снаружи черная дыра кажется статической, но именно внутри ее горизонта есть регион, по направлению к которому все втягивается все более и более сильными гравитационными полями. Они заканчиваются в сингулярности, где все бесконечно и время останавливается.

Первый значительный результат соединения квантовой теории с черными дырами был получен в 1973 Якобом Бекенштейном, молодым израильским аспирантом Джона Арчибальда Уилера в Принстоне. Он сделал ошеломляющее открытие, что черные дыры обладают энтропией. Энтропия есть мера беспорядка, и имеется известный закон, именуемый вторым законом термодинамики, устанавливающий, что энтропия замкнутой системы никогда не может уменьшаться. Бекенштейн озаботился вопросом, что если он взял ящик, заполненный горячим газом, – который должен был иметь много энтропии, поскольку движение молекул газа было хаотическим и неупорядоченным, – и сбросил его в черную дыру, энтропия вселенной будет казаться уменьшившейся, поскольку газ никогда не сможет быть восстановленным. Чтобы сохранить второй закон, Бекенштейн предположил, что черная дыра должна сама иметь энтропию, которая должна была повыситься, когда на нее упал ящик газа, так что полная энтропия вселенной никогда не будет уменьшаться. Обработав несколько простых примеров, он смог показать, что энтропия черной дыры должна быть пропорциональна площади окружающего ее горизонта.

Это приводит к загадке. Энтропия есть мера хаотичности, а хаотическое движение есть теплота. Так что же, черная дыра должна иметь также и температуру? Годом позже, в 1974, Стивен Хокинг смог показать, что черная дыра на самом деле должна иметь температуру. Он также смог установить точный коэффициент пропорциональности между площадью горизонта черной дыры и ее энтропией.

Есть и другая сторона предсказанной Хокингом температуры черных дыр, которая будет важна для нас позднее, и которая заключается в том, что температура черной дыры обратно пропорциональна ее массе. Это означает, что черные дыры ведут себя не так, как привычные объекты. Чтобы нагреть большинство вещей, вы должны подвести к ним энергию. *Мы снабжаем огонь топливом*. Черные дыры ведут себя противоположным образом. Если вы вводите в нее энергию или массу, вы делаете черную дыру более массивной – и она охлаждается.[32]

Эта головоломка с тех пор бросает вызов каждой попытке создать квантовую теорию гравитации: как мы можем объяснить температуру и энтропию черных дыр из первых принципов? Бекенштейн и Хокинг трактовали черную дыру как классический фиксированный фон, внутри которого двигались квантовые частицы, и их аргументы базировались на состоятельности известных законов. Они не описывали черную дыру как квантовомеханическую систему, поскольку это может быть сделано только в квантовой теории пространства-времени. Так что для любой квантовой теории гравитации является вызовом необходимость дать более глубокое понимание энтропии Бекенштейна и температуры Хокинга.

В следующем году Хокинг нашел еще одну загадку, прятавшуюся в указанных результатах. Поскольку черная дыра имеет температуру, она будет излучать как горячее тело. Но излучение уносит энергию от черной дыры. После достаточного количества времени вся масса черной дыры перейдет в радиацию. Раз она теряет энергию, черная дыра становится легче. И вследствие только что обсужденного мной свойства, когда она теряет массу, она нагревается, так что излучает быстрее и быстрее. В конце этого процесса черная дыра уменьшится до планковской массы, и потребуется квантовая теория гравитации, чтобы предсказать окончательную судьбу черной дыры.

Но какова бы ни была ее окончательная судьба, возникает загадка относительно судьбы информации. В течение жизни черной дыры она втягивает гигантское количество вещества, переносящего гигантское количество внутренней информации. В конце же все, что останется, это много горячей радиации, – которая, будучи хаотичной, не переносит информации совсем, – и микроскопическая черная дыра. Информация просто исчезла?

Это проблема для квантовой гравитации, поскольку в квантовой механике имеется закон, который говорит, что информация никогда не может быть разрушена. Квантовое описание мира предполагается точным, а отсюда вытекает, что, когда все детали приняты во внимание, информация не может быть потеряна. Хокинг сделал сильное утверждение, что испаряющаяся черная дыра теряет информацию. Это кажется противоречащим квантовой теории, так что он назвал это утверждение *информационным парадоксом черной дыры*. Любая предполагаемая квантовая теория гравитации нуждается в его разрешении.

Эти открытия 1970х были контрольными точками на пути к квантовой теории гравитации. С тех пор мы измеряли успех подхода к квантовой гравитации частично тем, насколько хорошо он отвечает на заданные вопросы по энтропии, температуре и потере информации в черных дырах.

Примерно в это время была, наконец, предложена идея по поводу квантовой гравитации, которая, кажется, работает, по меньшей мере, временами. Она привлекла использование идеи суперсимметрии к гравитации. В результате появилась супергравитация.

Я присутствовал на одной из первых презентаций, когда-либо дававшихся по этой новой теории. Это была конференция в 1975 в Цинциннати по развитию ОТО. Я был все еще студентом в Хэмпширском колледже, но я ходил всюду, надеясь узнать, о чем люди думали. Я помню некоторые прекрасные лекции Роберта Героха из Чикагского университета, который был тогда звездой в области математики бесконечных пространств. Он получил продолжительные овации за одну особенно элегантную демонстрацию. Тогда же было задвинутое в самый конец коференции сообщение молодого постдока по имени Петер ван Ньювенхёйзен. Я вспоминаю, что он изрядно нервничал. Он начал со слов, что он находится здесь, чтобы ввести качественно новую теорию гравитации. Он полностью завладел моим вниманием.

Ван Ньювенхёйзен сказал, что эта новая теория основана на суперсимметрии, тогда новой еще идее по унификации бозонов и фермионов. Частицы, которые мы получаем из квантования гравитационных волн, называются гравитонами, и они являются бозонами. Но для суперсимметричной системы должны быть как бозоны, так и фермионы. ОТО не имеет фермионов, так что новые фермионы должны быть гипотетически суперпартнерами гравитонов. «Сгравитон» не легкое для произношения слово, так что они были названы *гравитино*.

Поскольку гравитино никогда не наблюдались, он сказал, что мы свободны в придумывании законов, которым они удовлетворяют. Для теории, которая симметрична относительно суперсимметрии, силы не должны изменяться, когда гравитино заменяются на гравитоны. Это устанавливает много ограничений на законы, и поиск решений с такими ограничениями требует недель кропотливых вычислений. Две команды исследователей финишировали почти одновременно. Ван Ньювенхёйзен был частью одной из этих команд; другая включала моего будущего консультанта в Гарварде Стэнли Дезера, который работал с одним из открывателей суперсимметрии, Бруно Зумино.

Ван Ньювенхёйзен также говорил о более глубоком способе подумать о теории. Мы начинаем с размышлений о симметриях пространства и времени. Свойства обычного пространства остаются неизменными, если мы вращаемся, поскольку в нем нет предпочтительного направления. Они также остаются неизменными, если мы движемся от места к месту, поскольку геометрия пространства однородна. Таким образом, трансляции и вращения являются симметриями пространства. Вспомним, что в главе 4 я объяснял калибровочный принцип, который устанавливает, что при некоторых обстоятельствах симметрия может диктовать законы, которым удовлетворяют силы. Вы можете применить этот принцип к симметриям пространства и времени. Результатом будет в точности ОТО Эйнштейна. Это не тот путь, каким Эйнштейн нашел свою теорию, но если бы Эйнштейна не существовало, этим путем ОТО могла бы быть найдена.

Ван Ньювенхёйзен объяснил, что суперсимметрия может рассматриваться как углубление симметрий пространства. Это происходит вследствие глубокого и красивого свойства: Если вы заменяете все фермионы на бозоны, а затем заменяете их назад, вы получаете тот же самый мир, который был до замены, но со всеми вещами, сдвинутыми на маленький кусочек в пространстве. Я не могу здесь объяснить, почему это верно, но это говорит нам, что суперсимметрия некоторым образом фундаментально связана с геометрией пространства. Как следствие, если вы примените калибровочный принцип к суперсимметрии, вы получите теорию гравитации – супергравитацию. С этой точки зрения супергравитация значительно глубже ОТО.

Я был новобранцем в этой области, заглянувшим на конференцию. Я не знал здесь никого, так что я не знал, что слушатели ван Ньювенхёйзена думают о том, что он сказал, но я был глубоко впечатлен. Я шел домой, думая, что это была хорошая вещь, что парень был таким взволнованным, ибо, если то, что он сказал, было верным, это должно быть на самом деле важным.

Во время моего первого года аспирантуры я, конечно, разговаривал со Стэнли Дезером, который читал лекции о новой теории супергравитации. Мне было интересно, и я начал думать о ней, но я был озадачен. Что это все означало? О чем это пыталось нам сказать? У меня появился новый друг, однокурсник по имени Мартин Рочек, он также был возбужден. Он быстро созвонился по телефону с Петером ван Ньювенхёйзеном, который пребывал в городе Стони Брук, Нью-Йорк, и начал сотрудничать с ним и его студентами. Стони Брук был недалеко, и Мартин взял меня с собой в один из визитов туда. Ситуация только начала набирать обороты, и он хотел дать мне шанс включиться в нее самого начала.

Это было, как если бы мне предложили одну их первых работ в Майкрософте или Гугле. Рочек, ван Ньювенхёйзен и многие из тех, с кем я встречался благодаря им, сделали блестящие карьеры на суперсимметрии и супергравитации.

Я согласен, что с их точки зрения я действовал как дурак и упустил великолепную возможность.

Для меня (и для других, с кем я согласен) соединение суперсимметрии и теории пространства и времени вызывает большие вопросы. Я изучал ОТО, читая Эйнштейна, и, если я что-нибудь понял, она о том, как эта теория соединяет гравитацию с геометрией пространства и времени. Эта идея проникла у меня до мозга костей. Теперь мне говорят, что другой глубокий аспект природы также объединяется с пространством и временем – факт, что имеются фермионы и бозоны. Мои друзья говорили мне это, и уравнения говорят то же самое. Но ни друзья, ни уравнения не говорят мне, что это означает. У меня отсутствует идея, концепция вещи. Нечто в моем понимании пространства и времени, гравитации и того, что означает быть фермионом или бозоном, должно углубиться в результате этой унификации. Это должна быть не просто математика – сама моя концепция природы должна измениться.

Но она не меняется. Что я нашел, когда я болтался со студентами ван Ньювенхёйзена, это группу умных, технически аккуратных ребят, яростно проводивших вычисления, днем и ночью. То, что они делали, было придумыванием версий супергравитации. Каждая версия имела больше симметрий, чем последняя, унифицируя большее семейство частиц. Они двигались по направлению к окончательной теории, которая объединила бы все частицы и силы с пространством и временем. Эта теория имеет только техническое название, *теория* $N = 8$. N означает число различных способов перепутывания фермионов и бозонов. Первая теория – та, с которой ван Ньювенхёйзен и Дезер меня познакомили, – была простейшая, $N = 1$. Некоторые люди в Европе работали над $N = 2$. Неделю, что я был в Стони Брук, люди там двигались к $N = 4$ на своем пути к $N = 8$.

Они работали день и ночь, откладывая прием пищи и мирясь со скукой работы, с эйфористичной уверенностью, что они находятся рядом с чем-то новым, что изменит мир. Один из них говорил мне, что он работал так быстро, как только мог, поскольку он был уверен, что, когда было произнесено слово о том, насколько легко делать новые теории, область должна была быть заполнена. В самом деле, если я правильно помню, эта группа достигла $N = 4$, но они хотели сорвать куш в $N = 8$.

То, что они делали, не было легким для меня. Вычисления были головоломными, растянутыми и утомительными. Они требовали полной точности. Если где-нибудь терялся множитель 2, недели труда можно было выбрасывать. Каждая строчка расчетов имела дюжины членов. Чтобы уместить строчку расчетов на странице, они прибегали ко все б*о*льшим и б*о*льшим листам бумаги. Скоро они носили с собой гигантские папки, которые используют художники, самые большие, какие они смогли найти. Они покрывали каждый лист мелкими, аккуратными рукописями. Каждая папка представляла месяцы работы. Приходило на ум слово «монашеский». Я был в ужасе. Я выдержал неделю и сбежал.

В течение десятилетий после этого я имел несколько некомфортные отношения с Петером, Мартином и другими. Может быть, я рассматривался как неудачник, ибо убежал, когда они предложили мне благоприятную возможность присоединиться к ним в запуске супергравитации. Если бы я присоединился, я мог бы хорошо устроиться, чтобы стать одним из лидеров струнной теории. Вместо этого я ушел в моем собственном направлении, в итоге помогая в поиске иных подходов к квантовой гравитации. Это даже ухудшило ситуацию: я был не только неудачником, который покинул правоверных, я был неудачником с опасностью стать конкурентом.

Когда я размышляю о научных карьерах людей, которых я знал эти последние тридцать лет, мне кажется все больше и больше, что решения об этих карьерах зависят от характера. Некоторые люди успешно набрасываются на следующее большое дело, отдавая ему все, что имеют, и, таким образом, делают важные вклады в быстро развивающиеся области. Другие просто не имеют темперамента, чтобы сделать это. Некоторым людям нужно все очень тщательно обдумать, а это требует времени, так что они легко сбиваются с толку. Не трудно почувствовать превосходство над такими людьми, пока вы не вспомните, что Эйнштейн был одним из них. По моему опыту, по-настоящему поразительные новые идеи и инновации имеют тенденцию исходить от таких людей. Кроме того, другие – и я принадлежу к этой третьей группе – просто следуют своему собственному пути, и не будут покидать свои области без лучшей причины, чем то, что их задевает, что некоторые люди присоединяются, потому что хорошо чувствуют себя на побеждающей стороне. Так что я больше не беспокоюсь, когда я не согласен с тем, что делают другие люди, поскольку я вижу, что темперамент в большой степени определяет, каким видом науки они будут заниматься. К счастью для науки, необходимы вклады всего диапазона типов участников. Я пришел к мысли, что те, кто делает хорошую науку, делают ее потому, что они выбирают подходящие для себя проблемы.

В любом случае, я покинул группу супергравитации в Стони Бруке, но я не потерял интереса к супергравитации. Напротив, я заинтересован больше, чем когда-либо. Я уверен, что они двигались к чему-то, но выбранная ими дорога была не той, по которой я мог бы следовать. Я понял эйнштейновскую ОТО, что означает, что я знал, как продемонстрировать любое ее существенное свойство на страничке или менее краткой и прозрачной работы. Мне кажется, что если вы поняли теорию, то, чтобы отметить ее основные свойства, не должно требоваться недель расчетов на художественном планшете.

Я объединился с другим аспирантом – моим другом из Хэмпширского колледжа Джоном Деллом, который был в университете Мэриленда. Мы хотели понять более глубоко, как получается, что суперсимметрия является частью геометрии пространства и времени. Он нашел некоторые статьи математика по имени Бертрам Костант по новому виду геометрии, который расширял математику Эйнштейна, используя добавление новых свойств, которые, казалось, вели себя немного похоже на фермионы. Мы записали уравнения ОТО в этом новом контексте, и неожиданно появились некоторые уравнения супергравитации. Мы получили нашу первую научную статью.

Примерно в то же время другие разработали альтернативный подход к геометрии для супергравитации, названный супергеометрией. Я тогда почувствовал (и чувствую сейчас), что их схема более громоздкая, чем наша. Она намного более сложна, но в определенных вещах она работает намного лучше. Это помогло отчасти упростить вычисления, и это определенно было оценено. Так что супергеометрия осталась, а наша работа была забыта. Ни Джон, ни я не беспокоились, поскольку ни один подход не давал нам того, чего мы искали. Несмотря на то, что математика работала, она не приводила ни к какому концептуальному скачку. До настоящего дня я не думаю, что кто-нибудь по-настоящему понимает, что означает супергравитация, чего фундаментального она говорит о природе, – если она верна.

Много лет спустя я думаю, что я, наконец, могу полностью выразить, что в те ранние дни увело меня прочь от супергравитации. Изучая физику через штудирование Эйнштейна в оригинале, я получил представление о способе размышлений, который приводил к революционным новым унификациям физики. Я ожидал, что новая унификация начинается с глубокого принципа, подобного принципу инерции или принципу эквивалентности. Вы должны будете извлечь из него глубокое и удивительное прозрение, что две вещи, которые вы некогда рассматривали как несвязанные, на самом деле по существу являются одной вещью. Энергия есть масса. Движение и покой неразличимы. Ускорение и гравитация одно и то же.

Супергравитация этого не делает. Хотя она на самом деле является предложением новой унификации, она из тех вещей, которые могут быть выражены и зафиксированы только через головоломные скучные расчеты. Я могу работать с математикой, но это не тот путь, по которому я учился делать науку через мои чтения Эйнштейна и других мастеров.

Другой друг, которого я приобрел в это время, был Келлог Штелле, который был на несколько лет старше меня и, как и я, был студентом Стэнли Дезера. Вместе они проанализировали вопрос, будет ли супергравитация вести себя лучше, чем ОТО, при объединении с квантовой теорией. Поскольку еще не было прогресса в независимых от фона методах, они, как и любые другие, использовали зависимый от фона метод, который так прискорбно потерпел неудачу, когда его применили к ОТО. Они быстро смогли увидеть, что он работает лучше, когда его применили к супергравитации. Они отметили первое место, где в квантовой ОТО появляется бесконечность, и нашли вместо нее конечное число.

Это были хорошие новости: суперсимметрия на самом деле улучшила ситуацию! Но эйфория продолжалась не долго. Дезеру и Штелле потребовалось еще только несколько месяцев, чтобы убедиться, что бесконечности в супергравитации возникают в большом количестве в том же направлении. Реальные расчеты были слишком сложны, чтобы их проделать даже после месяцев труда на художественных планшетах, но они нашли способ проверить, будут ли результаты, в конечном счете, конечными или бесконечными, и оказалось, что все ответы, более точные, чем те, которые они смогли получить – и которые оказались конечными, – должны быть бесконечными.

Однако, они еще не протестировали в этом же ключе все другие формы супергравитации. Возможно, одна из них в конечном счете дала бы последовательную квантовую теорию. Шаг за шагом каждая форма была изучена. Каждая из них была на немного более конечной, так что вы смогли уйти дальше в последовательности приближений, пока проверка не закончилась неудачей. Хотя все расчеты были слишком тяжелы для исполнения, казалось, нет оснований для любого другого ответа, кроме того, что бесконечная часть имеет место. Была слабая надежда, что конечная теория, известная $N = 8$, будет отличаться. Она, наконец, была сконструирована героическими усилиями, предпринятыми в Париже. Но она тоже не прошла тест – хотя для нее еще сохраняется некоторая надежда.

Супергравитация была и остается поразительной теорией. Но сама по себе она не достаточна, чтобы решить проблему квантовой гравитации.

Таким образом, к началу 1980х прогресса в создании теории квантовой гравитации не было. Все, что было проверено, вплоть до супергравитации включительно, потерпело неудачу. В то время как калибровочные теории торжествовали, область квантовой гравитации пребывала в застое. Те немногие из нас, кто настаивал на беспокойстве по поводу квантовой гравитации, чувствовали себя подобно выпускнику средней школы, приглашенному понаблюдать, как его сестра выпускается из Гарварда с одновременными степенями по медицине, нейробиологии и истории танца в античной Индии.

Если неудача супергравитации в попытке привести к хорошей теории квантовой гравитации и подавила нас, тем не менее, она также была освобождающей. Все легкие вещи были проверены. За десятилетия мы попытались построить теорию через расширение методов Фейнмана и его друзей. Теперь осталось попытаться сделать только две вещи: Отбросить методы, базирующиеся на фиксированной фоновой геометрии, или отбросить идею, что вещи, двигающиеся через фоновую геометрию, являются частицами. Оба подхода были исследованы, и оба достигли – на первых порах – впечатляющих успехов на дороге к

квантовой гравитации.

Часть II. Краткая история теории струн

7. Подготовка к революции

Временами научный прогресс застревает, когда мы сталкиваемся с проблемой, которая просто не может быть решена на том пути, как мы ее понимаем. Имеется потерянный элемент, связанный с другим видом ухищрений. Не имеет значения, насколько тяжело мы работаем, мы не можем найти ответа, пока кто-то как-то не споткнется об эту потерянную связь.

Вероятно, первое время такое происходило с затмениями. Зафиксировав драму внезапного потемнения неба, первый способ действий ранних астрономов должен был заключаться в поиске пути предсказания таких устрашающих событий. Начиная с нескольких тысяч лет назад, люди начали собирать записи о наблюдениях затмений вместе с движениями Солнца, Луны и планет. Им долго не удавалось понять, что движение Солнца и Луны является периодическим; мы имеем доказательства, что люди знали это еще в наши пещерные времена. Но затмения оказались сложнее.

Для ранних астрономов должно было быть ясно несколько вещей. Затмения происходят, когда Солнце и Луна, которые имеют различные пути по небу, встречаются друг с другом. Их пути перекрещиваются в двух местах. Чтобы произошло затмение, Солнце и Луна должны встретиться в одной из этих двух точек. Так что для предсказания затмений вы должны получить годовой путь Солнца и ежемесячный путь Луны. Просто проследите за путями и отметьте, когда два тела встречаются.

В результате должен быть рисунок, который повторяется с некоторым многократным лунным периодом в двадцать девять с половиной дней.

Но эта простая идея не работает: затмения не попадают в образец, подчиняющийся точно лунному месяцу. Мы можем легко представить поколения теорий, которые проверялись и терпели неудачу в попытке согласовать движения этих двух великих тел. Это должна была быть столь же великая загадка, как и согласование ОТО с квантовой теорией для нас.

Мы не знаем, кто понял, что тут имеется потерянный элемент, но, кто бы это ни был, мы в великом долгу перед ним. Мы можем представить астронома, возможно, в Вавилоне или древнем Египте, внезапно осознавшего, что тут имеется не только два периодических движения, которые надо рассматривать, но три. Возможно, это был мудрец, который после десятилетий изучения чувствовал данные сердцем. Возможно, это был некий молодой бунтарь, которому еще не промыли мозги в направлении мыслей, что вы должны объяснять то, что было увидено, только в терминах наблюдаемых объектов. Как бы то ни было, этот новатор открыл загадочное третье колебание в данных, возникающее не раз в месяц или раз в год, а примерно каждые восемнадцать и две третьих года. Оказалось, что точки, где два пути пересекаются в небе, не фиксированы: они вращаются так, чтобы за указанные восемнадцать с небольшим лет сделать полный цикл.

Открытие этого третьего движения – потерянного элемента – должно было быть одним из самых ранних триумфов абстрактного мышления. Мы видим два объекта, Солнце и Луну. Каждый имеет период, известный с самых ранних времен. Должен состояться акт воображения, чтобы увидеть, что кое-что еще тоже движется: сами пути. Это был глубокий шаг, поскольку он требовал осознания, что за наблюдаемыми вами движениями есть другие движения, чье существование может быть выведено только дедуктивным путем. С тех пор наука только несколько раз прогрессировала путем открытия такого потерянного элемента.

Идея, что элементарные частицы не являются точечными частицами, но колебаниями струн, может служить другим примером таких редких прозрений. Она обеспечивает правдоподобный ответ на некоторые большие проблемы физики. Если это верно, это столь же сильное постижение, как и древнее открытие, что орбиты, по которым путешествуют планеты, сами двигаются.

Изобретение теории струн было названо научной революцией, но она долгое время находилась в становлении. Как и в некоторых политических революциях, – но отличаясь от научных революций прошлого, – революция теории струн была предвосхищена небольшим авангардом, который годы работал в относительной изоляции. Они начали в конце 1960х с анализа, что происходит, когда сильно взаимодействующие частицы – что означает, частицы, сделанные из кварков, такие как протоны и нейтроны, и потому управляемые сильным ядерным взаимодействием, – рассеиваются друг на друге. Это не одна из пяти проблем (см. главу 1), поскольку она в настоящее время понята, по крайней мере, в принципе, в терминах стандартной модели. Но перед тем, как стандартная модель была изобретена, это была центральная проблема для теоретиков, работающих с элементарными частицами.

Кроме протонов и нейтронов имеется великое множество других частиц, сделанных из кварков. Эти другие частицы нестабильны; они производятся на ускорителях путем сталкивания пучка протонов высокой энергии с другими протонами. С 1930х по 1960е мы собрали большое количество данных о различных видах сильно взаимодействующих частиц и о том, что происходит, когда два из них сталкиваются.

В 1968 молодой итальянский физик по имени Габриэле Венециано увидел интересную структуру в данных. Он описал структуру, найдя формулу, которая описывает вероятности рассеяния для двух частиц друг на друге под разными углами. Формула Венециано замечательно соответствовала некоторым данным.[33]

Это вызвало интерес у некоторых из его коллег в Европе и Соединенных Штатах, которые ломали над этим голову. К 1970 некоторые из них смогли интерпретировать это в терминах физической картины. В соответствии с этой картиной частицы не должны рассматриваться как точки, как это всегда рассматривалось ранее. Вместо этого, они были «струноподобными», существуя только в одном измерении, и они могли растягиваться как резиновые ленты. Когда им добавляли энергию, они растягивались; когда они отдавали энергию, они сжимались – также подобно резиновым лентам. И, как и резиновые ленты, они вибрировали.

Формула Венециано, таким образом, открыла дверь в мир, в котором сильно взаимодействующие частицы все были резиновыми лентами, колеблющимися в процессе их движения, сталкивающимися друг с другом и изменяющими энергию. Различные состояния колебаний должны были соответствовать различным видам частиц, производимых в экспериментах по столкновению протонов.

Эта интерпретация формулы Венециано была независимо разработана Йоихиро Намбу в университете Чикаго, Хольгером Нильсеном в Институте Нильса Бора и Леонардом Сасскайндом, в настоящее время работающем в Стэнфордском университете. Каждый думал, что он открыл нечто восхитительное, но их труд вызвал незначительный интерес. Сасскайнд получил от *Physical Review Letters* отказ с замечанием, что это прозрение недостаточно важное для публикации. Как он позднее определил это в интервью: "Бум! Я чувствовал себя так, как будто я получил удар урной по голове, и я был очень, очень глубоко расстроен."[34]

Но несколько людей получили эту информацию и начали работать над той же интерпретацией. Возможно,

более аккуратным было бы назвать получившийся набор идей *теорией резиновых лент*. Но, поскольку это нуждалось в определенном статусе, это стало рождением *теории струн*.

Как теория сильно взаимодействующих частиц теория струн со временем была вытеснена стандартной моделью. Но это не означало, что струнные теоретики ошибались; фактически, сильно взаимодействующие частицы ведут себя часто как струны. Как обсуждалось в главе 4, силы между кварками сейчас описываются более фундаментально калибровочным полем, а основополагающий закон, кажется, дается квантовой хромодинамикой, или КХД, которая является частью стандартной модели. Но при некоторых обстоятельствах результат может быть описан, как если бы между кварками были резиновые ленты. Это происходит потому, что сильное взаимодействие очень не похоже на электромагнитное. Тогда как электромагнитная сила становится слабее с расстоянием, сила между двумя кварками примерно постоянна по величине, когда мы растаскиваем два кварка в стороны, и затем остается постоянной независимо от того, как далеко мы их после этого растащили. В этом причина того, почему мы никогда не видим свободные кварки в экспериментах на ускорителях, а только частицы, сделанные из связанных кварков. Однако, когда кварки очень близки друг к другу, сила между ними ослабевает. Это важно. Струнная картина (или картина резиновых лент) работает только тогда, когда кварки находятся на существенном расстоянии друг от друга.

Первым струнным теоретикам не хватало этого существенного наблюдения. Они определенное время представляли мир, в котором кварки связаны друг с другом резиновыми лентами, – что означает, они пытались сделать теорию струн фундаментальной теорией, а не приближением чего-либо более глубокого. Когда они пытались понять струны *как* струны, возникали проблемы. Проблемы происходили от двух обоснованных требований, которые они постулировали в своей теории: первое, теория струн должна быть совместима с эйнштейновской СТО – то есть, она должна соответствовать относительности движения и постоянству скорости света. Второе, она должна быть совместима с квантовой теорией.

После нескольких лет работы было найдено, что теория струн как фундаментальная теория могла бы быть согласована с СТО и квантовой теорией, только если удовлетворяются некоторые условия. Первое, мир должен иметь двадцать пять пространственных измерений. Второе, должен существовать *тахион* – частица, которая двигается быстрее света. Третье, должны существовать частицы, которые не могут быть сведены к остальным. Мы говорим о них как о *безмассовых частицах*, поскольку масса есть мера энергии частицы, когда частица не движется.

Мир не кажется имеющим двадцать пять измерений пространства. Почему-то теория никак не может от них отказаться, и это одна из великих загадок науки. Что определенно, так это то, что эта уверенность в дополнительных измерениях отпугивала многих людей от серьезного восприятия теории струн до 1984. Очень многое зависело от того, кто был прав – люди, которые отвергали идею дополнительных измерений перед 1984, или те, кто стал уверен в их существовании после этого.

Тахионы также представляли проблему. Их никогда не видели; и даже хуже, их присутствие указывало, что теория была нестабильной и, вполне возможно, непоследовательной. Также имел место факт, что не было сильно взаимодействующих частиц без массы, так что теория потерпела неудачу как теория сильно взаимодействующих частиц.

Была и четвертая проблема. Теория струн содержала частицы, но не все частицы природы. В ней не было фермионов – и, таким образом, не было кварков. Это была огромная проблема для сомнительной теории сильных взаимодействий!

Три из четырех проблем удалось обойти в одно движение. В 1970 теоретик Пьер Рамон нашел способ видоизменить уравнения, описывающие струны, так, что они стали содержать фермионы.[35] Он нашел, что теория будет последовательной, только если она будет иметь новую симметрию. Эта симметрия должна была смешивать старые частицы с новыми – то есть, она должна была смешивать бозоны и фермионы. Так Пьер Рамон открыл суперсимметрию; таким образом, какой бы ни была судьба теории струн, она обеспечила один из маршрутов к открытию суперсимметрии, так что, как инкубатор новых идей, она уже

оказалась плодотворной.

Новая суперсимметричная теория струн также столкнулась с двумя другими проблемами. В ней не было тахионов, так что главное препятствие к том, чтобы воспринимать струны серьезно, было устранено. И в ней не было больше двадцати пяти пространственных измерений, а только девять. Девять не три, но уже ближе. Если добавить время, новая суперсимметричная теория струн (или *теория суперструн*, для краткости) живет в мире с десятью измерениями. Это на единицу меньше, чем число одиннадцать, которое, что удивительно, является максимальным числом измерений, для которых можно записать теорию супергравитации.

Примерно в то же время второй путь, как приспособить фермионы к струнам, был изобретен Андреем Невье и Джоном Шварцем. Подобно версии Рамона, их версия теории не имела тахионов и жила в мире с девятью пространственными измерениями. Невье и Шварц также нашли и смогли понять, как суперструны взаимодействуют друг с другом, и получили формулы, которые согласуются с принципами квантовой механики и СТО.

Итак, оставалась только одна загадка. Как новая суперсимметричная теория может быть теорией сильного взаимодействия, если она содержит безмассовые частицы? Но, фактически, имеются бозоны без массы. Одним из них является фотон. То же самое верно для гравитона, гипотетической частицы, связанной с гравитационными волнами. В 1972 Невье и другой французский ученый, Джоэль Шерк, нашли, что суперструны имеют состояния колебаний, соответствующие калибровочным бозонам, включая фотон. Это был шаг в правильном направлении.[36]

Но еще б*о*льший шаг был сделан двумя годами позднее Шерком и Шварцем. Они нашли, что некоторые из безмассовых частиц, предсказываемых теорией, на самом деле должны быть гравитонами.[37] (Та же самая идея независимо пришла на ум молодому японскому физику Тамиаки Йонейе[38]).

Тот факт, что теория струн содержит калибровочные бозоны и гравитоны, поменял все. Шерк и Шварц немедленно предположили, что теория струн вместо того, чтобы быть теорией сильных взаимодействий, была фундаментальной теорией – теорией, которая объединяет гравитацию с другими силами. Чтобы увидеть, насколько это красиво и просто, заметьте, что фотоноподобные и гравитоноподобные частицы возникают из струн. Струны могут быть как замкнутыми, так и открытыми. Замкнутая струна представляет собой петлю. Открытая струна является линией; у нее есть концы. Безмассовые частицы, которые могут быть фотонами, происходят из колебаний или открытых, или замкнутых струн. Гравитоны происходят только из колебаний замкнутых струн, или петель.

Концы открытых струн могут рассматриваться как заряженные частицы. Например, один конец мог бы быть отрицательно заряженной частицей, такой как электрон; другой тогда может быть античастицей, позитроном, который заряжен положительно. Безмассовые колебания струны между ними описывают фотон, который переносит электрическую силу между частицей и античастицей. Таким образом, вы одновременно получаете частицы и силы из открытых струн, и, если теория выстроена достаточно хитро, она может произвести все частицы и все силы стандартной модели.

Если бы имелись только открытые струны, не было бы гравитона, так что гравитация казалась бы оставшейся за кадром. Но оказывается, что вы *должны* включить замкнутые струны. Причина в том, что в природе происходят столкновения между частицами и античастицами. Они аннигилируют, создавая фотон. С точки зрения струн это описывается так, как будто два конца струны сближаются друг с другом и соединяются. Концы исчезают, и вы остаетесь с замкнутой петлей.

Фактически, аннигиляция частиц-античастиц и замыкание струн являются необходимыми, если теория претендует на согласованность с СТО, что означает, что теория *требует*, чтобы в ней были как открытые, так и замкнутые струны. Но это означает, что она должна включать гравитацию. И различие между гравитацией и другими силами объясняется естественным образом, в терминах различия между открытыми и замкнутыми струнами. Впервые гравитация играла центральную роль в объединении сил.

Это ли не прекрасно? Включение гравитации является столь убедительным, что здравая и разумная персона может легко прийти к уверенности, что теория основывается на нем одном, независимо от того, имеются или нет экспериментальные подтверждения для такого влючения. Особенно, если эта персона в течение лет искала способы объединения всех сил, и все другие пути потерпели неудачу.

Но что привело к этому? Разве имеется закон, который требует, чтобы концы струн встречались и объединялись? Здесь лежит одно из самых красивых свойств теории, разновидность унификации движения и сил.

В большинстве теорий движение частиц и фундаментальные силы являются двумя различными вещами. Закон движения говорит, как частицы двигаются в отсутствие внешних сил. Размышляя логически, тут нет связи между этим законом и законами, которые управляют силами.

В теории струн ситуация радикально отличается. Закон движения определяет законы сил. Это происходит потому, что все силы в теории струн имеют одно и то же простое происхождение – они появляются из рвущихся и замыкающихся струн. Раз уж вы описали, как струны двигаются свободно, все, что вам остается сделать, чтобы добавить силы, это добавить вероятность того, что струна может развалиться на две струны. Обращая процесс во времени, вы можете заново соединить две струны в одну (см. Рис.5). Закон распада и объединения оказывается строго ограниченным, чтобы быть согласованным с СТО и квантовой теорией. Сила и движение унифицируются способом, который был бы невозможен в теории с точечными частицами.

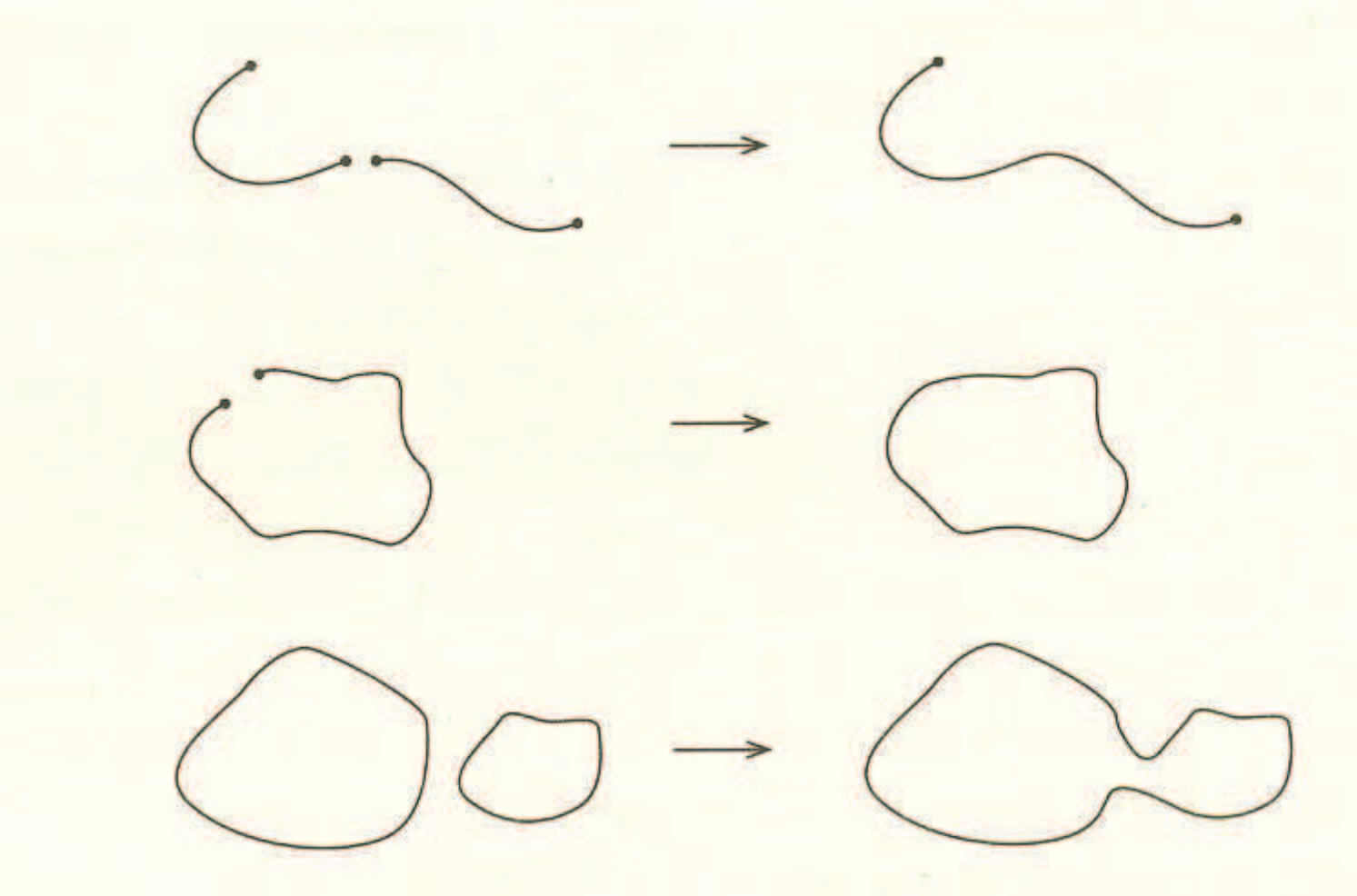

Рисунок 5. Вверху: две открытые струны объединяются своими концами. В середине: два конца открытой струны объединяются, чтобы сделать замкнутую струну. Внизу: две замкнутые струны объединяются, чтобы сделать одну замкнутую струну.

Это объединение сил и движения имеет простое следствие. В теории частиц вы можете свободно добавлять все виды сил, так что нет ничего, что могло бы помешать быстрому увеличению констант, описывающих действие каждой силы. Но в теории струн могут быть только две фундаментальные константы. Одна, называемая *натяжением струны*, описывает, сколько энергии содержится на единицу длины струны. Другая, называемая *струнной константой связи*, есть число, означающее вероятность распада струны на две струны, соответственно вызывая силы; поскольку это вероятность, это просто число, без размерных единиц. Все другие константы физики должны быть связаны с этими двумя числами. Например, гравитационная константа Ньютона, оказывается, связана с произведением их величин.

На самом деле струнная константа связи не является свободной константой, но физической степенью свободы. Ее величина зависит от решения теории, так что вместо того, чтобы быть параметром законов, она является параметром, который отмечает решения. Можно сказать, что вероятность для струны распасться или соединиться фиксируется не теорией, а окружением струны – что означает, особым многомерным миром, в котором она живет. (Эта склонность констант мигрировать от свойств теории к свойствам окружения является важным аспектом теории струн, к которому мы снова вернемся в следующей главе.) В завершении всего этого закон, которому удовлетворяют струны, является красивым и простым. Представьте раздувание пузырька. Он принимает в процессе расширения совершенно сферическую форму. Или посмотрите на пузырьки после того, как вы вспенили ванну. Их формы являются проявлением простого закона, который мы будем называть *законом пузырьков*. Закон устанавливает, что поверхность пузырька занимает минимально возможную для себя площадь, задавая на ней связи и силы.

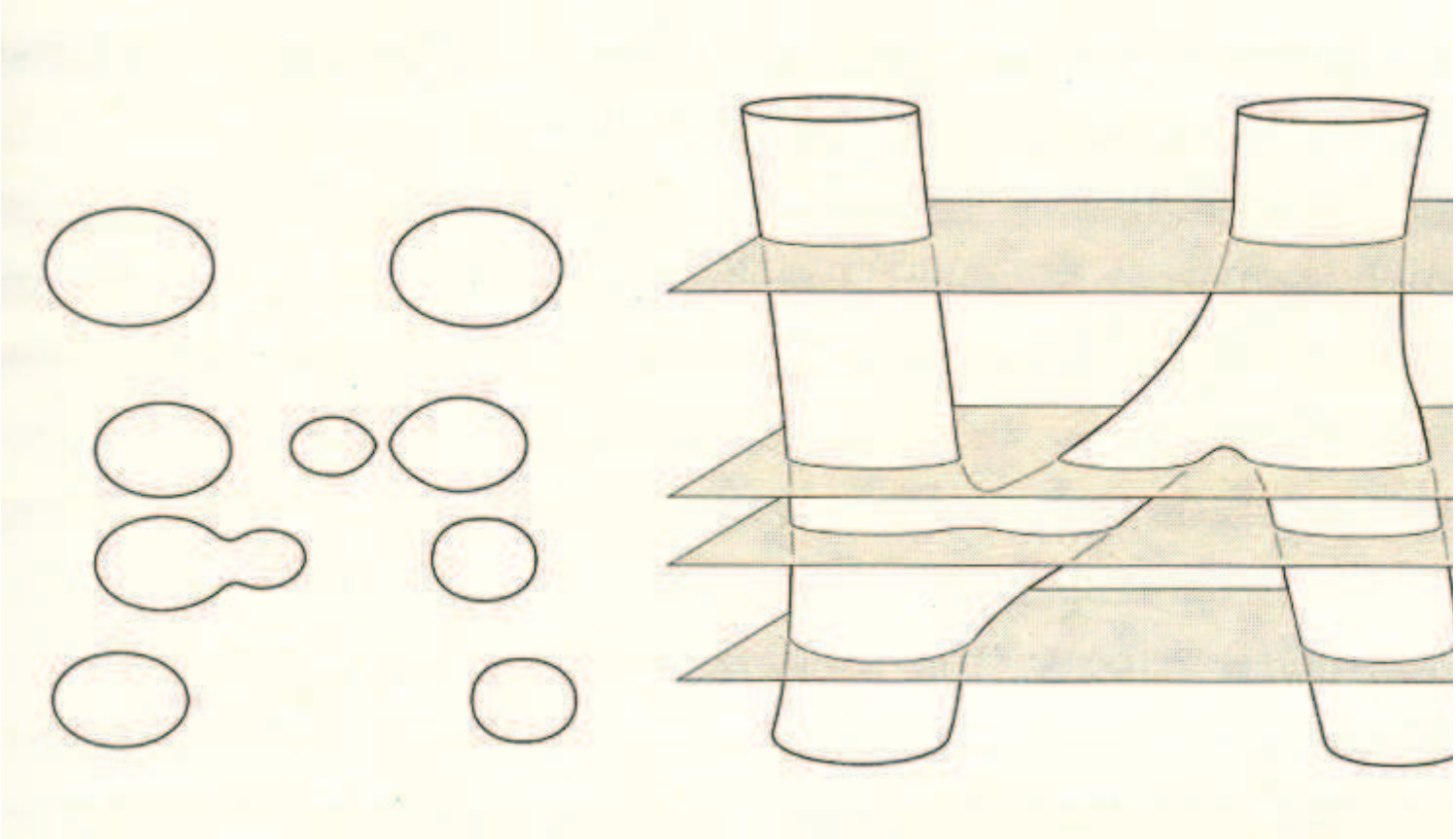

Рисунок 6. Распространение и взаимодействие струн определяется тем же законом, который минимизирует площадь поверхности в пространстве-времени. Справа мы видим поверхность в пространстве-времени, рисуемую двумя замкнутыми струнами, которые взаимодействуют путем обмена третьей замкнутой струной. Слева мы видим последовательность конфигураций в пространстве, которые получаются, если взять сечения пространственно-временной картины, показанной справа. Сначала мы видим две замкнутые струны, затем от одной отделяется третья замкнутая струна,

которая путешествует, а затем присоединяется ко второй струне.

Этот принцип оказывается применимым и к струнам тоже. Когда одномерная струна движется через время, она создает двумерную поверхность в пространстве-времени (см. Рис. 6). Эта поверхность имеет определенную площадь, грубо определяемую как произведение длины струны на ее продолжительность во времени.

Струна движется так, чтобы минимизировать указанную площадь. Это итоговый закон. Он объясняет движение струн и, раз уж струнам позволено распадаться и соединяться, существование всех сил. Он объединяет все силы, которые мы знаем, с описанием всех частиц. И он намного проще, чем законы, описывающие любую из вещей, которые он объединяет.

Теория струн доводит до конца еще и другой подвиг унификации. В начале девятнадцатого века Майкл Фарадей представил магнитное и электрическое поля в терминах *полевых линий* – линий, бегущих между полюсами магнита или между положительным и отрицательным электрическими зарядами. Для Фарадея эти линии были реальными; они были тем, что переносит силы между магнитами или зарядами.

В теории Максвелла полевые линии стали вторичными по отношению к полям, но этот подход не является обязательным. Можно представить, что полевые линии реально существуют и силы между частицами являются растяжением полевых линий между ними. Это не может быть доведено до конца в классической теории, но может быть в квантовой теории.

В сверхпроводнике – что означает материал с низким или отсутствующим электрическим сопротивлением – полевые линии магнитного поля становятся дискретными. Каждая линия переносит определенное минимальное количество магнитного потока. Можно думать об этих полевых линиях как о своего рода атоме магнитного поля. В начале 1970х три провидца предположили, что та же самая вещь справедлива для линий сил в КХД, которые являются аналогами линий электрического поля в электромагнетизме. Именно таким образом датский физик Хольгер Нильсен стал одним из изобретателей теории струн – он рассмотрел струны как квантованные линии электрического потока. Эта картина была затем развита Кеннетом Вильсоном в Корнелле, и с тех пор всегда линии квантованного электрического поля называются линиями Вильсона. Третьим провидцем был русский физик Александр Поляков, который, вероятно, является нашим самым глубоким мыслителем по поводу взаимосвязи между калибровочными теориями и теориями струн. Поляков дал единственный самый вдохновляющий семинар из тех, что я слушал как аспирант, в котором он заявил свое амбициозное желание решить КХД точно путем перевыражения ее как теории струн – струны должны были быть линиями квантованного электрического потока.

Согласно этим провидцам первичным объектом в калибровочных теориях являются полевые линии. Они удовлетворяют простым законам, которые диктуют, как они растягиваются между зарядами. Сами поля возникают только как альтернативное описание. Этот способ размышлений естественным образом встраивается в теорию струн, поскольку полевые линии могут быть приняты за струны.

Это наводит на мысль о некотором виде дуальности описаний: можно думать о полевых линиях как о первичном объекте, а об основных законах как об описании того, как они растягиваются и двигаются, или можно думать о поле как о первичном объекте, а полевые линии считать просто общепринятым способом описания поля. В квантовой теории оба описания работают. Это приводит к принципу, который мы называем *дуальностью струн и полей*. Оба описания работают. Оба могут быть приняты как фундаментальные.

Пьер Рамон лишился должности в Йейле в 1974, несколькими годами позже того, как были решены некоторые центральные проблемы теории струн. Оказалось, что изобретение пути включения фермионов в теорию струн, открытие суперсимметрии и удаление тахионов – все на одном дыхании – было не

достаточным, чтобы убедить его коллег, что он достоин профессорства в институтах "Лиги Плюща"*.

---

* «Лига Плюща» – ассоциация восьми старейших американских университетов (Браунский, Гарвардский, Дартмутский, Йельский, Колумбийский, Корнельский, Пенсильванский, Принстонский). Название происходит от побегов плюща, обвивающих старые здания в этих университетах. Считается, что члены лиги отличаются высоким качеством образования и, в связи с этим, определенным снобизмом по отношению к другим американским университетам. – *(прим. перев.)*

Тем временем, Джон Шварц потерял должность в Принстоне в 1972, несмотря на его фундаментальный вклад в теорию струн. Затем он переместился в Калтех, где он в течение следующих двенадцати лет был ассоциированным исследователем, поддерживаемым временными фондами, которые периодически обновлялись. Он не преподавал, если он не хотел этого, – но также и не имел должности. Он открыл первую хорошую идею о том, как гравитация и другие силы могут быть объединены, но, видимо, Калтех остался не убежденным в том, что он подходит для постоянного профессорско-преподавательского состава.

Нет сомнений, что первые изобретатели теории струн были плохо вознаграждены за свои пионерские открытия. Чтобы разобраться, что это за люди, читатель должен понять, что это означает в реальных терминах. Друзья, с которыми вы шли в аспирантуру, являются сейчас полными профессорами с должностью. Они имеют хорошие оклады, гарантированную занятость, они легко обеспечивают семьи. Они имеют положения с высоким статусом в элитных институтах. Вы не имеете ничего. В лучшем случае вы знаете, что они выбрали легкую дорогу, в то время как вы сделали кое-что потенциально намного более важное, что потребовало намного больше творчества и мужества. Они следовали за стадом и делали то, что было модным; вы открыли целый новый вид теории. Но вы все еще постдок, или ассоциированный исследователь или младший профессор. У вас нет гарантированной на долгий срок занятости и неопределенные перспективы. И еще вы можете быть более активны как ученый, – публикуя больше статей и сопровождая больше студентов, – чем другие люди, чей труд в менее рискованном направлении был вознагражден большей защищенностью.

Теперь, читатель, спросите себя, что бы вы стали делать в этой ситуации.

Джон Шварц не оставил работу над теорией струн, и он продолжил открывать доказательство, что она могла бы быть хорошей объединяющей теорией физики. Хотя он еще не обеспечил, чтобы теория была математически последовательна, он был уверен, что ему осталось немного до этого.* Когда первые струнные теоретики сталкивались даже с грозными препятствиями, они могли вдохновляться, думая обо всех загадках, которые будут решены, если элементарные частицы являются колебаниями струн. Имеется прелестный впечатляющий список:

---

* Теория математически последовательна, если она никогда не дает два результата, которые противоречат друг другу. Связанное с этим требование заключается в том, что все физические свойства теория описывает, используя конечные числа.

---

1. Теория струн дает нам автоматическое объединение всех элементарных частиц, а также объединяет одни силы с другими. Все происходит из колебаний одного фундаментального вида объектов.

2. Теория струн автоматически дает нам калибровочные поля, которые отвечают за электромагнетизм и ядерные силы. Они естественным образом возникают из колебаний открытых струн.

3. Теория струн автоматически дает нам гравитоны, которые происходят из колебаний замкнутых струн, а любая квантовая теория струн должна содержать замкнутые струны. Как следствие, мы бесплатно получаем автоматическое объединение гравитации с другими силами.

4. Суперсимметричная теория струн объединяет бозоны и фермионы, причем как те, так и другие являются

просто колебаниями струн, так что все силы объединяются со всеми частицами.

Более того, хотя суперсимметрия может быть верной, даже если теория струн не верна, теория струн обеспечивает намного более естественный дом для суперсимметрии, чем обычные теории частиц. В то время, как суперсимметричные версии стандартной модели были уродливы и сложны, суперсимметричные теории струн являются очень элегантнами объектами.

И, как вершина всего, теория струн без усилий доводит до конца естественное объединение законов движения с законами, которые управляют силами.

Затем имеется мечта, которую теория струн, кажется, делает возможной. Вся стандартная модель с ее двенадцатью видами кварков и лептонов и с тремя силами, плюс гравитация, может быть унифицирована в том смысле, что все эти явления возникают из колебаний струн, протянутых в пространстве-времени, следуя простейшему из возможных законов: что площадь минимизируется. Все константы стандартной модели могут быть сведены к комбинации ньютоновской гравитационной константы и одного единственного числа, которое является для струны вероятностью распасться на две или соединиться. И второе число даже является не фундаментальным, а свойством окружения.

Установив, что теория струн так много обещает, не удивительно, что Шварц и его несколько сотрудников были убеждены, что она должна быть верной. Если рассматривать проблему объединения, ни одна другая теория не предлагала так много на основе единственной простой идеи. Перед лицом таких перспектив оставалось только два вопроса: это работает? И сколько это стоит?

В 1983, когда я все еще был постдоком в Институте перспективных исследований в Принстоне, Джон Шварц был приглашен дать две лекции по теории струн в Принстонском университете. Я до того момента не слышал много о теории струн, и что я вспоминаю из его семинара, так это, большей частью, сильную и критическую реакцию аудитории, поддерживаемую в равной степени интересом и скептицизмом. Эдвард Виттен, уже влиятельная фигура в физике элементарных частиц, часто прерывал Шварца, задавая серии настойчивых, тяжелых вопросов. Я воспринимал это как индикатор скептицизма; только позже я увидел, что это было свидетельством сильного интереса к предмету. Шварц был уверенным в себе, но имелся намек на упрямство. Я получил впечатление, что он провел много лет, пытаясь передать другим свое возбуждение по поводу теории струн. Это убедительно сказало мне, что Шварц был мужественным ученым, но это не склонило меня к работе над теорией струн. В то время все, кого я знал, проигнорировали новую теорию и сохранили в прежнем положении свои разные проекты. Немногие их нас поняли, что мы доживали последние дни той физики, какой мы ее всегда знали.

8. Первая суперструнная революция

Первая суперструнная революция имела место в конце 1984. Название ее революцией звучит немного претенциозно, но термин подходящий. За шесть месяцев до этого только горстка бесстрашных физиков работали в теории струн. Они игнорировались всеми, кроме немногочисленных коллег. Как говорит об этом Джон Шварц, он и новый сотрудник, английский физик Майкл Грин, "опубликовали довольно много статей, и в каждом случае я был совершенно возбужден результатами. ... В каждом случае мы чувствовали, что люди должны теперь заинтересоваться, поскольку они смогут увидеть, насколько возбуждающей является тема. Но, однако, реакции опять не было."[39] Шесть месяцев спустя некоторые самые шумные критики теории струн начали над ней работать. В новой атмосфере стало мужеством *не* забросить то, чем

вы занимались, и *не* последовать за ними.

Поворотным пунктом стал расчет, проведенный Шварцем и Грином и обеспечивший строгое доказательство того, что теория струн является конечной и последовательной теорией. Чуть более точно, им в конце концов удалось успешно показать, что определенные опасные патологии, беспокоящие многие единые теории и называющиеся аномалиями, отсутствовали в суперсимметричной теории струн, по меньшей мере, в десяти пространственных измерениях.[40] Я вспоминаю, что реакция на эту статью была как шоком, так и ликованием: шок потому, что некоторые люди сомневались, что теория струн сможет когда-либо быть согласованной с квантовой механикой на любом уровне; ликование потому, что, показав ошибочность таких сомнений, Грин и Шварц открыли возможность того, что конечная теория, объединяющая физику, находится в наших руках.

Ни одно изменение не могло бы произойти быстрее. Как вспоминает об этом Шварц,

«Прежде чем мы даже завершили записывать это, мы получили телефонный звонок от Эда Виттена, сказавшего, что он слышал, ... что мы получили результат, уничтожающий аномалии. И он попросил, не могли бы мы показать ему наш труд. Так как у нас был черновик нашей рукописи по этому вопросу, мы послали его ему через FedEx*. Тогда еще не было e-mail, но FedEx существовала. Так что мы послали труд ему, и он получил его на следующий день. И нам говорили, что на следующий день каждый в Принстонском университете и в Институте перспективных исследований, все физики-теоретики, а там их было большое количество, работали над этим. ... Так что за ночь это стало главной индустрией [смех], по крайней мере, в Принстоне – и очень скоро в остальном мире. В этом был элемент странности, так как мы так много лет публиковали наши результаты и никого это не заботило. Теперь же внезапно каждый оказался чрезвычайно заинтересованным. Это был переход из одной крайности в другую: из крайности, когда никто не принимал тему всерьез, в другую крайность...» [41]

---

* FedEx Corporation – оперирующая во всём мире американская компания, предоставляющая почтовые, курьерские и другие услуги логистики. – *(прим. перев.)*

Теория струн пообещала то, что ни одна другая теория до того не могла – квантовую теорию гравитации, которая также является истинным объединением сил и вещества. Она одним смелым и красивым ударом смогла предложить решение, по меньшей мере, трех из пяти великих проблем теоретической физики. Таким образом, неожиданно после многих неудач мы обнаружили золото. (Шварц, это забавно отметить, быстро продвинулся от старшего участника исследований до полного профессора в Калтехе.)

Томас Кун в своей известной книге *Структура научных революций* предложил нам новый способ размышлений о событиях в истории науки, о которых мы думаем как о революциях. Согласно Куну научная революция предваряется накоплением экспериментальных аномалий. В результате люди начинают задавать вопросы к установленной теории. Некоторые изобретают альтернативные теории. Революция достигает пика в экспериментальных результатах, которые поддерживают одну из новых альтернатив по сравнению со старой установленной теорией.[42] Можно оспорить описание науки Куна, и я это сделаю в заключительной части книги. Но, поскольку он описал, что происходило в некоторых случаях, это служит удобной точкой для сравнения.

События 1984 не следуют структуре Куна. Никогда не было установленной теории, которая обращалась бы к проблемам, к которым обращается теория струн. Не было экспериментальных аномалий; стандартная модель физики частиц и ОТО совместно были достаточными, чтобы объяснить результаты всех экспериментов, сделанных до того времени. Даже при этих условиях, как можно было не назвать это революцией? Неожиданно у нас оказался хороший кандидат на конечную теорию, которая могла бы объяснить вселенную и наше место в ней.

В течение четырех или пяти лет после суперструнной революции 1984 был большой прогресс, и интерес к теории струн быстро рос. Это была самая горячая игра в городе*. Те, кто пошел в нее, активно начал эту

деятельность с амбициями и гордостью. Имелось много технических инструментов для изучения, так что, чтобы работать в теории струн, необходимо было потратить от нескольких месяцев до года, что является большим сроком для физика-теоретика. Те, кто сделал это, смотрели сверху вниз на тех, кто не стал или (намек всегда был здесь) не смог. Очень быстро выработалась почти культовая атмосфера. Вы или были струнным теоретиком, или нет. Некоторые из нас пытались сохранить подход с точки зрения здравого смысла: Есть интересная идея; я буду над ней немного работать, но я также буду заниматься другими направлениями. Было тяжело сдержать такое слово, поскольку те, кто впрыгнул, больше не интересовались разговорами с теми из нас, кто не объявил себя частью новой волны.

---

* Ссылка на старую шутку, часто встречающаяся у американских авторов: Один парень, страдавший игровой зависимостью, каждый вечер проигрывал последнюю рубашку в покер. Кто-то однажды сказал ему, что эта игра – сплошной обман, она доведёт парня до богадельни. На что он обречённо ответил: «Я знаю, знаю. Но это единственная игра в городе». – *(прим. перев.)*

Как приличествует новой области, немедленно возникли академические конференции по теории струн. Они проходили в атмосфере триумфального празднования. Было ощущение, что открыта правильная теория номер один. Ничто другое было не важно и не достойно размышлений о нем. Семинары, посвященные струнной теории, возникли во многих из главных университетов и исследовательских институтов. В Гарварде семинар по струнной теории был назван Семинаром Физики Будущего.

Это название не имело иронического смысла. Одна из вещей, которая редко обсуждалась на семинарах и конференциях по теории струн, была как проверить теорию экспериментально. Хотя несколько людей беспокоились по этому поводу, были другие, кто думал, что это не является необходимым. Было ощущение, что может быть только она последовательная теория, которая объединяет всю физику, и, поскольку теория струн казалась таковой, *она должна была быть верной*. Больше нет надежды на эксперимент, чтобы проверить наши теории. Это все хлам Галилея. Математики отныне достаточно, чтобы объяснить законы природы. Мы вошли в период физики будущего.

Очень быстро физики поняли, что теория струн, тем не менее, не является однозначной теорией. Вместо единственной последовательной теории мы скоро открыли, что имеется пять последовательных теорий суперструн в десятимерном пространстве-времени. Это вызвало проблему, которая не поддавалась решению в течение следующих десяти лет или около того. Однако, это была не совсем плохая новость. Вспомним, что теория Калуцы-Кляйна имела фатальную проблему: что вселенные, которые она описывает, являются слишком симметричными, не согласуясь с фактом, что природа и ее отражение в зеркале не одинаковы. Некоторые из пяти суперструнных теорий оказались в состоянии избежать такой судьбы и описывали столь же асимметричные миры, как и наш собственный. И имелось дальнейшее развитие, которое подтверждало, что теория струн является конечной (что означает, что она должна давать только конечные числа в качестве предсказаний результатов любого эксперимента). В бозонных струнах, без фермионов, легко показать, что не имеется бесконечных выражений, аналогичных имеющимся в теории гравитонов, но когда вы вычисляете вероятности с большей степенью точности, бесконечности могут возникнуть, что связано с нестабильностью тахионов. Поскольку суперструны тахионов не имеют, это повышает возможность, что теория не имеет бесконечностей.

Это было легко проверить в низшем порядке приближения. За его пределами имелись интуитивные аргументы, что теория должна быть конечной в любом порядке приближения. Я вспоминаю видного струнного теоретика, который сказал, что это настолько очевидно, что теория струн конечна, что он не будет изучать доказательства, даже если они есть. Но некоторые люди стремились обеспечить конечность теории струн за пределами низшего приближения. Наконец, в 1992 Стэнли Мандельштам, высоко уважаемый математический физик в Беркли, опубликовал статью, которая полагала, что доказала, что суперструнные теории конечны во всех порядках определенной аппроксимационной схемы.[43]

Не удивительно, что люди были столь оптимистичны. Обещания теории струн намного превосходили все, что до того времени предлагала любая из единых теорий. В то же время, мы могли видеть, что остается

пройти еще длинный путь до выполнения всех ее обещаний. Например, рассмотрим проблему объяснения констант стандартной модели. Теория струн, как отмечалось в последней главе, имеет только одну константу, которая может быть подогнана руками. *Если теория струн верна, двадцать констант стандартной модели должны быть объяснены в терминах этой одной константы*. Это было бы безусловно изумительно, если бы все эти константы можно было бы рассчитать как функции единственной константы теории струн – это был бы триумф, более великий, чем любой другой в истории физики. Но мы еще этого не достигли.

Кроме этого, был вопрос, который, как обсуждалось ранее, всегда должен задаваться единым теориям. Как должны объясняться видимые отличия между унифицированными частицами и силами? Теория струн объединяет все частицы и силы, что означает, она должна также объяснить нам, почему они различаются.

Итак, как это всегда бывает, все свелось к деталям. Это на самом деле работает, или имеются сноски мелким шрифтом, которые уменьшают чудо? Если это работает, как на самом деле такая простая теория объясняет так много? Что мы должны думать о природе, если теория струн верна? Во всяком случае, что мы потеряли по пути?

Когда я узнал о теории больше, я начал думать о предлагаемых ею проблемах как об очень похожих на те, с которыми мы сталкиваемся, когда покупаем новый автомобиль. Вы идете к дилеру со списком опций, которые вы хотите. Дилер рад продать вам автомобиль с такими опциями. Показывает несколько моделей. После некоторого времени вы осознаете, что каждый автомобиль, который был вам показан, имеет некоторые опции, которых нет в вашем списке. Вы хотели противоблокирующее устройство тормозной системы и по-настоящему хорошую аудиосистему с CD-проигрывателем. Автомобили наряду с этим имеют также люк в крыше, причудливые хромированные бамперы, титановые колпаки ступиц, восемь держателей для стаканов и сделанные на заказ гоночные полосы.

Это то, что известно как комплексная сделка*. Оказывается, что вы не можете получить автомобиль только с теми опциями, которые вы хотите. Вы получите комплект опций, который включает вещи, которые вы не хотите или которые вам не нужны. Эти дополнения значительно увеличивают цену, но выбора нет. Если вы хотите антиблокировку тормозов и CD-плейер, вы должны взять весь комплект.

---

* Читатели, заставшие советские времена, могут вспомнить и о таком явлении, как распродажа нужных товаров с нагрузкой. – *(прим. перев.)*

Теория струн, кажется, тоже предлагается только как комплексная сделка. Вы можете желать простую единую теорию всех частиц и сил, но вы получаете несколько дополнительных свойств, по меньшей мере, два из которых при переговорах не обсуждались.

Первое есть суперсимметрия. Были теории струн без суперсимметрии, но все они оказались нестабильными вследствие присутствия все тех же надоедливых тахионов. Суперсимметрия уничтожает тахионы, но имеется загвоздка. Суперсимметричная теория струн может быть последовательной только если вселенная имеет девять измерений пространства. Нет такой опции для теории, чтобы она работала в трехмерном пространстве. Если вы хотите получить другие свойства, вы должны будете принять опцию с шестью дополнительными измерениями. Не остается ничего иного, как свернуть их так, чтобы они оказались слишком малыми для восприятия. Таким образом, вы вынуждены воскресить главные идеи старых теорий единого поля.

Это создает большие возможности, но и большие проблемы. Как мы видели, ранние попытки использовать высшие измерения для объединения физики потерпели неудачу, поскольку там имелось слишком много решений; введение высших измерений приводит к гигантской проблеме неоднозначности. Это также приводит к проблемам нестабильности, поскольку имеются процессы, посредством которых геометрия внешних измерений распутывается, они становятся большими, и другие процессы, при помощи которых она коллапсирует в сингулярность. Если бы теория струн преуспела, она должна была бы решить эти

проблемы.

Струнные теоретики скоро поняли, что проблема неоднозначности является фундаментальным свойством теории струн. Теперь имелось шесть дополнительных измерений для скручивания, и было много способов сделать это. Большинство из них приводило к сложным шестимерным пространствам, и каждое давало отличающуюся версию теории струн. Поскольку теория струн является зависимой от фона теорией, то, что мы поняли о ней на техническом уровне, это что она дает нам описание струн, двигающихся в фиксированных фоновых геометриях. Выбирая различные фоновые геометрии, мы получаем технически отличающиеся теории. Они происходят из одной и той же идеи, и в каждом случае используются одни и те же законы. Но, строго говоря, каждая является отличающейся теорией.

Это не похоже на секущиеся волосы. Физические предсказания, выдаваемые всеми этими различными теориями, будут тоже различными. Большинство шестимерных пространств описывается списком констант, которые могут быть выбраны свободно. Они обозначают различные свойства геометрии, такие как объемы дополнительных измерений. Типичная теория струн может иметь сотни таких констант. Эти константы являются частью описания того, как струна распространяется и взаимодействует с другими струнами.

Подумаем об объекте с двумерной поверхностью, подобной сфере. Поскольку она совершенно сферическая, она описывается только одним параметром, своей длиной окружности. Но теперь представьте более сложную поверхность, вроде пончика (см. Рис. 7). Эта поверхность описывается двумя числами. Тут имеются два круга, которые обходят пончик двумя различными путями, и они могут иметь различные длины окружностей.

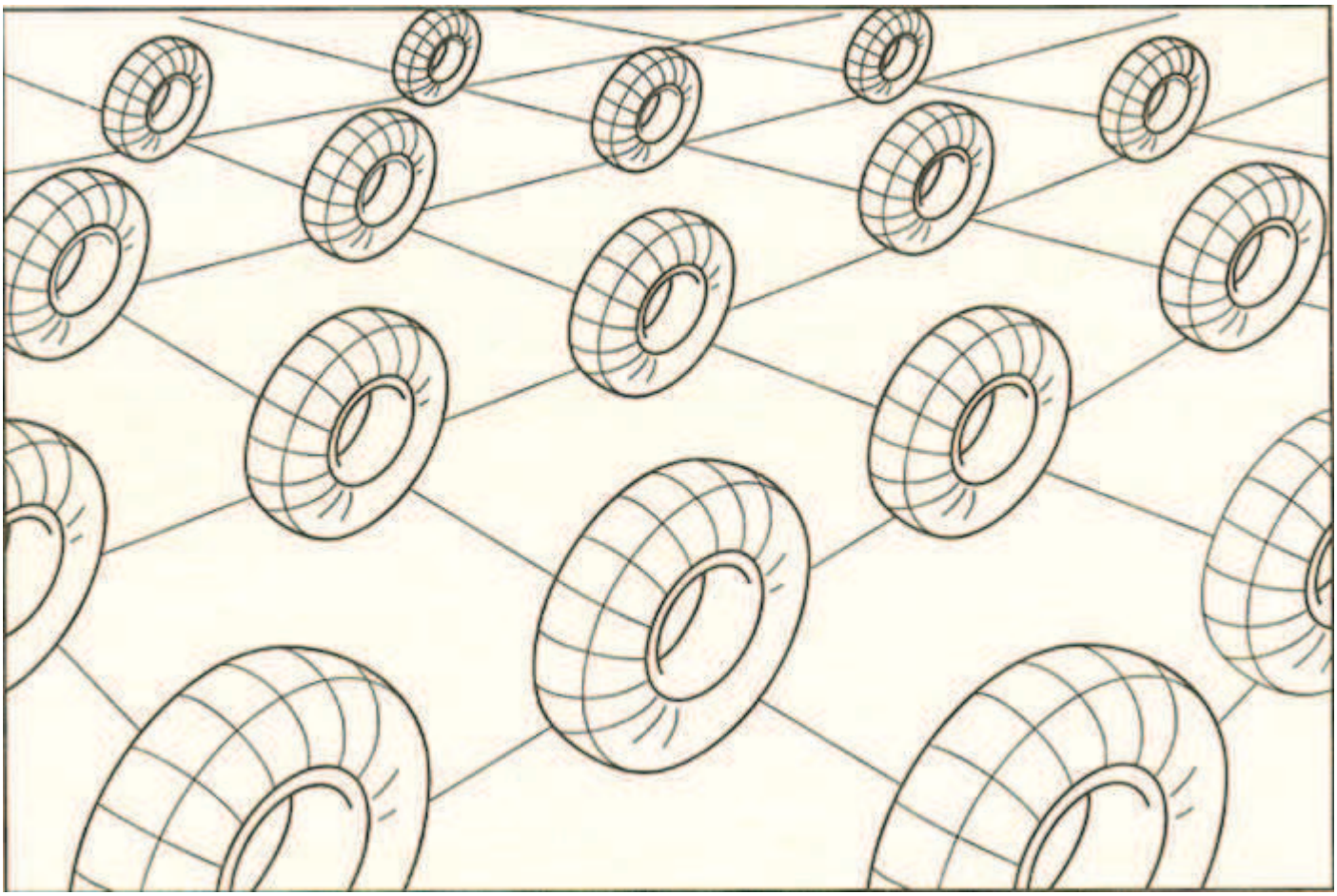

Рисунок 7. Скрытые размерности могут иметь различные топологии. На этом примере имеются две скрытые размерности, которые имеют топологию пончика или тора.

Мы можем представить более сложные поверхности с большим количеством отверстий. Они требуют еще больше чисел для описания. Но никто (по крайней мере, никто мне известный) не может напрямую визуализировать шестимерное пространство.

Однако, мы создали инструментарий для его описания, который использует аналоги отверстий, которые могут попадаться в пончике и других двумерных поверхностях. Вместо того, чтобы оборачивать струну вокруг отверстия, мы оборачиваем вокруг него более высокоразмерное пространство. В каждом случае пространство, которое обернули, будет иметь объем, и он станет константой, описывающей геометрию. Когда мы разрабатываем, как струны двигаются в дополнительных измерениях, все эти дополнительные константы проявляются. Так что тут больше не одна константа, а большое число констант.

Это то, как теория струн решает основную дилемму, стоящую перед попытками объединить физику. Даже если все исходит из простого принципа, вы должны объяснить, как возникает разнообразие частиц и сил. В простейшей возможности, когда пространство имеет девять измерений, теория струн очень проста; все частицы одного вида идентичны. Но когда струнам позволено двигаться в усложненной геометрии шести дополнительных измерений, возникает большое количество различных видов частиц, связанных с различными способами движений и колебаний в каждом из дополнительных измерений.

Так что мы получаем естественное объяснение видимому различию среди частиц, что и должна делать хорошая единая теория. Но это имеет цену, которая заключается в том, что теория оказывается далеко не однозначна. То, что происходит, есть обмен константами: константы, которые обозначали массы частиц и силы взаимодействий, заменены на константы, которые обозначают геометрию дополнительных шести измерений. Тогда менее удивительно найти константы, которые будут объяснять стандартную модель.

Даже при этих условиях эта схема могла бы быть убедительной, если она привела бы к однозначному предсказанию констант стандартной модели. Если путем перевода констант стандартной модели в константы, обозначающие геометрию дополнительных измерений, мы нашли бы нечто новое о константах стандартной модели, и если бы эти находки согласовались бы с природой, это могло бы составлять строгое доказательство, что теория струн должна быть верной.

Но этого не произошло. Константы, которые можно было свободно варьировать в стандартной модели, были переведены в геометрии, которые можно было свободно варьировать в теории струн. Ничего не ограничилось и не уменьшилось. А поскольку имеется гигантское количество выборов геометрии дополнительных измерений, число свободных констант выросло, а не уменьшилось.

Более того, стандартная модель не была воспроизведена полностью. Верно, что мы можем вывести ее общие свойства, такие как существование фермионов и калибровочных бозонов. Но точные комбинации, наблюдаемые в природе, не вытекали из уравнений.

С этого момента стало еще хуже. Все теории струн предсказывают дополнительные частицы – частицы, не наблюдаемые в природе. Вместе с ними появляются и дополнительные силы. Некоторые из этих дополнительных сил происходят от вариаций в геометрии дополнительных измерений. Подумаем о сфере, прикрепленной к каждой точке пространства, как на Рис. 8. Радиус сферы может изменяться, когда мы двигаемся через пространство.

Так что радиус каждой сферы может рассматриваться как свойство точки, к которой она прикреплена. То есть, это что-то вроде поля. В точности подобно электромагнитному полю такие поля распространяются в пространстве и времени и вызывают дополнительные силы. Это остроумно, но имеется опасность, что дополнительные силы будут не согласованы с наблюдениями.

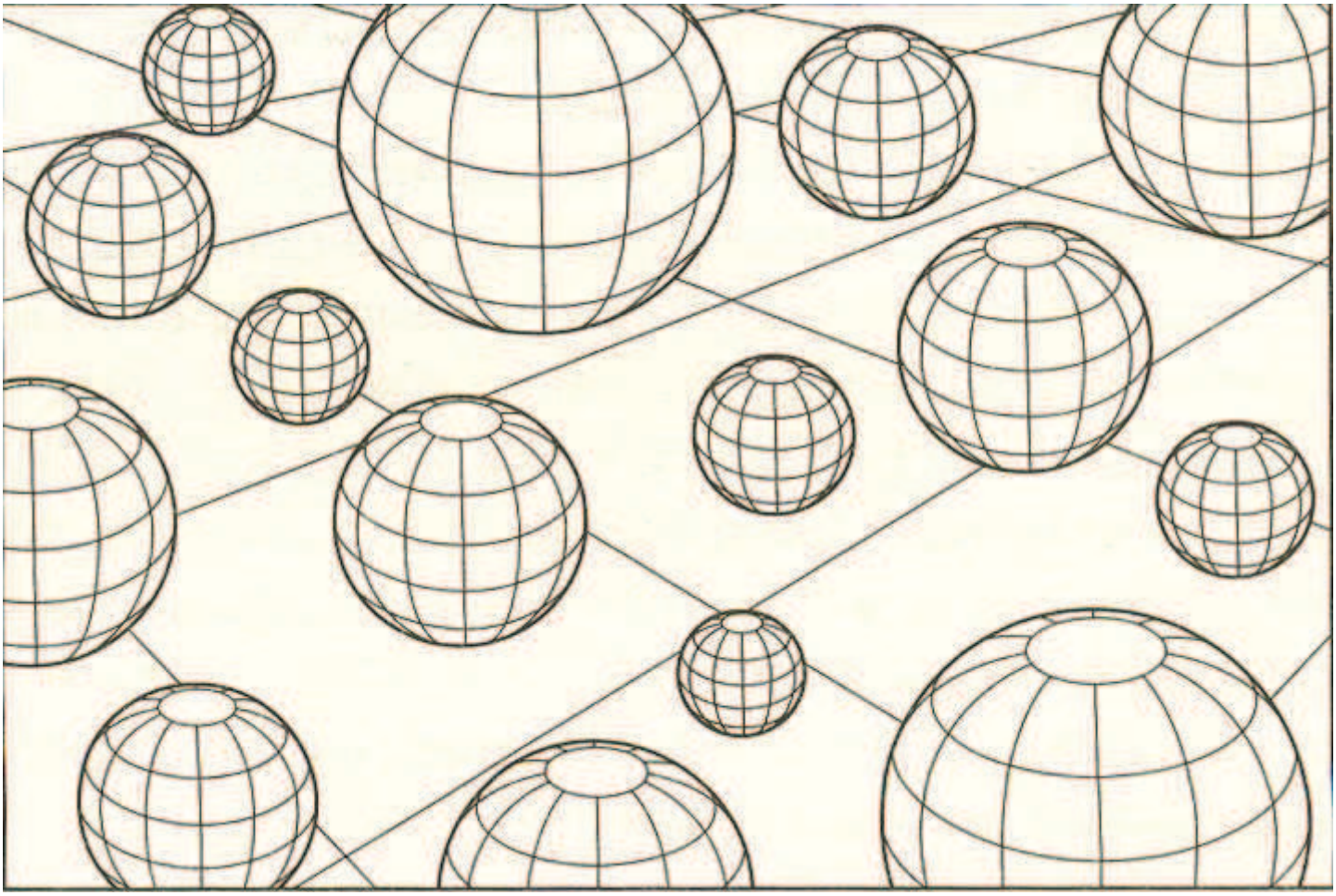

Рисунок 8. Геометрия скрытых измерений может изменяться в пространстве и времени. На этом примере изменяются радиусы сфер.

Мы говорили о применимости ко всему, но имеется один мир. Если бы теория струн была успешной, она имела бы не только модель возможных миров, но также и объясняла бы наш мир. Тогда ключевой вопрос был бы таким: *есть ли способ скрутить дополнительные шесть измерений так, что полностью воспроизведется стандартная модель физики частиц?*

Один путь был получить мир с суперсимметрией. Хотя теория струн имеет суперсмметрию, как точно эта симметрия проявляется в нашем трехмерном мире, оказывается, зависит от геометрии дополнительных измерений. Можно было бы так их организовать, что суперсимметрия оказалась бы нарушенной в нашем мире. Или могла бы быть ситуация, в которой было бы намного больше суперсимметрии, чем должно было бы содержаться в реалистичной теории.

Так что возникла интересная проблема: Может ли геометрия дополнительных шести измерений быть выбрана так, чтобы достичь в точности правильного количества суперсимметрии? Можем ли мы их упорядочить так, чтобы наш трехмерный мир имел бы версию физики частиц, описываемую суперсимметричными версиями стандартной модели?

Этот вопрос был решен в 1985 в очень важной статье, написанной квартетом струнных теоретиков: Филипом Канделасом, Гэри Хоровитцем, Эндрю Строминджером и Эдвардом Виттеном.[44] Им повезло, поскольку два математика, Эугенио Калаби и Шинь-Тунь Яу, уже решили математическую проблему, которая дала ответ. Они открыли и изучили особенно красивую форму шестимерной геометрии, которую мы сейчас называем пространствами Калаби-Яу. Четыре струнных теоретика смогли показать, что необходимые условия для того, чтобы теория струн воспроизвела версию суперсимметричной стандартной модели, такие же, как и условия, которые определяют пространство Калаби-Яу. Затем они предположили, что природа описывается теорией струн, в которой дополнительные шесть измерений выбраны в виде

пространства Калаби-Яу. Это урезает возможности и придает теории больше структуры. Например, они явно показали, как вы могли бы заменить константы стандартной модели, такие как те, которые определяют массы различных частиц, на константы, определяющие геометрию пространства Калаби-Яу.

Это был большой прогресс. Но имелась не менее великая проблема. Если бы было только одно пространство Калаби-Яу с фиксированными константами, мы смогли бы получить однозначную единую теорию, к которой мы стремились. К несчастью, оказалось, что имелось много пространств Калаби-Яу. Никто не знал, сколько именно, но сам Яу в разговоре об этом приводил оценку, по меньшей мере, в сотню тысяч. Каждое из этих пространств приводило к различным версиям физики частиц. И каждое пространство появлялось со списком свободных констант, зависящим от его размера и формы. Так что тут не было никакой однозначности, никаких новых предсказаний и ничто не было объяснено.

В дополнение, теории, привлекающие пространства Калаби-Яу, имеют много дополнительных сил. Оказывается, что пока теория струн является суперсимметричной, многие из этих сил будут иметь бесконечный радиус действия. Это было неудачно, поскольку имеются строгие экспериментальные пределы на существование любых сил бесконечного радиуса действия, кроме гравитации и электромагнетизма.

Оставалась и другая проблема. Константы, которые задают геометрию дополнительных измерений, могут изменяться непрерывно. Это могло бы вызвать нестабильности, как и в старых теориях Калуцы-Кляйна. Исключая случай, когда имеется некий мистический механизм, который замораживает геометрию дополнительных измерений, эти нестабильности приводили бы к катастрофе, такой как сингулярности, возникающие из коллапса дополнительных измерений.

И наконец, даже если наш мир описывался бы одной из геометрий Калаби-Яу, не было объяснения тому, как он таким стал. Теория струн появляется и во многих других версиях, кроме пространств Калаби-Яу. Имеются версии теории, в которых число скрученных измерений изменяется по всем значениям от нуля до девяти.

Те геометрии, которые имеют не скрученные измерения, называются *плоскими*; они определяют миры, которые куда больше, чем нам подсказывает опыт. (В исследовании следствий для физики частиц мы могли бы игнорировать гравитацию и космологию, в этом случае нескрученные измерения имели бы геометрию, описываемую СТО).

Сотня тысяч многообразий Калаби-Яу является только вершиной айсберга. В 1986 Эндрю Строминджер открыл способ конструирования громадного числа дополнительных суперсимметричных теорий струн. Будет полезно сохранить в памяти то, что он написал в заключении к своей статье, описывающей эту конструкцию:

"Класс суперсимметричных суперструнных компактификаций чудовищно расширился. ... Не кажется вероятным, что [эти] решения ... можно будет классифицировать в обозримом будущем. Так как ограничения на [эти] решения относительно слабые, кажется вероятным, что число феноменологически приемлемых ... решений может быть найдено. ... Хотя это до некоторой степени утешение, в некотором смысле жизнь была сделана слишком легко. *Вся предсказательная сила кажется потерянной*.

Все это указывает на огромную необходимость нахождения динамического принципа для определения, [какая теория описывает природу] и оказывается теперь более императивной, чем другие."[45] (*Курсив мой*.)

Таким образом, принимая стратегию старых высокоразмерных теорий, теория струн переняла также и их проблемы. Имелось очень много решений, и некоторые из них приводили к описанию, которое

приблизительно грубо походило на реальный мир, но большинство нет. Имелось много нестабильностей, которые проявлялись в большом количестве дополнительных сил и частиц.

Это были границы для появления разногласий, и они появились. Некоторые были не согласны, что список хороших свойств был длинным и впечатляющим. На самом деле казалось, что идея частиц как колебаний струн была потерянной связью, которая смогла мощно поработать, чтобы решить многие открытые проблемы. Но цена была высока. Дополнительные свойства, которые мы вынуждены были «купить», уводили в сторону от красоты исходного предложения – по меньшей мере, для некоторых из нас. Другие находили геометрию дополнительных измерений самой красивой вещью в теории. Не удивительно, что теоретики приземлялись строго на одну из сторон.

Те, кто верил, склонялись к тому, чтобы поверить в весь комплект. Я знал многих физиков, которые были уверены, что суперсимметрия и дополнительные измерения были здесь в ожидании своего открытия. Я знал также много тех, кто в этой точке спрыгнул с корабля, поскольку это подразумевало принятие слишком многого, что не имело обоснования в эксперименте.

Среди очернителей был Ричард Фейнман, который объяснял свое отвращение к тому, чтобы двигаться вместе с возбужденной волной, следующим:

"Мне не нравится, что они ничего не могут рассчитать. Мне не нравится, что они не ограничивают свои идеи. Мне не нравится, что для всего, что не согласуется с экспериментом, они выпекают объяснение – подправляя теорию со словами: «Хорошо, это все еще может быть верным». Например, теория требует десять измерений. Хорошо, возможно, имеется способ скрутить шесть из измерений. Да, это возможно математически, но почему не семь? Когда они записывают свое уравнение, уравнение должно сделать выбор, сколько из этих вещей окажутся свернутыми, не выпрашивая согласия с экспериментом. Иными словами, нет какого бы то ни было основания в теории суперструн, чтобы восемь из десяти измерений не были скручены и не дали в итоге только два измерения, что полностью противоречило бы опыту. Так что факт, что это может разойтись с экспериментом, является очень хрупким, он не может ничего произвести; он должен оправдываться большую часть времени. Это не выглядит правильным." [46]

Эти настроения разделялись многими из более старшего поколения физиков, работающих в области физики частиц, которые знали, что успех теории частиц всегда требовал непрерывного взаимодействия с экспериментальной физикой. Другим инакомыслящим был Шелдон Глэшоу, нобелевский лауреат за его работу по стандартной модели:

«Но физики-суперструнщики еще не показали, что их теория на самом деле работает Они не смогли продемонстрировать, что стандартная теория является логическим разультатом теории струн. Они даже не смогли убедиться, что их формализм включает описание таких вещей, как протоны и электроны. И они еще не сделали даже одного самого маленького экспериментального предсказания. Хуже всего, теория суперструн не вытекает как логическое следствие из некоторого привлекательного набора гипотез о природе. Почему, вы можете спросить, струнные теоретики настойчиво утверждают, что пространство девятимерно? Просто потому, что теория струн не имеет смысла в любом другом виде пространства.» [47]

За пределами полемики, однако, имелась ясная необходимость понять теорию лучше. Теория, которая возникает в таком большом количестве версий, не казалась похожей на отдельную теорию. Если хотите, различные теории казались подобными различным решениям некоторой другой, еще неизвестной теории.

Мы используем идею, что одна теория имеет много различных решений. Ньютоновские законы описывают, как частицы двигаются в ответ на силы. Предположим, что мы зафиксируем силы – например, мы хотим описать мяч, брошенный в гравитационном поле Земли. Уравнения Ньютона имеют бесконечное количество решений, соответствующих бесконечному количеству траекторий, поторые может выбрать мяч: Он может быть брошен выше или ниже, быстрее или медленнее. Каждый способ бросания мяча приводит к различной траектории, каждая из которых есть решение уравнений Ньютона.

ОТО также имеет бесконечное количество различных решений, каждое из которых является

пространством-временем – то есть, возможной историей вселенной. Поскольку геометрия пространства-времени является динамической сущностью, оно может существовать в бесконечном числе различных конфигураций и эволюционировать в бесконечное число различных вселенных.

Каждый фон, на котором определена теория струн, является решением уравнения Эйнштейна или некоторого его обобщения. Таким образом, людям начало приходить на ум, что растущий каталог теорий струн означает, что мы на самом деле не изучали фундаментальную теорию. Возможно, то, что мы делали, было изучением *решений* некоторой более глубокой, все еще не известной теории. Мы можем назвать ее *мета-теорией*, поскольку каждое ее решение есть теория. Эта мета-теория является настоящим фундаментальным законом. Каждое его решение будет приводит к теории струн.

Таким образом, могло бы быть более убедительным, если бы мы могли подумать не о бесконечном количестве теорий струн, а о бесконечном количестве решений, возникающих из одной фундаментальной теории.

Вспомним, что каждая из многих теорий струн является зависимой от фона теорией, которая описывает струны, двигающиеся в особом фоновом пространстве-времени. Поскольку различные приблизительные теории струн живут в различных пространственно-временных фонах, теория, которая всех их объединяет, *не должна жить ни в каком пространственно-временном фоне*. Чтобы объединить их, необходима отдельная фоново-независимая теория. Способ сделать это, таким образом, ясен: изобрести мета-теорию, которая сама является фоново-независимой, затем вывести фоново-зависимые теории струн из этой отдельной мета-теории.

Так что мы имели две причины поискать независимую от фона квантовую теорию гравитации. Мы уже знали, что мы должны были включить динамический характер геометрии, заданный ОТО Эйнштейна. Теперь нам нужно было это, чтобы объединить все различные теории струн. Это могло бы потребовать новой идеи, но, по меньшей мере, на данный момент, это остается вне достижимого.

Одна вещь, которая ожидала появления мета-теории, была помощь в выборе, какая версия теории струн реализуется физически. Поскольку широко была распространена уверенность, что теория струн являлась однозначной единой теорией, многие теоретики ожидали, что большинство из большого количества вариантов должны быть нестабильными и что одна по-настоящему стабильная теория сможет однозначно объяснить константы стандартной модели.

Иногда в конце 1980х у меня возникала мысль, что имеется другая возможность. Возможно, все струнные теории были одинаково правомерны. Это могло бы подразумевать полный пересмотр наших ожиданий по поводу физики, при котором все свойства элементарных частиц могли бы быть сделаны зависящими от обстоятельств, – определяемыми не фундаментальным законом, а одним из бесконечного числа решений фундаментальной теории. Уже были указания, что такая случайность свойств могда бы возникать в теориях со спонтанным нарушением симметрии, но многие версии теории струн открывают возможность, что это могло бы быть верным, по-существу, для всех свойств элементарных частиц и сил.

Это должно было бы означать, что свойства элементарных частиц зависят от окружения и могли бы изменяться во времени. Если это так, это должно было бы означать, что физика будет больше похожа на биологию, в которой свойства элементарных частиц должны будут зависеть от истории нашей вселенной. Теория струн была бы тогда не одной теорией, а ландшафтом теорий – аналогом ландшафтов пригодности, которые изучают эволюционные биологи. Может даже существовать процесс, аналогичный естественному отбору, который выбрал бы, какая версия применима к нашей вселенной. (Эти мысли привели меня в 1992 к статье, озаглавленной "Развивалась ли вселенная?"[48], а в 1997 к книге, названной *Жизнь космоса*. Наша история позже направится к этим идеям.)

Когда бы я ни обсуждал эти эволюционные принципы со струнными теоретиками, они говорили: «Не беспокойся, будет единственная версия теории струн, выбранная посредством неизвестного на сегодняшний день принципа. Когда мы найдем его, этот принцип корректно объяснит все параметры

стандартной модели и приведет к однозначным предсказаниям для планируемых экспериментов».

Так или иначе, прогресс в теории струн замедлился, и к началу 1990х струнные теоретики были в унынии. Не было полной формулировки теории струн. Все, что мы имели, это был список сотен тысяч различных теорий, каждая с большим количеством свободных констант. У нас не было ясной идеи, какая из многих версий теории соответствует реальности. И, хотя имел место большой технический прогресс, не появился никакой «дымящийся пистолет», который сказал бы нам, является ли теория струн верной или ошибочной. Хуже всего, не было сделано ни одного предсказания, которое могло бы быть подтверждено или фальсифицировано выполнимым экспериментом.

Имелись и другие причины, из-за которых струнные теоретики были также обескуражены. Конец 1980х был удачным для направления. Сразу после революции 1984 изобретатели теории струн, вроде Джон Шварца, получили много заманчивых предложений от лучших университетов. В течение нескольких лет молодые струнные теоретики шагали вперед. Но к началу 1990х это оборвалось, и талантливые люди опять оказались без предложений на работу.

Некоторые люди, молодые и старые, покинули тему в этот момент. К счастью, работа в теории струн обеспечила хороший интеллектуальный тренинг, и некоторые бывшие струнные теоретики теперь процветают в других областях, таких как физика твердого тела, биология, нейронаука, компьютеры и банковское дело.

Но другие не сменили курс. Несмотря на основания для уныния, многие струнные теоретики не смогли оказаться от идеи, что теория струн составляет будущее физики. Если имелись проблемы, хорошо, ни один другой подход к унификации элементарных частиц также не преуспел. Было несколько людей, работавших в квантовой гравитации, но большинство струнных теоретиков остались в блаженном неведении о ней. Для многих из них теория струн была просто единственной игрой в городе*. Даже если эта дорога оказалась тяжелей, чем они надеялись, так и должно было быть, ни одна другая теория не обещала объединения всех частиц и сил и решения проблемы квантовой гравитации, и все это в рамках конечной и последовательной схемы.

Печальным результатом было то, что раскол между верующими и скептиками углублялся. Каждая сторона стала более укрепленной, и каждой казалось, что она имеет хорошее оправдание своей позиции. И подобное положение могло бы сохраняться долгое время, если бы не произошли определенные впечатляющие разработки, которые радикально изменили нашу оценку теории струн.

9. Революция номер два

Теория струн изначально предполагала объединить все частицы и силы в природе. Но, как было изучено за десятилетие, следующее за революцией 1984, произошло нечто неожиданное. Указанная единая теория распалась на множество различных теорий: пять последовательных суперструнных теорий в десятимерном пространстве-времени плюс миллионы вариантов в случаях, когда некоторые измерения были скручены. С течением времени стало ясно, что сама теория струн нуждается в унификации.

Вторая суперструнная революция, которая ворвалась на сцену в 1995, дала нам именно это. Рождение революции часто связывают с выступлением, которое Эдвард Виттен сделал в марте на конференции по теории струн в Лос Анжелесе, где он предложил объединяющую идею. Он на самом деле не предложил новую единую теорию суперструн; он просто предположил, что она существует и что она должна обладать определенными свойствами. Предположение Виттена было основано на серии более ранних открытий,

которые раскрыли новые аспекты теории струн и значительно повысили наше понимание этой теории. Это дальше объединило теорию струн с калибровочными теориями и ОТО через раскрытие дополнительных глубоких общностей и взаимосвязей между ними. Эти успехи, из которых некоторые были беспрецедентны в истории современной теоретической физики, со временем победили многих скептиков, включая меня. Во-первых, было впечатление, что пять непротиворечивых суперструнных теорий описывают различные миры, но в середине 1990х мы начали понимать, что они не столь различны, как казались.

Когда возникают два различных способа рассмотрения одного и того же явления, мы называем это *дуальностью*. Попросите членов одной супружеской пары, по-отдельности, рассказать вам историю их взаимосвязи. Это будут не одинаковые истории, но каждое важное событие в одной будет соответствовать важному событию в другой. Если вы поговорите с ними достаточно долго, вы будете в состоянии предсказать, как две разные истории соотносятся и отличаются. Например, восприятие мужем уверенности жены в себе может отображаться в восприятие женой случаев пассивности ее мужа. Можно сказать, что два описания дуальны друг по отношению к другу.

Струнные теоретики в своих усилиях связать пять теорий в одну начали говорить о нескольких разновидностях дуальностей. Некоторые дуальности являются *точными*: это означает, что две теории на самом деле не отличаются, а просто являются двумя путями описания одного и того же явления. Другие дуальности являются *приблизительными*. В этих случаях две теории на самом деле различны, но имеются явления в одной, которые сходны с явлениями в другой, приводя к приближениям, в которых определенные свойства одной теории могут быть поняты посредством изучения другой.

Простейшая дуальность, которая содержится среди пяти суперструнных теорий, называется *Т-дуальностью*. «*Т*» происходит от слова «топологическая», поскольку эта дуальность должна действовать с топологией пространства. Она возникает, когда одно из компактифицированных измерений является кругом. В этом случае струна может наматываться на круг; фактически, она может наматываться несколько раз (см. Рис.9). Число раз, которое струна обернулась вокруг круга, называется *числом намотки*.

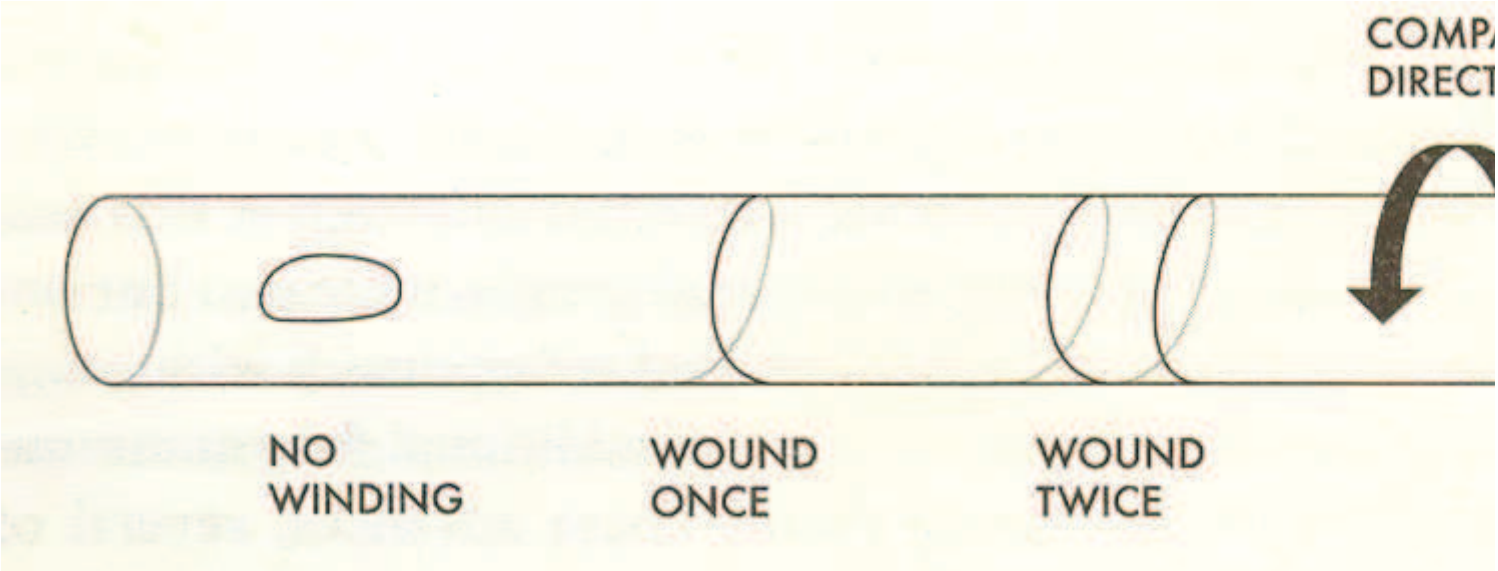

Рисунок 9. Струны могут наматываться вокруг скрытого измерения. В этом случае пространство одномерно и скрытое измерение является маленьким кругом. Нарисованы струны, которые намотаны вокруг кругового измерения нуль, один и два раза.

Другое число измеряет, как струна колеблется. Струна имеет обертоны, точно как у струн пианино или струн гитары, и натуральные числа, обозначающие различные уровни колебаний. *Т*-дуальность представляет собой соотношение между двумя струнными теориями, в каждой из которых струны

накручены на круг. Радиусы двух кругов различаются, но связаны друг с другом; один равен обратной величине другого (в единицах длины струны). В таких случаях намотанные состояния первой струнной теории ведут себя в точности так, как уровни колебаний второй струнной теории. Этот вид дуальности, оказывается, существует между определенными парами из пяти струнных теорий. Сначала они кажутся разными теориями, но когда мы наматываем их струны вокруг кругов, они становятся одной и той же теорией.

Имеется второй вид дуальности, который также предполагается точным, хотя это еще не было доказано. Вспомним из главы 7, что в каждой струнной теории имеется константа, которая определяет, насколько вероятно то, что струны будут распадаться и соединяться. Это струнная константа связи, обычно обозначаемая буквой g. Когда g мала, вероятность для струн распасться или соединиться мала, так что мы говорим, что взаимодействия слабые. Когда g велика, они распадаются и соединяются все время, так что мы говорим, что взаимодействия сильные.

Теперь может произойти, что две теории связаны следующим образом: каждая теория имеет связь g. Но когда g первой теории равно $1/g$ второй теории, две теории кажутся ведущими себя идентично. Это называется *S-дуальностью (от сильного-слабого (strong-weak) взаимодействия*). Если g мало, что означает, струны взаимодействуют слабо, то $1/g$ велико, так что во второй теории струны взаимодействуют сильно.

Как эти две теории могут вести себя идентично, если их константы связи отличаются? Разве мы не можем сказать, если вероятность для струн соединиться или распасться является большой или малой? Мы можем это, если мы знаем, что из себя представляют струны. Но что, как полагают, происходит в случаях *S*-дуальности, так это то, что эти две теории имеют больше струн, чем это предполагалось.

Это размножение струн является примером привычного, но редко понимаемого явления как *появление нового (или эмерджентность* от английского *emerge* – появляться, возникать), термин, описывающий возникновение новых свойств в больших и сложных системах. Мы можем знать законы, которым удовлетворяют элементарные частицы, но когда много частиц связываются вместе, становятся видны все виды новых явлений. Сгустки протонов, нейтронов и электронов могут объединяться, чтобы произвести металл; другое равное количество тех же частиц может объединиться, чтобы произвести живую клетку. Как металл, так и живая клетка являются просто собраниями протонов, нейтронов и электронов. Как тогда мы можем описать, что делает металл металлом, а бактерию бактерией? Свойства, которые их отличают, называются *эмерджентными свойствами*.

Вот пример: возможно, простейшая вещь, металл, может колебаться; если вы ударите один конец металлической болванки, через нее пропутешествует звуковая волна. Частота, на которой будет колебаться металл, является эмерджентным свойством, как и скорость, с которой звук движется в металле. Вспомним корпускулярно-волновой дуализм квантовой механики, который декларирует, что есть волна, связанная с каждой частицей. Обратное также верно: имеется частица, связанная с каждой волной, включая частицу, связанную со звуковыми волнами, путешествующими через металл. Она называется *фонон*.

Фонон не является элементарной частицей. Он, определенно, не является одной из частиц, из которых состоит металл, он существует только благодаря коллективному движению гигантского числа частиц, из которых состоит металл. Но фонон является точно такой же частицей. Он имеет все свойства частицы. Он имеет массу, импульс, он переносит энергию. Он ведет себя точно тем же способом, как, квантовая механика говорит, должны себя вести частицы. Мы говорим, что фонон является *эмерджентной частицей**.

---

* В теории конденсированной материи более употребим термин *квазичастица*. – *(прим. перев.)*

Вещи, подобные этому, как полагают, происходят и со струнами тоже. Когда взаимодействия сильны, имеется много, много струн, распадающихся и соединяющихся, и становится тяжело отследить, что происходит с каждой индивидуальной струной. Тогда мы ищем некоторые простые эмерджентные свойства

больших собраний струн – свойства, которые мы можем использовать, чтобы понять, что происходит. Теперь появляется нечто на самом деле забавное. Точно так же, как колебания целого сгустка частиц могут вести себя как простая частица – фонон – от коллективных движений большого количества струн может возникнуть новая струна. Мы можем назвать ее *эмерджентной струной*.

Поведение этих эмерджентных струн в точности противоположно обыкновенным струнам – которые далее будем называть *фундаментальными струнами*. Чем больше взаимодействуют фундаментальные струны, тем меньше это делают эмерджентные струны. Чтобы выразить это чуть более точно: если вероятность для двух фундаментальных струн провзаимодействовать пропорциональна струнной константе связи g, то в некоторых случаях вероятность провзаимодействовать для эмерджентных струн пропорциональна $1/g$.

Как вы отличите фундаментальные струны от эмерджентных струн? Оказывается, что вы никак не сможете это сделать – по меньшей мере, в некоторых случаях. Фактически, вы можете развернуть картинку наоборот и рассматривать эмерджентные струны как фундаментальные. Это фантастический прием сильно-слабой (S-) дуальности. Это как если бы мы могли бы посмотреть на металл и увидеть фононы – кванты звуковых волн – как фундаментальные, а все протоны, нейтроны и электроны, составляющие металл, как эмерджентные частицы, сделанные из фононов.

Подобно T-дуальности этот вид сильно-слабой дуальности, оказывается, связывал определенные пары из пяти суперструнных теорий. Оставался единственный вопрос, была ли эта взаимосвязь применима только к некоторым состояниям теорий, или она являлась более глубокой. Это было проблемой, поскольку, чтобы полностью показать взаимосвязь, вы должны были изучить специальные состояния парных теорий – состояния, ограниченные определенной симметрией. В иных случаях вы не смогли бы иметь достаточно контроля над вычислениями, чтобы получить хорошие результаты.

Тогда для теоретиков имелось два возможных пути. Оптимисты – а в те дни большинство струнных теоретиков были оптимистами – ушли за пределы того, что могло бы быть показано, к предположению, что соотношения между специальными симметричными состояниями, которые они смогли проверить в парных теориях, распространяются *на все пять* теорий. Это означает, что они постулировали, что даже без специальных симметрий всегда имеются эмерджентные струны и что они всегда ведут себя точно подобно фундаментальным струнам другой теории. Это подразумевает, что S-дуальность не просто связывает некоторые аспекты теорий, но демонстрирует их полную эквивалентность.

С другой стороны, несколько пессимистов обеспокоились тем, что, возможно, пять теорий на самом деле были различными друг от друга. Они думали, что достаточно удивительным является уже то, что было даже несколько случаев, в которых эмерджентные струны одной теории вели себя подобно фундаментальным струнам другой теории, но они поняли, что такие вещи могут быть верными, даже если все теории являются различными.

Многие основывались (и продолжают основываться) на том, являются ли правыми оптимисты или пессимисты. Если оптимисты окажутся правыми, тогда все пять оригинальных суперструнных теорий на самом деле являются просто различными путями описания одной теории. Если правы пессимисты, то это на самом деле всё разные теории, а, следовательно, тут нет однозначности, нет фундаментальной теории. Пока мы не знаем, является ли сильно-слабая дуальность приблизительной или точной, мы не знаем, является ли теория струн однозначной или нет.

Один кусочек доказательства в пользу оптимистического взгляда был в том, что сходные дуальности, как было известно, существуют в теориях, которые проще и лучше поняты, чем теории струн. Одним из примеров является версия теории Янга-Миллса, именуемая $N = 4$ супер-Янг-Миллсовская теория, которая имеет так много суперсимметрии, как это возможно. Для краткости назовем ее *максимально супер теорией*. Имеется хорошее доказательство, что эта теория имеет версию S-дуальности. Грубо это работает примерно так. Теория имеет в себе множество электрически заряженных частиц. Она также имеет некоторое количество эмерджентных частиц, которые переносят магнитные заряды. Теперь, обычно нет магнитных зарядов, а есть только магнитные полюса. Каждый магнит имеет два, и мы обозначаем их как северный и

южный. Но в специальных ситуациях могут быть эмерджентные магнитные полюса, которые двигаются независимо друг от друга, – они известны как *монополи*. Что происходит в максимально супер теории, так это то, что там есть симметрия, в рамках которой электрические заряды и магнитные монополи меняются местами. Когда это происходит, если вы измените величину электрического заряда на 1, деленную на исходную величину, вы ничего не измените в физике, описываемой этой теорией. Максимально супер теория является выдающейся теорией, и, как мы коротко увидим, она должна была сыграть центральную роль во второй суперструнной революции. Но теперь, когда мы немного понимаем в различных видах дуальностей, я могу объяснить гипотезу, которую Виттен обсуждал на своем знаменитом выступлении в Лос-Анжелесе.

Как я упоминал, ключевая идея сообщения Виттена была в том, что пять последовательных суперструнных теорий все были на самом деле одной и той же теорией. Но чем *была* эта единственная теория? Виттен нам не сказал, но он описал эффектное предположение о ней, которое заключалось в том, что теория, унифицирующая пять суперструнных теорий, должна была потребовать еще на одно измерение больше, так что пространство теперь имело десять измерений, а пространство-время – одиннадцать.[49]

Это особое предположение впервые было сделано двумя британскими физиками, Кристофером Халлом и Полом Таунсендом, годом ранее.[50] Виттен нашел много доказательств предположения, основанных на дуальностях, которые были найдены не только между пятью теориями, но и между струнными теориями и теориями в одиннадцати измерениях.

Почему объединение струнных теорий должно иметь на одно измерение больше? Свойство дополнительного измерения – радиус дополнительного круга в теории Калуцы-Кляйна – может быть интерпретирован как поле, изменяющееся вдоль других измерений. Виттен использовал эту аналогию, чтобы указать, что определенное поле в теории струн на самом деле являлось радиусом круга, простирающегося в одиннадцатом измерении.

Как может помочь это введение еще одного пространственного измерения? В конце концов, нет последовательной суперсимметричной теории струн в одиннадцати пространственно-временных измерениях. Но в одиннадцати пространственно-временных измерениях *была* суперсимметричная теория гравитации. Это, вы можете вспомнить из главы 7, наиболее высокоразмерная из всех супергравитационных теорий, настоящая гора Эверест супергравитации. Так что Виттен предположил, что одиннадцатимерный мир, на чье существование указывает дополнительное поле, мог бы быть описан – в отсутствие квантовой теории – одиннадцатимерной супергравитацией.

Более того, хотя это и не теория струн в одиннадцати измерениях, *есть* теория двумерных поверхностей, двигающихся в одиннадцатимерном пространстве-времени. Эта теория довольно красива, по крайней мере, на классическом уровне. Она была изобретена в начале 1980х и образно названа *одиннадцатимерной теорией супермембран*.

Теория супермембран до Виттена игнорировалась большинством струнных теоретиков, и по хорошей причине. Не было известно, могла ли теория быть согласована с квантовой механикой. Некоторые люди пытались объединить ее с квантовой теорией и потерпели неудачу. Когда в 1984 обсуждалась первая суперструнная революция, основанная на магических свойствах теорий в десяти измерениях, эти одиннадцатимерные теории были отброшены большинством теоретиков.

Но сейчас, следуя Виттену, струнные теоретики собрались реанимировать мембранную теорию в одиннадцати измерениях. Они пошли на это, так как заметили несколько ошеломительных фактов. Если вы выбираете одно из одиннадцати измерений в виде круга, вы можете скрутить одно измерение мембраны вокруг этого круга (см. Рис. 10). Это оставляет другое измерение мембраны свободным для движения в остающихся девяти измерениях пространства. Это одномерный объект, движущийся в девятимерном пространстве. Он выглядит точно как струна!

Виттен нашел, что вы можете получить все пять последовательных теорий суперструн путем скручивания

одного измерения мембраны разным способами вокруг круга; более того, вы получаете эти пять теорий и ни одной другой.

Это не все. Вспомним, что когда струна закручивается вокруг круга, имеются трансформации, именуемые *T*-дуальностью. В противоположность другим видам дуальностей, известно, что эта является точной. Мы нашли также такие дуальные преобразования, когда одно измерение мембраны скручено вокруг круга. Если мы интерпретируем эти преобразования в терминах теорий струн, которые мы получаем из скрученной мембраны, они, оказывается, дают точные сильно-слабые дуальности, которые соединяют эти струнные теории. Вы можете вспомнить, что такие особые дуальности были предположены, но не доказаны, за исключением специальных случаев. Теперь они понимаются, как происходящие из преобразований одиннадцатимерной теории. Это настолько прелестно, что тяжело не поверить в существование одиннадцатимерной единой теории. Единственная проблема остается открытой, это обнаружить такую теорию.

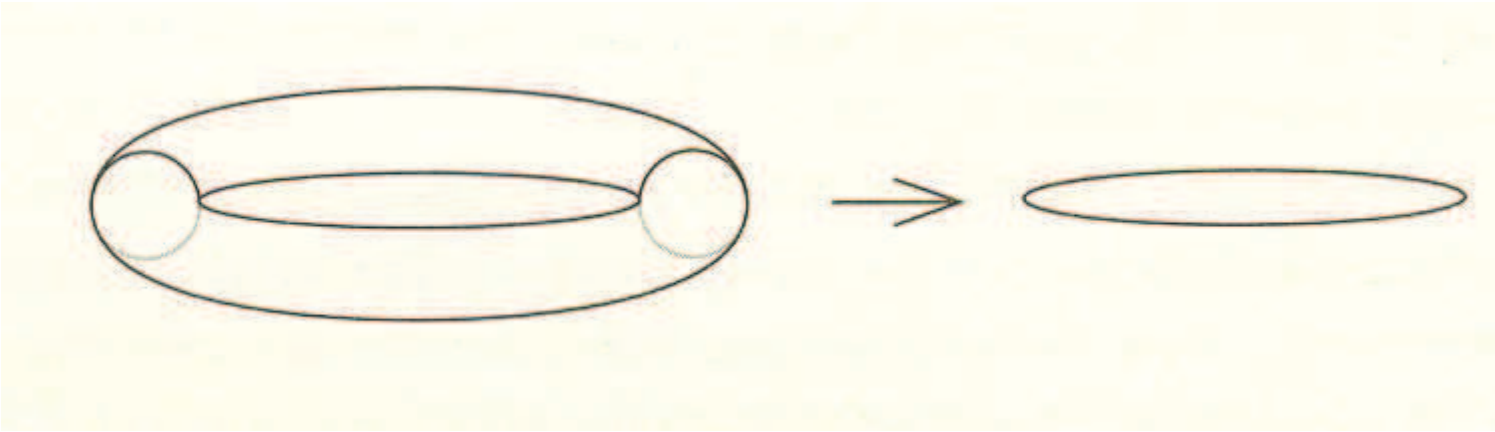

Рисунок 10. Слева мы имеем двумерную мембрану, которую мы можем представить накрученной на скрытое измерение, которое является маленьким кругом. При рассмотрении с достаточно большого расстояния (справа) это выглядит как струна, накрученная вокруг большого измерения.

Годом позже Виттен дал до сих пор неопределенной теории название. Ее наименование было примечательным: он назвал ее просто *M-теорией*. Он не захотел говорить, что обозначает «*M*», поскольку теория еще не существовала. Мы были приглашены заполнить остаток названия путем изобретения самой теории.

Выступление Виттена вызвало много вопросов. Если он был прав, это было значительное открытие. Одной из слушавших его персон был Джозеф Полчински, струнный теоретик, работающий в Санта Барбаре. Как он говорил об этом: "После выступления Эда я составил список двенадцати проблем для своей домашней работы, чтобы лучше понять это."[51] Домашняя работа привела его к открытию, которое потенциально является ключевым во второй суперструнной революции – что струнная теория не является только теорией струн. В десятимерном пространстве-времени живут и другие объекты.

Люди, которые не знают многого об аквариумах, думают, что они связаны только с рыбами. Но аквариумные энтузиасты знают, что рыбы это только первое, что притягивает ваш взгляд. Процветающий аквариум полон растительной жизни. Если вы попытаетесь снабдить аквариум только рыбами, это не будет хорошо. Вы вскоре получите рыбный морг. Оказывается, что во время первой суперструнной революции, с 1984 по 1995, мы были похожи на любителей, пытающихся сделать аквариум только с рыбами. Мы упускали большую часть из того, что было необходимо, чтобы сделать систему работающей, пока Полчински не открыл потерянные элементы.

В конце 1995 Полчински показал, что теория струн, чтобы быть последовательной, должна включать не

только струны, но и поверхности более высокой размерности, движущиеся в фоновом пространстве.[52] Эти поверхности также являются динамическими объектами. Точно так же, как и струны, они свободны для движения в пространстве. Если струна, которая является одномерным объектом, может быть фундаментальной, почему двумерная поверхность не может быть фундаментальной? В высших размерностях, где очень много места, почему не могут быть трех-, четырех-, или даже пятимерные поверхности? Полчински нашел, что дуальности между струнными теориями не могли бы быть разработаны последовательно без наличия в теории высоко размерных объектов. Он назвал их *D-бранами*. (Термин «брана» происходит от «мембрана», которая является двумерной поверхностью; «*D*» обозначает технические детали, которые я не хочу пытаться здесь объяснить). Браны играют особую роль в жизни струн: Они являются местами, на которых могут оканчиваться открытые струны. Обычно концы открытых струн свободно путешествуют через пространство, но иногда концы струны могут быть ограничены в жизни на поверхности браны (см. Рис.11). Это происходит потому, что браны могут переносить электрические и магнитные заряды.

С точки зрения струн браны являются добавочными свойствами фоновой геометрии. Их существование обогащает струнную теорию через значительное увеличение числа возможных фоновых геометрий, в которых могли бы жить струны. Кроме скручивания дополнительных измерений в некоторой усложненной геометрии, вы можете скручивать браны вокруг петель и поверхностей в этой геометрии. Вы можете иметь столько бран, сколько вам нравится, и они могут скручиваться вокруг компактифицированных измерений произвольное число раз. Таким способом вы можете создать бесконечное число возможных фонов для струнных теорий. Эта схема Полчински должна была иметь громадные последствия.

Браны также углубили наше понимание взаимосвязей между калибровочными теориями и струнными теориями. Они делают это через допущение новых способов возникновения симметрий в струнных теориях в результате нагромождения нескольких бран одна на другую. Как я уже упоминал, открытые струны могут оканчиваться на бранах. Но если несколько бран находятся в одном и том же месте, не имеет значения, на какой из них оканчивается струна. Это означает, что здесь работает некий вид симметрии, а симметрии, как описывалось в главе 4, приводят к калибровочным теориям. Следовательно, мы нашли новую связь между теорией струн и калибровочными теориями.

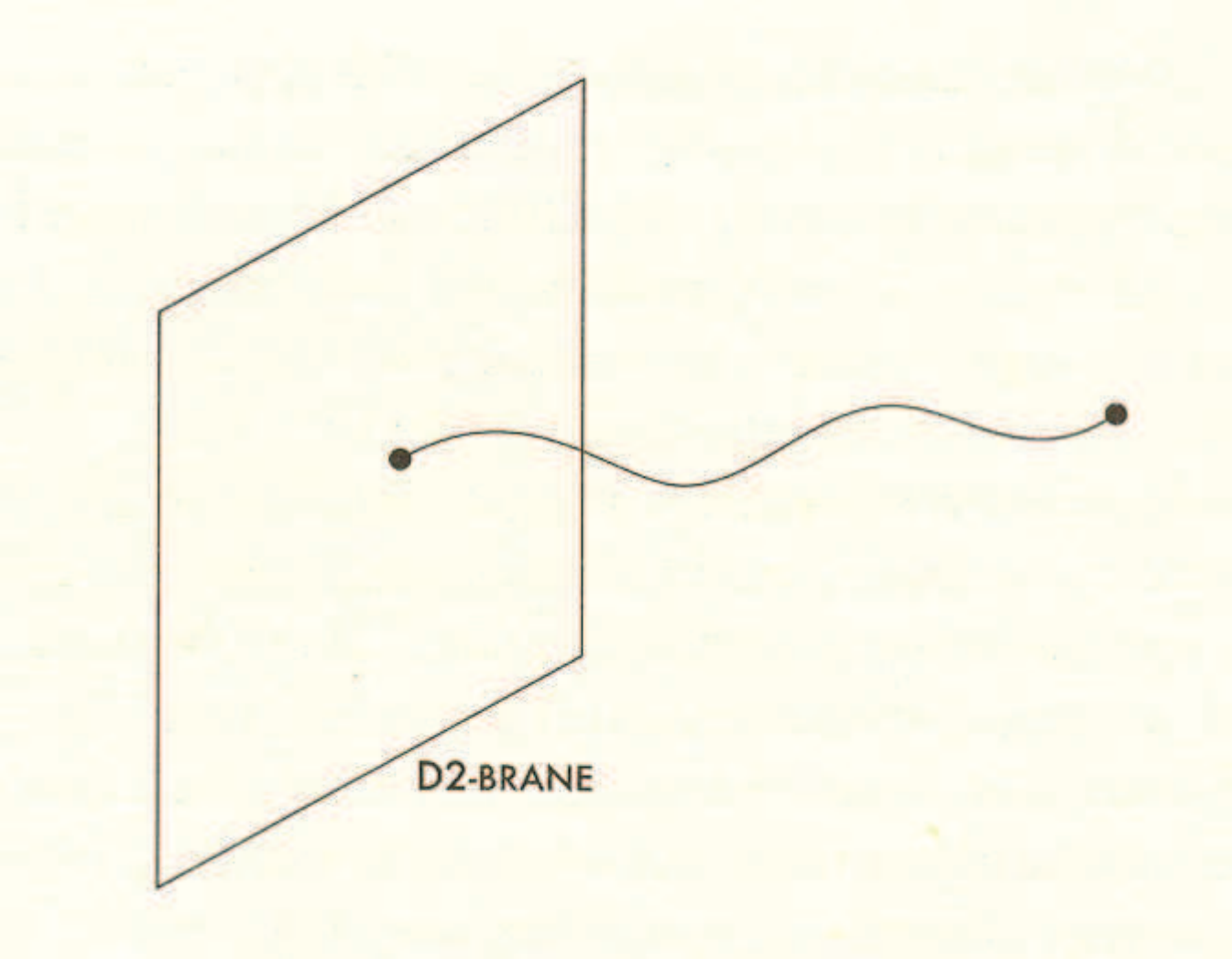

Рисунок 11. Двумерная брана, на которой оканчивается открытая струна.

Браны также открывают целый новый способ мышления о том, как наш трехмерный мир может быть связан с дополнительными пространственными измерениями теории струн. Некоторые из бран, которые открыл Полчински, являются трехмерными. Нагромождая трехмерные браны, вы получаете трехмерный мир с любой симметрией, какую хотите, плавающий в более высокоразмерном мире. Не может ли наша трехмерная вселенная быть такой поверхностью в более высокоразмерном мире? Это великая идея, и она дает возможную связь с областью исследований, именуемой *миры на бране*, в которой наша вселенная рассматривается как поверхность, плавающая во вселенной с большим числом измерений.

Браны все это сделали, но они сделали даже больше. Они сделали возможным описание некоторых специальных черных дыр в рамках теории струн. Это открытие Эндрю Строминджера и Кумруна Вафы в 1996 было, возможно, самым большим успехом второй суперструнной революции.

Взаимосвязь бран с черными дырами косвенная, но убедительная. Вот как это происходит: Вы начинаете с выключения гравитационной силы (вы делаете это, устанавливая струнную константу связи на нуле). Это может показаться странным для описания черных дыр, которые есть ничто иное, как гравитация, однако, посмотрим, что происходит дальше. С отключенной гравитацией мы можем рассмотреть геометрии, в которых многие браны накручены вокруг дополнительных измерений. Теперь мы используем факт, что браны переносят электрические и магнитные заряды. Оказывается, что имеется предел того, как много заряда может иметь брана, этот предел связан с массой браны. Конфигурации с максимально возможным зарядом очень специфичны и называются *экстремальными*. Они включают в себя одну из ситуаций, о которых мы говорили ранее, когда имеются дополнительные симметрии, которые позволяют нам проводить более точные вычисления. В особенности, такие ситуации характеризуются наличием нескольких

различных суперсимметрий, которые связывают фермионы и бозоны.

Имеется также максимальное количество электрического или магнитного заряда, которое может иметь черная дыра, и все еще быть стабильной. Они называются *экстремальными черными дырами*, и они многие годы изучались специалистами по ОТО. Если вы исследуете частицы, движущиеся на этом фоне, вы также найдете несколько различных суперсимметрий.

Удивительно, но, несмотря на факт, что гравитационная сила была выключена, экстремальная система бран, оказывается, делит некоторые свойства с экстремальными черными дырами. В особенности, идентичны термодинамические свойства двух систем. Таким образом, через изучение термодинамики экстремальных бран, накрученных на дополнительные измерения, мы можем воспроизвести термодинамические свойства экстремальных черных дыр.

Одной из проблем физики черных дыр было объяснение открытия Якоба Бекенштейна и Стивена Хокинга, что черные дыры имеют энтропию и температуру (см. главу 6). Новая идея из теории струн такова, – по крайней мере, в случае экстремальных черных дыр, – что вы можете продвинуться в изучении аналогичных систем экстремальных бран, свернутых вокруг дополнительных измерений. Фактически, многие свойства двух систем в точности одинаковы. Это почти сверхъестественное совпадение возникает потому, что в обоих случаях имеется несколько различных суперсимметричных преобразований, связывающих фермионы и бозоны. Оказывается, они позволяют сконструировать убедительную математическую аналогию, которая заставляет термодинамики двух систем быть идентичными.

Но это была не вся история, вы могли бы также изучить черные дыры, которые были *почти* экстремальны, в которых имелось слегка меньше заряда, чем максимально возможное количество. На стороне бран вы также могли бы изучить коллекцию бран, которые имели заряд немного меньше максимального. Сохранится ли все еще взаимосвязь между бранами и черными дырами? Ответ да, и в точности да. Пока вы очень близки к экстремальным случаям, свойства двух систем близко соответствуют друг другу. Это более строгий тест на соответствие. На каждой стороне имеются сложные и четкие соотношения между температурой и другими величинами, такими как энергия, энтропия и заряды. Два случая согласуются очень хорошо.

В 1996 я слушал лекцию об этих результатах молодого аргентинского постдока по имени Хуан Малдасена на конференции в Триесте, где я проводил летнее свободное время. Я был сражен. Определенность, с которой поведение бран соответствовало физике черных дыр, немедленно убедила меня опять посвятить отдельное время работе в теории струн. Я порасспрашивал Малдасену за обедом в пиццерии с видом на Адриатику, и нашел его одним из умнейших и самых проницательных молодых струнных теоретиков, с которыми я когда-либо сталкивался. Одной из вещей, которые мы обсудили этой ночью за вином и пиццей, было, могут ли системы бран быть более, чем просто моделями черных дыр. Не обеспечивают ли они истинное объяснение энтропии и температуры черных дыр?

Мы не смогли ответить на этот вопрос, и он остался открытым. Ответ зависит от того, насколько существенными являются указанные результаты. Здесь мы сталкиваемся с ситуацией, которую я описывал в других случаях, где дополнительная симметрия приводит к очень значительным находкам. Имеются, еще раз, две точки зрения. Пессимистическая точка зрения придерживается того, что взаимосвязь между двумя системами, вероятно, является случайным следствием того факта, что обе системы имеют много дополнительной симметрии. Для пессимиста тот факт, что расчеты красивы, не подразумевает, что они приводят к общим прозрениям по поводу черных дыр. Напротив, пессимист обеспокоен тем, что расчеты красивы именно потому, что они зависят от весьма специальных условий, которые не могут быть распространены на типичные черные дыры.

Однако, оптимист верит, что все черные дыры могут быть поняты с использованием таких же идей и что дополнительные симметрии, присутствующие в специальных случаях, просто позволяют нам более точно провести вычисления. Как и с сильно-слабой дуальностью, мы все еще не знаем достаточно, чтобы решить, прав ли оптимист или пессимист. В этом случае имеется дополнительное беспокойство, заключающееся в

том, что кучи бран не являются черными дырами, поскольку гравитационная сила была выключена. Предполагалось, что они могли бы стать черными дырами, если бы гравитационная сила была медленно включена. Фактически, это можно представить происходящим в теории струн, поскольку величина гравитационной силы пропорциональна полю, которое может изменяться в пространстве и времени. Но проблема в том, что такой процесс, когда гравитационная сила изменяется во времени, всегда было для теории струн тяжело описать конкретно.

Как бы ни был удивителен его труд по черным дырам, Малдасена только стартовал. В конце 1997 он опубликовал поразительную статью, в которой он предложил новый вид дуальности.[53] Дуальности, которые мы отмечали до сих пор, действовали между теориями одного и того же вида, живущими в пространстве-времени с одинаковым числом измерений. Революционная идея Малдасены заключалась в том, что теория струн могла бы иметь дуальное описание в терминах калибровочной теории. Это поразительно, поскольку теория струн есть теория гравитации, тогда как калибровочная теория живет в мире без гравитации, в фиксированном фоновом пространстве-времени. Более того, мир, описываемый струнной теорией, имеет больше измерений, чем калибровочная теория, которая ее представляет.

Один из способов понять предложение Малдасены заключается в том, чтобы вспомнить идею, которую мы обсуждали в главе 7, в которой теория струн может возникнуть из изучения линий потока электрического поля. Здесь линии потока электрического поля становятся основным объектом теории. Будучи одномерными, они выглядят как струны. В большинстве случаев эмерджентные струны, которые возникают из калибровочных теорий, не ведут себя как те виды струн, о которых говорят струнные теоретики. В особенности, они не кажутся имеющими что-то общее с гравитацией и они не обеспечивают унификации сил.

Однако Александр Поляков предположил, что в определенных случаях эмерджентные струны, связанные с калибровочной теорией, могут вести себя как фундаментальные струны. Тем не менее, струны калибровочной теории не могли бы существовать в нашем мире; вместо этого, с помощью одного из самых замечательных трюков воображения в истории предмета Поляков предположил, что они могли бы двигаться в пространстве, которое имеет одно дополнительное измерение.[54]

Как Поляков преуспел в колдовском вызове дополнительного измерения, чтобы его струны могли двигаться? Он нашел, что, когда проводится квантовомеханическое рассмотрение, струны, которые возникают из калибровочной теории, имеют эмерджентные свойства, которые, как оказалось, могут быть описаны числом, прикрепленным к каждой точке струны. Число также может быть интерпретировано как дистанция. В этом случае Поляков предположил, что число, прикрепленное к каждой точке струны, интерпретируется как задающее положение этой точки в дополнительном измерении.

Принимая это новое эмерджентное свойство во внимание, было более естественным рассматривать линии электрического потока поля как живущие в пространстве с одним добавочным измерением. Таким образом, Поляков пришел к предположению о дуальности между калибровочным полем в мире с тремя пространственными измерениями и теорией струн в мире с четырьмя пространственными измерениями.

Хотя общее предположение этого вида сделал Поляков, именно Малдасена был тем, кто усовершенствовал идею. В мире, который он изучал, наши три пространственных измерения принимают максимально супер теорию – калибровочную теорию с максимальным количеством суперсимметрии. Он изучил эмерджентные струны, которые могли бы возникать как дуальное описание этой калибровочной теории. Расширяя аргумент Полякова, он нашел доказательство, что теория струн, описывающая такие эмерджентные струны, на самом деле является десятимерной суперсимметричной теорией струн. Из девяти измерений пространства, в котором живут эти струны, четыре подобны измерениям из гипотезы Полякова. Тогда остаются пять измерений, которые являются дополнительными измерениями, как это описывалось Калуцей и Кляйном (см. главу 3). Дополнительные пять измерений сворачиваются как сфера. Четыре измерения Полякова тоже искривляются, но противоположным относительно сферы образом; такие пространства иногда называют седлообразными (см. Рис. 12). Они соответствуют вселенным с темной энергией, но где темная энергия является отрицательной.

Предположение Малдасены было намного более сильным, чем оригинальная гипотеза Полякова. Оно вызвало огромный отклик и стало темой тысяч статей, написанных позже. До настоящего времени оно не доказано, но было собрано много доказательств, что имеется, по меньшей мере, приблизительное соответствие между теорией струн и калибровочной теорией.

Было – и есть – множество ставок на это. Если предположение Малдасены о дуальности верно и две теории эквивалентны, тогда мы имеем точное квантовое описание квантовой теории струн. Любой вопрос, который мы хотим задать по поводу суперсимметричной теории струн, может быть переведен в вопрос о максимально супер теории, которая является калибровочной теорией. Это означает, в принципе, намного больше, чем мы имели в других случаях, где теория струн определялась на зависимом от фона уровне только через серию приближений.

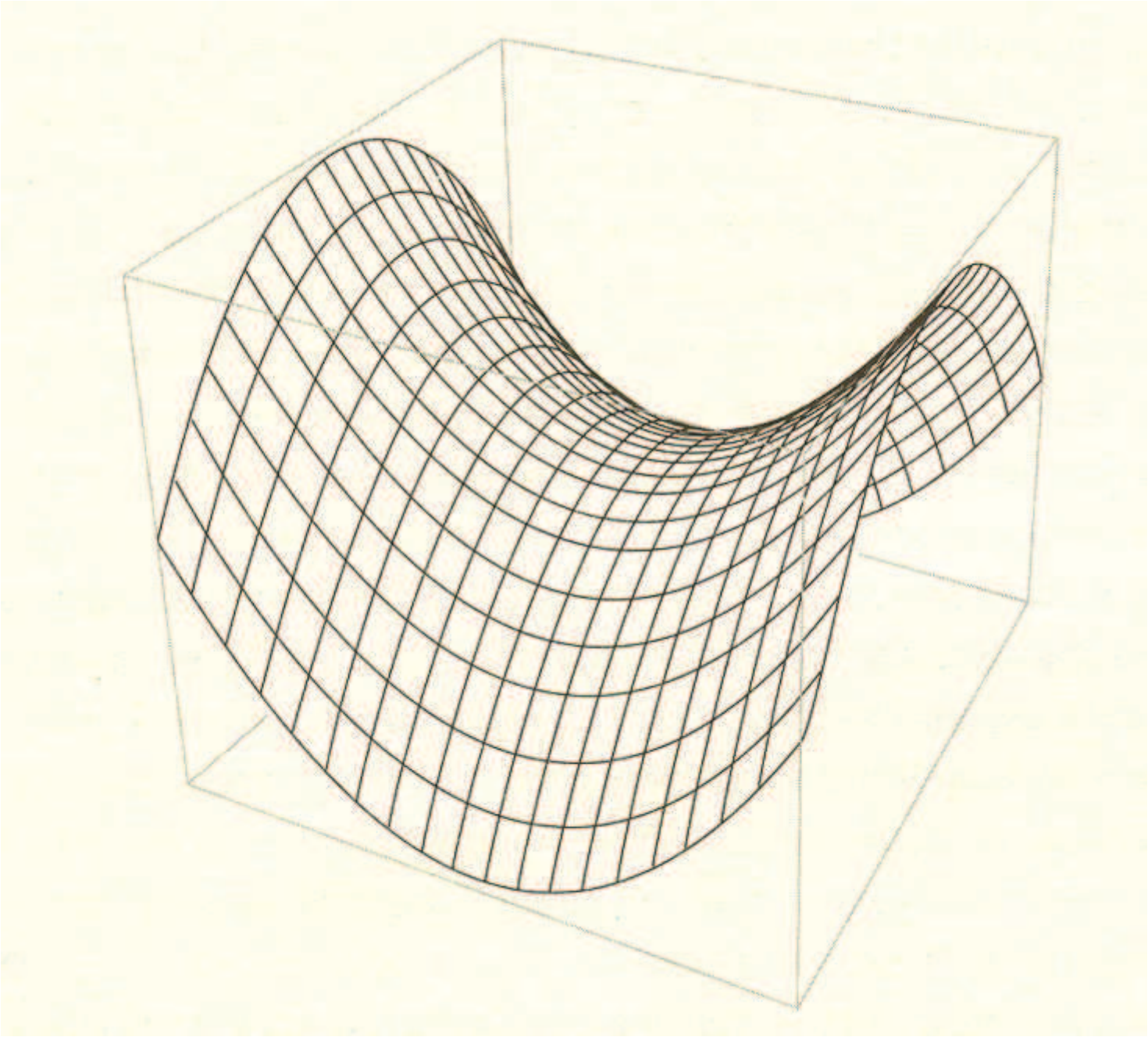

Рисунок 12. Седлообразная поверхность, которая является геометрией пространства во вселенных с отрицательной плотностью энергии.

Тут имеется, однако, несколько пояснений. Даже если все это верно, предположение о дуальности может

быть полезным только если одна сторона дуальности может быть точно определена. До настоящего времени было возможным определить существенную версию теории струн только в определенных специальных случаях. Таким образом, была надежда пойти другим путем и использовать предположение о дуальности, чтобы определить теорию струн в терминах максимально супер теории. Однако, хотя мы узнали намного больше о максимально супер теории, эта теория также еще не является строго определенной. Были надежды, что мы смогли бы сделать больше, но они остановились на серьезных технических проблемах.

Если предположение Малдасены ложно, тогда максимально супер теория и теория струн не эквивалентны. Однако, даже в этом случае есть существенные свидетельства, что на некоторых уровнях приближения имеются полезные взаимосвязи между ними двумя. Эти приближения могут не быть достаточно строгими, чтобы определить одну теорию в терминах другой, но они делают возможным рассчитать некоторые свойства одной теории по отношению к другой. В этом направлении было проделано большое количество плодотворной работы.

Например, на низшем уровне приближения десятимерная теория является просто версией ОТО, расширенной до десяти измерений и дополненной суперсимметрией. Она не содержит квантовой механики и хорошо определена. В этой теории легко проделать некоторые расчеты, такие как изучение распространения различных видов волн в десятимерной пространственно-временной геометрии. Замечательно, что даже если предположение Малдасены оказывается правильным только на низшем уровне приближения, это позволило нам рассчитать некоторые свойства соответствующей калибровочной теории в нашем трехмерном мире.

Это, в свою очередь, приводит к прозрениям в физике других калибровочных теорий. В результате имеются хорошие свидетельства того, что, по меньшей мере, на низшем уровне приближения струнные теории и калибровочные теории связаны тем способом, который придумал Малдасена. Является ли строгая форма предположения Малдасены верной или ложной – на самом деле, даже если сама теория струн является ложной, – мы добыли мощный инструмент для понимания суперсимметричных калибровочных теорий.

После нескольких лет интенсивных трудов эти материи остались темными. Проблема в том, что точно представляет собой взаимосвязь между теорией струн и максимально супер теорией. Большинство данных объясняется слабой формой предположения Малдасены, которая требует только, чтобы определенные величины в одной теории были вычислимы с использованием методов другой и только в определенном приближении. Это, как я уже отмечал, уже является результатом с важными применениями. Но большинство струнных теоретиков верит в сильную форму предположения Малдасены, в соответствии с которой две теории эквивалентны.

Эта ситуация напоминает предположение о сильно-слабой дуальности, в которой возможно продемонстрировать сильнейшие результаты только на очень специальном подпространстве состояний, где имеется много дополнительной симметрии. Как и в случае сильно-слабой дуальности, пессимисты беспокоились, что дополнительная симметрия заставила теории согласоваться, чего в известном смысле не было бы в ином случае, тогда как оптимисты были уверены, что дополнительная симметрия позволила нам достичь результатов, которые обнаруживали взаимосвязь, справедливую в более общем случае.

Конечно, на это сильно влияет, какая версия предположения Малдасены верна. Одно из мест, где это имеет значение, это описание черных дыр. Черные дыры могут возникать во вселенных с отрицательной темной энергией, так что можно попытаться использовать предположение Малдасены, чтобы изучить, как разрешается сформулированный Стивеном Хокингом информационный парадокс для черных дыр.

В зависимости от того, является ли соответствие между двумя теориями точным или приближенным, разрешение парадокса могло бы быть разным.

Предположим, что между теорией гравитации внутри черной дыры и калибровочной теорией имеется только частичное соответствие. В этом случае черная дыра может захватывать информацию навсегда – или

даже переправлять информацию в новую вселенную, рождающуюся из сингулярности в центре черной дыры, о чем давным давно рассуждали некоторые теоретики, такие как Джон Арчибальд Уилер и Брюс ДеВитт. Так что информация, в конце концов, не теряется с точки зрения ее жизни в новой вселенной, но информация теряется навсегда для наблюдателя на границе черной дыры. Эта потеря возможна, если калибровочная теория на границе содержит только частичную информацию про внутренности дыры. Но предположим, что соответствие между двумя теориями точное. Калибровочная теория не содержит ни горизонта, ни сингулярности, и нет места, в котором информация могла бы потеряться. Если это точно соответствует пространству-времени с черной дырой, информация не может потеряться и там тоже. В первом случае наблюдатель теряет информацию; во втором он сохраняет ее. Как об этом пишут, эту проблему еще предстоит решить.

Как мы не один раз видели, суперсимметрия играет в теории струн фундаментальную роль. Струнные теории, построенные вне суперсимметрии, содержат нестабильности; оставшись одни, они будут уничтожены, эмитируя все больше и больше тахионов в процессе, который не имеет конца, пока теория не разрушится. Это очень не похоже на наш мир. Суперсимметрия ликвидирует такое поведение и стабилизирует теории. Но в некотором отношении она делает это слишком хорошо. Это связано с тем, что суперсимметрия подразумевает, что имеется симметрия во времени, итог должен быть таков, что суперсимметричная теория не может быть построена на пространстве-времени, *которое эволюционирует во времени*. Таким образом, аспект теории, требуемый для ее стабилизации, также делает ее трудной для изучения вопросов, которые нам более уместно было бы задать квантовой теории гравитации, вроде того, что происходило во вселенной сразу после Большого Взрыва или что происходит глубоко внутри горизонта черной дыры. В том и другом случае геометрия быстро эволюционирует во времени.

Это типично для того, что мы узнали о теории струн во время второй суперструнной революции. Наше понимание сильно расширилось, следуя набору очаровательных, непредсказуемых результатов. Они дали нам дразнящие подсказки о том, что может быть верным, если можно было бы только заглянуть за всегда существующие покровы и увидеть реальные вещи. Мы старались, как могли, но многие расчеты, которые мы хотели проделать, остались недостижимыми. Чтобы получить любой результат, мы выбирали специальные примеры и условия. Во многих примерах мы так и остались в неведении, дали ли расчеты, который мы *смогли* проделать, те результаты, которые были бы правильным руководством к общей ситуации, или нет.

Я лично нахожу эту ситуацию очень разочаровывающей. Мы или сделали быстрый прогресс в направлении теории всего, или мы погнались за несбыточным, неразумно переинтерпретируя результаты, всегда принимая самое оптимистичное прочтение расчетов, которые мы оказались в состоянии проделать. Когда я жаловался на это некоторым из лидеров теории струн в середине 1990х, я не ощущал беспокойства, просто теория казалась умнее нас. Мы не можем, как я считал, непосредственно задать теории вопросы и дождаться ответов. Любая прямая попытка решить большие проблемы была связана с неудачей. Вместо этого, мы должны были доверять теории и следовать ей, довольствуясь рассмотрением той ее части, которая была готова к обнаружению с использованием наших несовершенных методов расчетов.

Имеется только одна загвоздка. Подлинная квантовая версия М-теории должна быть независимой от фона по той же причине, по которой независимой от фона должна быть любая квантовая теория гравитации. Но в добавление к аргументам, которые я растолковывал ранее, М-теория должна быть независимой от фона, поскольку пять суперструнных теорий со всем их различными многообразиями и геометриями предполагаются частью М-теории. Она включает все различные способы, по которым геометрии могли быть скручены во всех пространственных измерениях от единицы до десяти. Все эти геометрии обеспечивают фоны для движения струн и бран. Но если они являются частью одной единой теории, эта теория не может быть построена ни на одном фоне, поскольку она должна охватывать все фоны.

Тогда ключевая проблема в М-теории заключается в создании ее формулировки, которая согласуется с квантовой теорией и фоновой независимостью. Это важная проблема, вероятно, самый важный открытый

вопрос в теории струн. К сожалению, на этом пути был сделан незначительный прогресс. Были некоторые очаровательные подсказки, но мы все еще не знаем, что такое М-теория или имеется ли любая теория, достойная имени.

Был некоторый прогресс в подходе к квантово-механической М-теории, но, опять, на особом фоне. Это была попытка сделать квантовую теорию одиннадцатимерной мембранной теории, еще в 1980х. Три европейских физика, Бернар де Вит, Йенс Хоппе и Герман Николаи, нашли, что можно было бы применить трюк, в котором мембрана представляется двумерной таблицей или массивом чисел – называемым математиками *матрицей*. Их формулировка требовала, чтобы было девять таких таблиц, и из нее они получили теорию, которая аппроксимировала поведение мембраны.[55]

Де Вит и его коллеги нашли, что вы могли бы сделать их теорию согласованной с квантовой теорией. Была только одна заминка в том, что, чтобы описывать мембраны, матрица должна была простираться до бесконечности, тогда как квантовая теория, как можно показать, имеет смысл только если матрица конечна. Так что мы остались с предположением, что если квантовая теория могла бы быть последовательно расширена на бесконечные массивы чисел, она могла бы дать квантовую теорию мембран.

В 1996 четыре американских струнных теоретика реанимировали эту идею, но с ухищрениями. Томас Бэнкс, Вилли Фишер, Стивен Шенкер и Леонард Сасскайнд предположили, что на фоне одиннадцатимерного плоского пространства-времени та же самая матричная теория дает не только одиннадцатимерную мембранную теорию, но и всю М-теорию.[56] Эта матричная модель не дает полного ответа на то, что есть М-теория, поскольку она построена на особом фоне. Она работает на нескольких других фонах, но не может дать здравых ответов, когда более чем четыре измерения пространства скручены. Если М-теория верна, наш мир имеет семь скрученных измерений, так что это не достаточно хорошо. Более того, мы все еще не знаем, приводит ли модель к полностью последовательной квантовой теории, если матрица становится бесконечной.

К сожалению, М-теория остается дразнящей гипотезой. Соблазнительно поверить в нее. В то же время, в отсутствие реальной формулировки это не настоящая теория – это предположение о теории, в которую мы рады были бы поверить.

Когда я думаю о наших отношениях с теорией струн на протяжении лет, я вспоминаю одного дилера от искусства, которого представил мой друг. Когда мы встретились, он заметил, что он также является хорошим другом молодой писательницы, чьей книгой я восторгался; мы можем назвать ее «М». Несколькими неделями позже он позвонил мне и сказал: «Я разговаривал с М. на следующий день, и, вы знаете, она очень интересуется наукой. Не мог бы я встреться с вами двумя вместе когда-нибудь?» Конечно, я был ужасно польщен и взволнован и согласился на первое из нескольких приглашений на обед. На полпути через очень хорошее меню зазвонил телефон дилера. «Это М.», – пояснил он. – «Она недалеко. Она была бы рада прерваться и встретиться с вами. Это годится?» Но она так и не пришла. После десерта дилер и я имели большой разговор о соотношении между искусством и наукой. Через некоторое время мое любопытство по поводу того, появится ли М. на самом деле, перешло в мое замешательство по поводу моего старания встретиться с ней, так что я поблагодарил дилера и пошел домой.

Несколько недель спустя он позвонил, чрезмерно извинялся и снова пригласил меня на обед, чтобы встретиться с ней. Конечно, я пошел. С одной стороны, она ела только в лучших ресторанах; казалось, что управляющие некоторых из галерей искусств имеют статьи затрат, которые превосходят оклад академических ученых. Но та же сцена повторилась и в этот раз, и во время нескольких последующих обедов. Она звонила, затем проходил час, иногда два, прежде чем телефон дилера звонил снова: «О, я вижу, вы не сильно переживаете», или «Водитель такси не знает, где находится *Одеон*? Он увез вас в Бруклин? Из какого города он появился? Да, я согласен, очень скоро...» После двух лет такого дела я стал убеждаться, что картинка молодой женщины на обложке ее книги была фальшивой. Однажды ночью я сказал ему, что я, наконец, понял: это он был М. Он только улыбнулся и сказал: «Ну хорошо, да ... но она была бы так рада встретиться с вами.»

История теории струн похожа на мою бесконечно откладываемую встречу с М. Вы работаете над ней, даже если вы знаете, что это не настоящая вещь, поскольку она столь близка, что вы знаете, как ее получить. Между тем компания приятна и еда хороша. Время от времени вы слышите, что настоящая теория вот-вот будет открыта, но это как-то никогда не происходит. Через некоторое время вы уходите искать ее самостоятельно. Это выглядит хорошо, но тоже никогда ни к чему не приводит. В конце концов, вы имеете не намного больше того, с чего начинали: красивую картинку на обложке книги, которую вы никогда не сможете открыть.

10. Теория всего, чего угодно

В двух струнных революциях наблюдения почти не играли роли. Когда число струнных теорий росло, большинство струнных теоретиков продолжало верить в оригинальное представление о единой теории, которая даст однозначные предсказания для экспериментов, но результатов, указывающих в этом направлении, не было, и некоторые теоретики всегда беспокоились, что единая теория может никогда не возникнуть. Тем временем, оптимисты утверждали, что мы должны иметь веру и идти туда, куда ведет теория. Теория струн, как оказалось, делает настолько больше, чем требовалось от единой теории, что конец истории должен наверняка проявиться в ближайшее время.

В последние несколько лет, однако, произошло полное изменение в образе мыслей многих струнных теоретиков. Долго сохраняемые надежды на единую теорию пошли на убыль, и многие из них теперь уверены, что струнная теория должна пониматься как гигантский ландшафт возможных теорий, каждая из которых управляет разными регионами в сложной структуре вселенной.

Что привело к такому полному изменению в ожиданиях? Парадоксально, но это было противоречие с данными опыта. Но это не были данные, которые мы надеялись получить – это были данные, которые большинство из нас никогда не ожидало.

Хорошая теория должна нас удивлять; это означает, что, кто бы ее ни придумал, это должна быть ее работа. Но когда нас удивляют *наблюдения*, теоретики беспокоятся. Ни одно наблюдение в последние тридцать лет не было более опрокидывающим сложившийся порядок, чем открытие в 1998 темной энергии. Когда мы говорим, что энергия темная, мы имеем в виду, что она кажется отличающейся от всех ранее известных форм энергии и материи, так как она не ассоциируется с любыми частицами и волнами. Она просто есть.

Мы не знаем, что есть темная энергия; мы знаем о ней только потому, что мы можем измерить ее влияние на расширение вселенной. Она проявляется как источник гравитационного отталкивания, однородно распространенный по пространству. Поскольку она распределена равномерно, ничто не происходит внутри нее, ее везде одинаковое количество. Единственное влияние, которое она может оказывать, это влияние на среднюю скорость, с которой галактики разбегаются друг от друга. В 1998 году произошло следующее: Наблюдения за сверхновыми в удаленных галактиках показали, что расширение вселенной ускоряется таким образом, который лучше всего мог бы быть объяснен существованием темной энергии.[57]

Одной из вещей, которой может быть темная энергия, является нечто, именуемое *космологической константой*. Этот термин обозначает энергию с поразительным свойством: Свойства энергии, такие как ее плотность, кажутся точно одинаковыми для всех наблюдателей, независимо от того, где они находятся в пространстве и времени, и независимо от того, как они двигаются. Это в высшей степени необычно. Обычно энергия связана с материей, и имеется привилегированный наблюдатель, который двигается вместе с материей. Космологическая константа отличается. Она называется *константой*, поскольку вы получаете для нее одну и ту же универсальную величину, независимо от того, где и когда она измерялась и

как двигается наблюдатель. Поскольку это, кажется, не имеет источника и объяснения в терминах частиц или волн, двигающихся в пространстве, она называется *космологической* – то есть, она является свойством всей вселенной, а не какой-либо отдельной вещи в ней. (Я должен заметить, что мы еще не уверены, что темная энергия на самом деле имеет форму космологической константы; все свидетельства, которые мы имеем на сегодня, указывают на это, но в следующие несколько лет мы узнаем гораздо лучше, на самом ли деле плотность энергии не изменяется в пространстве и времени.)

Теория струн не предсказала темную энергию; даже хуже, наблюдаемую величину очень трудно приспособить к теории струн. Следовательно, ее открытие форсирует кризис в этой области. Чтобы понять, почему, мы должны вернуться назад и обсудить странную, жалкую историю космологической константы.

История началась около 1916, когда Эйнштейн отказал в доверии самому эффектному предсказанию его тогда еще новой ОТО. Он принял важный урок ОТО, который заключался в том, что геометрия пространства и времени эволюционирует динамически. Так что, когда люди начали применять его новую теорию к моделям вселенной, его не должно было удивить то, что они нашли, что вселенная тоже динамически эволюционирует во времени. Модели вселенных, которые они изучали, расширялись и сжимались; даже казалось, что они имеют начало и конец.

Но Эйнштейн *был* удивлен этими результатами – и пришел в ужас. От Аристотеля до того момента вселенная всегда мыслилась статической. Она могла быть создана Богом, но если так, она с тех пор не должна была изменяться. Эйнштейн был самым творческим и успешным физиком-теоретиком предыдущих двух столетий, но даже он не мог себе представить вселенную как нечто, отличающееся от вечного и неизменного. У нас есть соблазн сказать, что если Эйнштейн на самом деле был гением, он мог бы поверить в свою теорию больше, чем в предубеждения, и предсказать расширение вселенной. Но более продуктивным уроком будет именно то, насколько тяжело даже для самого смелого мыслителя отбросить убеждения, которые сохранялись тысячелетия.

Он заметил, что его уравнения гравитации допускают новую возможность, которая была в том, что плотность энергии пустого пространства может иметь величину – иными словами, она может быть не нулевой. Более того, эта универсальная плотность энергии должна быть одинаковой для всех наблюдателей, независимо от того, где и когда они делали наблюдения, независимо от того, как они двигались. Так что он назвал это космологической константой. Он нашел, что влияние константы зависит от ее знака. Когда она является положительным числом, она будет заставлять вселенную расширяться – не просто расширяться, но делать это в ускоренном темпе. Это отличается от влияния обычной материи, которая заставляет вселенную сжиматься вследствие взаимного гравитационного притяжения всей содержащейся в ней материи.

Так что Эйнштейн понял, что он должен использовать расширительную тенденцию нового члена для уравновешивания притяжения через гравитационную силу, таким образом добившись статичной и вечной вселенной.

Эйнштейн позже назвал космологическую константу своим самым большим просчетом. На самом деле он просчитался дважды. Во-первых, она не очень хорошо работала; она на самом деле не удерживала вселенную от сжатия. Вы могли бы сбалансировать сжатие, происходящее от материи, расширением, происходящим от космологической константы, но только на мгновение. Баланс по своей сути был нестабилен. Чуть-чуть пошевел*и*те вселенную – и она начнет расти или уменьшаться. Но реальный просчет был в том, что идея статической вселенной была ошибочной с самого начала. Десятилетием позже астроном по имени Эдвин Хаббл начал находить свидетельства, что вселенная расширяется. С 1920х космологическая константа стала помехой, чем-то, от чего надо избавиться. Но с течением времени это становилось все тяжелее и тяжелее сделать, по крайней мере, теоретически. Нельзя было просто выбрать ее равной нулю и проигнорировать. Подобно слону на углу, она была здесь, даже если вы притворялись, что ее нет.

Люди вскоре начали понимать, что квантовая теория могла бы кое-что сказать по поводу космологической

константы. К сожалению, это было прямо противоположным тому, что мы хотели бы услышать. Квантовая теория – в особенности, принцип неопределенности, – кажется, требует гигантской космологической константы. Если что-нибудь точно покоится, оно имеет определенное положение и импульс, а это противоречит принципу неопределенности, который говорит, что вы не можете знать оба эти свойства частицы. Следствие таково, что даже когда температура равна нулю, вещи двигаются. Имеется малая остаточная энергия, связанная с любой частицей и с любой степенью свободы даже при нулевой температуре. Она называется *энергией вакуума* или *энергией основного состояния*. Когда квантовая механика применяется к полям, таким как электромагнитное поле, имеется вакуумная энергия для любой моды колебаний поля. Но поле имеет гигантское количество мод колебаний; поэтому квантовая теория предсказывает гигантскую вакуумную энергию. В контексте ОТО Эйнштейна это подразумевает гигантскую космологическую константу. Мы знаем, что это неверно, поскольку это подразумевает, что вселенная должна была бы расширяться так быстро, что в ней совсем не смогли бы сформироваться никакие структуры. Тот факт, что имеются галактики, устанавливает очень сильные пределы на то, насколько большой может быть космологическая константа. Эти пределы примерно на 120 порядков величины меньше, чем предсказания, которые дает квантовая теория; это можно оценить поистине как наихудшее предсказание, когда-либо сделанное научной теорией.

Что-то тут крайне не правильно. Разумная персона могла бы принять точку зрения, что необходима радикально новая идея и что прогресс в объединении гравитации и квантовой теории не может быть достигнут, пока это рассогласование не будет объяснено. Несколько самых здравых людей прощупали этот путь. Одним из них был немецкий физик-теоретик Олаф Дрейер, который утверждал, что несовместимость между квантовой теорией и ОТО может быть разрешена, только если мы отбросим идею, что пространство является фундаментальным. Он предположил, что само пространство появляется из более фундаментального описания, которое совершено другое. Эта точка зрения также отстаивалась некоторыми теоретиками, которые проделали огромную работу в области физики конденсированной материи, такими как Нобелевский лауреат Роберт Лафлин и русский физик Григорий Воловик. Но большинство из нас, кто работает в фундаментальной физике, просто игнорируют этот вопрос и двигаются дальше в изучении наших различных подходов, даже если, по большому счету, они ничего не дают для его разрешения.

До недавнего времени была спасительная отсрочка: по меньшей мере, наблюдаемая величина космологической константы была нулевой – то есть, не было никаких свидетельств ускоренного темпа расширения вселенной. Это утешало, поскольку мы могли надеяться, что будут найдены новые принципы, которые совсем устранят затруднение из уравнений и сделают космологическую константу точно нулевой. Было бы намного хуже, если бы наблюдаемая величина оказалась бы некоторым маленьким, но ненулевым числом, поскольку намного тяжелее представить новые принципы, которые срезают число до намного меньшей, но все еще ненулевой величины. Таким образом, в течение десятилетий мы благодарили наших разных богов, что мы хотя бы не имели этой проблемы.

Космологическая константа представляет собой проблему для всей физики, но ситуация казалась чуть лучше для теории струн. Теория струн не могла объяснить, почему космологическая константа была равна нулю, но, по крайней мере, она объясняла, почему она не является положительным числом. Как одно из нескольких заключений, которые мы смогли получить из теории струн, было известно, что космологическая константа могла бы быть только равной нулю или отрицательной. Я не знаю ни одного струнного теоретика, который предсказал, что космологическая константа не должна быть положительным числом, но это было широко известное следствие струнной теории. Причины являются слишком техническими, чтобы обосновывать их справедливость здесь.

Фактически, изучались струнные теории с отрицательной космологической постоянной. Знаменитое предположение Малдасены, например, содержит пространство-время с отрицательной космологической постоянной. Имелось множество трудностей, и до сегодняшнего дня никто подробно не выписал детали теории струн в мире с отрицательной космологической постоянной. Но этот недостаток подробностей, как все были уверены, является технической проблемой – нет известных причин, почему этого не должно быть в принципе.

Вы можете представить себе сюрприз тогда, в 1998, когда наблюдения сверхновых начали показывать, что расширение вселенной являлось ускоренным, что означало, что космологическая константа должна была быть положительным числом. Это был подлинный кризис, поскольку проявилось явное рассогласование между наблюдениями и предсказаниями теории струн. В самом деле, имелись теоремы, указывающие, что вселенные с положительной космологической константой – по меньшей мере, пока мы пренебрегаем квантовыми эффектами, – не могут быть решениями теории струн.

Эдвард Виттен не из тех, кто предается пессимизму, однако, и он уныло заявил в 2001: "Я не знаю ни одного четкого способа получения пространства де Ситтера [вселенной с положительной космологической константой] из теории струн или М-теории."[58]

Философы и историки науки, среди которых Имре Лакатос, Пол Фейерабенд и Томас Кун, утверждали, что одной экспериментальной аномалии редко бывает достаточно, чтобы убить теорию. Если в теории достаточно глубоко уверена достаточно большая группа экспертов, они будут искать все более крайние меры, чтобы сохранить ее. Это не всегда плохо для науки, а порой бывает и очень хорошо. Временами защитникам теории сопутствует успех, и когда это происходит, могут быть сделаны великие и неожиданные открытия. Но иногда защитники терпят неудачу, и тогда растрачивается огромное количество времени и энергии, пока теоретики глубже и глубже закапываются в яму. История теории струн в последние несколько лет является одной из тех, которые Лакатос и Фейерабенд должны были хорошо понимать, это история большой группы экспертов, которые делают, что могут, чтобы сохранить заветную теорию перед лицом данных, которые кажутся ей противоречащими.

Что сохранило бы теорию струн – если она на самом деле сохранится – так это решение совершенно другой проблемы: как сделать высшие измерения стабильными. Вспомним, что в теориях с высшими измерениями скручивание дополнительных измерений производит множество решений.

Те, которые могли бы воспроизвести наблюдаемый нами мир, очень специальные, так как определенные аспекты геометрии высших измерений должны будут поддерживаться замороженными. С другой стороны, раз уж геометрия начинает изменяться, она может только продолжать двигаться, приводя либо к сингулярности, либо к быстрому расширению, которое сделает скрученные дополнительные размерности столь же большими, как и наблюдаемые нами измерения.

Струнные теоретики называют это *проблемой стабилизации модулей*, где слово «модули» обозначает общее название для констант, которые различают свойства дополнительных измерений. Это проблема, которую теории струн следовало решить, но долгое время было не ясно, как это сделать. Как и в других случаях, пессимисты были обеспокоены, хотя оптимисты были уверены, что раньше или позже мы найдем решение.

В этом случае оптимисты были правы. Прогресс начался в 1990е, когда некоторые теоретики в Калифорнии поняли, что ключом было использование бран для стабилизации высших измерений. Чтобы понять, как, нам надо принять во внимание одну особенность проблемы, которая заключается в том, что геометрия высших измерений может изменяться непрерывно, хотя и оставаться хорошим фоном для теории струн. Иными словами, вы можете изменять объем или форму высших измерений, и, делая это, перетекать через пространство различных струнных теорий. Это означает, что ничто не может остановить геометрию дополнительных измерений от эволюции во времени. Чтобы избежать этой эволюции, мы должны были найти класс теорий струн, среди которых было бы невозможно двигаться без разрывов. Один из способов сделать это заключался в нахождении струнных теорий, для которых каждое изменение является дискретным шагом – то есть, вместо гладкого течения среди теорий вы должны сделать большие, резкие изменения.

Джозеф Полчински сказал нам, что в теории струн на самом деле имелись дискретные объекты: браны. Вспомним, что имеются струнные фоны, в которых браны закручены вокруг поверхностей в дополнительных измерениях. Браны появляются в дискретных единицах. Вы можете иметь 1, 2, 17 или 2040197 бран, но не 1,003 браны. Поскольку браны переносят электрические и магнитные заряды, это

приводит к дискретным единицам электрического и магнитного потока.

Так в конце 1990х Полчински, работая вместе с одаренным постдоком по имени Рафаэль Буссо, начал изучение струнных теорий, в которых большие числа единиц электрического потока закручивались вокруг дополнительных измерений. Они смогли получить теории, в которых некоторые параметры больше не изменялись непрерывно.

Но можете ли вы заморозить все константы таким образом? Это потребовало намного более сложной конструкции, но ответ принес дополнительную выгоду. *Это сделало теорию струн с положительной космологической константой*.

Решающий прорыв был сделан в начале 2003 группой ученых из Стэнфорда, включая Ренату Каллош, первопроходца супергравитации и теории струн, Андрея Линде, который является одним из первооткрывателей инфляции, и двух лучших молодых струнных теоретиков, Шамита Качру и Сандипа Триведи.[59] Их труд сложен даже по стандартам струнной теории; он был охарактеризован их коллегой по Стэнфорду Леонардом Сасскайндом как «новое хитроумное изобретение Руби Голдберга*.» Но этот труд имел сильнейшее влияние, поскольку он решил как проблему стабилизации дополнительных измерений, так и проблему согласования теории струн с наблюдениями темной энергии.

---

* Рубен Лакиус Голдберг (Reuben Lucius Goldberg) – инженер и мультипликатор, обладатель Пулитцеровской премии. Умер в 1970 году, но до сих пор люди смеются над его комиксами, рассказывающими, как сделать простые вещи излишне сложными. – *(прим. перев.)*

Вот упрощенная версия того, что сделала Стэнфордская группа. Они стартовали с много раз изучавшегося вида теории струн – плоского четырехмерного пространства-времени с малой шестимерной геометрией в каждой точке. Они выбрали геометрию шести скрученных измерений в виде одного из пространств Калаби-Яу (см. главу 8). Как отмечалось, имеется, по меньшей мере, сотня тысяч таких пространств, и все, что вы можете сделать, это выбрать типичное из них, чья геометрия зависит от большого количества констант.

Затем они скрутили большое число электрических и магнитных потоков вокруг шестимерных пространств в каждой точке. Поскольку вы можете скрутить только дискретные единицы потока, это склоняет нестабильности к замораживанию. Чтобы дальше стабилизировать геометрию, вы должны обратиться к определенным квантовым эффектам, о которых не известно, как они возникают непосредственно из теории струн, но которые поняты в некоторых пределах в суперсимметричных калибровочных теориях, так что есть вероятность, что они играют роль и тут. Объединяя эти квантовые эффекты с эффектами от потоков, вы получаете геометрию, в которой все модули стабильны.

Это тоже можно сделать, так что в четырехмерном пространстве-времени появляется отрицательная космологическая постоянная. Оказывается, что чем меньше мы хотим иметь космологическую постоянную, тем больше потоков мы должны накрутить, так что мы накручиваем гигантское количество потоков, чтобы получить крошечную, но все еще отрицательную космологическую константу. (Как отмечалось, мы не знаем подробно, как записать детали теории струн на таком фоне, но нет причин полагать, что ее не существует.)

Но суть заключается в получении *положительной* космологической константы, подходящей к новым наблюдениям темпа расширения вселенной. Так что следующий шаг заключается в накручивании других бран вокруг геометрии и другим способом, который оказывает эффект возрастания космологической константы. Точно так же, как имеются античастицы, имеются антибраны, и Стэнфордская группа использовала здесь именно их. Путем накручивания антибран может быть добавлена энергия так, чтобы сделать космологическую константу малой и положительной. В то же время тенденция струнных теорий перетекать друг в друга подавлена, поскольку любое изменение требует дискретного шага. Таким образом, две проблемы были разом решены: удалены нестабильности и получена малая положительная

космологическая константа.

Стэнфордская группа могла бы сохранить теорию струн, по крайней мере, на время, от кризиса, сгенерированного космологической константой. Но путь, которым они это сделали, имел такие роковые и непредумышленные последствия, что это разбило струнное сообщество на фракции. До этого момента сообщество было в высшей степени единым. Прийти на конференцию по теории струн в 1990е было все равно, что прийти в Китай в начале 1980х, так как почти все, с кем вы разговаривали, казалось, пламенно поддерживали одну и ту же точку зрения. К лучшему или к худшему, но Стэнфордская группа разрушила единство партии.

Вспомним, что особая струнная теория, которую мы обсуждали, возникает из накручивания потоков вокруг компактных геометрий. Чтобы получить малую космологическую константу, вы должны накрутить много потоков. Но имеется более, чем один способ накручивания потока; фактически, имеется множество способов. Сколько?

Перед ответом на этот вопрос я должен подчеркнуть, что мы не знаем, *если это имеет место*, дают ли теории, сделанные с помощью накрученных вокруг скрытых размерностей потоков, хорошие последовательные квантовые теории струн. Вопрос слишком тяжел, чтобы ответить на него с использованием имеющихся у нас методов. Поэтому то, что мы делаем, это применяем тесты, которые дают нам *необходимые, но не достаточные* условия для существования хороших струнных теорий. Тесты требуют, чтобы струнные теории, если они существуют, имели слабо взаимодействующие струны. Это означает, что если мы могли бы проделать вычисления в струнных теориях, результаты были бы очень близки к предсказаниям приблизительных расчетов, которые мы в состоянии делать.

Вопрос, на который мы *можем* ответить, заключается в том, сколько струнных теорий удовлетворяет этим тестам, которые содержат скрученные потоки вокруг шести скрытых измерений. Ответ зависит от того, какую величину космологической константы мы хотим получить в итоге. Если мы хотим получить отрицательную или нулевую космологическую константу, имеется *бесконечное число различных теорий*. Если мы хотим теорию, дающую положительную величину для космологической константы, которая согласуется с наблюдениями, имеется конечное число; в настоящее время имеются свидетельства существования 10^{500} или около того таких теорий.

Это, конечно, чудовищное количество струнных теорий. Более того, каждая из них является особой. Каждая будет давать различные предсказания для физики элементарных частиц и различные предсказания для величин параметров стандартной модели.

Идея, что теория струн дала нам не одну теорию, а *ландшафт*, состоящий из множества возможных теорий, была предложена в конце 1980х и начале 1990х, но она была отвергнута большинством теоретиков. Как отмечалось, Эндрю Строминджер нашел в 1986, что имелось гигантское число, по-видимому, последовательных струнных теорий, и несколько струнных теоретиков продолжали беспокоиться по поводу итоговой потери предсказательности, хотя большинство из них остались уверенными, что должны появиться условия, при которых все сведется к однозначной и корректной теории. Но работы Буссо и Полчински, а также Стэнфордской группы, наконец, нарушили равновесие. Они дали нам гигантское число новых струнных теорий, как предполагал Строминджер, но что было новое, так это то, что эти числа были нужны для решения двух больших проблем: то есть, сделать теорию струн согласующейся с наблюдениями положительной вакуумной энергии и стабилизировать теории. Вероятно, по этим причинам, огромный ландшафт теорий в конце концов начал рассматриваться не как причудливый результат, который должен быть проигнорирован, а как способ сохранения теории струн от фальсификации.

Другой причиной того, что идея ландшафта была принята, было, очень просто, что теоретики были обескуражены. Они потратили много времени на поиск принципа, который бы выбрал единственную теорию струн, но такой принцип не был открыт. После второй революции теория струн сейчас намного лучше понята. Дуальности, в особенности, сделали более сложным утверждение, что большинство струнных теорий должны быть нестабильны. Таким образом, струнные теоретики начали принимать

огромный ландшафт возможностей. Вопрос, двигающий все направление, больше не заключался в поиске однозначной теории, а свелся к тому, как делать физику с такой гигантской коллекцией теорий.

Один из ответов – сказать, что это невозможно. Даже если мы ограничимся теориями, которые согласуются с наблюдениями, их окажется так много, что некоторые из них всегда будут определенно давать вам такой ответ, какой вы хотите. Почему просто не принять эту ситуацию как *сведение к абсурду*? Это лучше звучит на латыни (*reductio ad absurdum*), но более честно сказать на нашем языке: Если попытка сконструировать единую теорию природы привела вместо этого к 10^{500} теорий, этот подход свелся к нелепости.

Это болезненно для тех, кто вложил годы и даже десятилетия своей трудовой жизни в теорию струн. Если это болезненно для меня, посвятившего определенное количество времени на эти попытки, то я могу только вообразить, как должны себя чувствовать некоторые мои друзья, которые положили на теорию струн всю свою карьеру. Тем не менее, даже если удар судьбы подобен аду, признание *сведения к абсурду* кажется рациональным и честным откликом на ситуацию. Этот отклик выбрали несколько людей, которых я знаю. Но это не тот отклик, который выбрало большинство струнных теоретиков.

Имеется другой рациональный ответ на ситуацию: отвергнуть утверждение, что существует громадное число струнных теорий. Аргументы в пользу новых теорий с положительной космологической константой базируются на радикальных приближениях; возможно, они приводят теоретиков к уверенности в теориях, которые не существуют математически, не говоря о физической стороне вопроса.

Фактически, свидетельства в пользу огромного числа струнных теорий с положительной космологической константой базируются на очень косвенных аргументах. Мы не знаем, как реально описать струны, двигающиеся в этих фонах. Более того, мы можем определить некоторые необходимые условия существования струнной теории, но мы не знаем, являются ли эти условия также и *достаточными*, чтобы теория существовала. Тогда нет доказательства, что теория струн реально существует в любом из этих фонов. Так что здравомыслящие персоны могут сказать, что, возможно, их и нет. В самом деле, имеются недавние результаты – от Гэри Хоровица, одного из первооткрывателей пространств Калаби-Яу, и двух его более молодых коллег, Томаса Хертога и Кенго Маэды, – которые поднимают вопросы о том, описывает ли любая из этих теорий стабильные миры.[60] Можно или принять такое свидетельство всерьез, или проигнорировать его, что многие струнные теоретики и делают. Возможная нестабильность, найденная Хоровицем и его сотрудниками, задевает не только ландшафт новых теорий, найденный Стэнфордской группой, но и все решения, которые содержат шестимерные пространства Калаби-Яу. Если эти решения на самом деле все нестабильны, это означает, что большуя часть работы, направленной на соединение теории струн с реальным миром, нужно будет выбросить на свалку.

В настоящее время имеются также дебаты об обоснованности некоторых предположений Стэнфордской группы.

В начале первой суперструнной революции казалось сверхъестественным, что любая струнная теория вообще существует. Что в итоге их имеется пять было даже еще более удивительным. Абсолютная невероятность скрепляла нашу уверенность в проекте. Если сначала было невероятным, что это работает, а затем оно заработало – ну, это было никак не меньше, чем чудо. Сегодня струнные теоретики готовы признать существование ландшафта, содержащего громадное число теорий, основанного на гораздо меньших доказательствах, чем нам было нужно двадцать лет назад, чтобы убедиться, что единичная теория существует.

Так что одним из способов подвести черту является просто сказать: «Мне нужно убедиться, что эти теории существуют, используя те же стандарты, которые мы требовали десятилетия назад, чтобы оценить первые пять теорий.» Если вы настаиваете на тех стандартах, тогда вы не поверите в огромное число новых теорий, поскольку доказательств любой теории в текущем ландшафте значительно меньше по сравнению со старыми стандартами. Это та точка зрения, к которой я решил склониться большую часть времени. Она просто кажется мне самым рациональным прочтением доказательств.

11. Антропное решение

Многие физики, которых я знаю, снизили свои ожидания по поводу того, что теория струн является фундаментальной теорией природы, – но не все. В последние несколько лет стало модным утверждать, что проблема связана не с теорией струн, а с нашими ожиданиями, как должна выглядеть любая физическая теория. Этот аргумент был введен пару лет назад Леонардом Сасскайндом в статье, озаглавленной «Антропный ландшафт теории струн»:

«На основании недавней работе нескольких авторов кажется правдоподобным, что ландшафт невообразимо велик и разнообразен. Нравится нам это или нет, такое поведение повышает доверие к антропному принципу. ... [Теории в ландшафте Стэнфордской группы] совсем не просты. Они создали аварийное устройство, новое хитроумное изобретение Руби Голдберга*, которое едва ли могло иметь фундаментальное значение. Но в антропной теории простота и элегантность не являются предметом рассмотрения. Единственным критерием для выбора вакуума является пригодность, то есть содержит ли он необходимые элементы, такие как формирование галактик и сложную химию, которая необходима для жизни. Это вместе с космологией, которая гарантирует высокую вероятность того, что, по меньшей мере, один большой участок пространства будет сформирован с такой вакуумной структурой, есть все, что нам нужно.» [61]

Антропный принцип, на который ссылался Сасскайнд, это старая идея, предлагаемая и рассматриваемая космологами с 1970х, работающая с фактом, что жизнь может возникнуть только в экстремально узком диапазоне всевозможных физических параметров и еще, достаточно странно, мы здесь, якобы, потому, что вселенная выстроена так, чтобы мы смогли приспособиться (отсюда термин «антропный»). Специфическая версия, которую привлек Сасскайнд, является космологическим сценарием, который некоторое время пропагандируется Андреем Линде, именуемым *вечная инфляция*. В соответствии с этим сценарием быстрая инфляционная фаза ранней вселенной приводит не к одной, а к бесконечному семейству вселенных. Вы можете думать об изначальном состоянии вселенной как о фазе, которая экспоненциально расширяется и никогда не останавливается. В ней возникают пузырьки, и в этих местах расширение разительно замедляется. Наш мир является одним из таких пузырьков, но имеется бесконечное количество других. К этому сценарию Сасскайнд добавил идею, что когда формируется пузырек, некоторым естественным процессом выбирается одна из громадного числа струнных теорий, чтобы управлять этой вселенной. Результатом является гигантское семейство вселенных, каждая из которых управляется струнной теорией, хаотически выбранной из ландшафта теорий. Где-нибудь в этой так называемой мультивселенной имеется любая возможная теория из ландшафта.

Я нахожу прискорбным, что Сасскайнд и другие воспользовались антропным принципом, поскольку некоторое время назад было осознано, что это очень убогое основание, чтобы делать на нем науку. Поскольку каждая возможная теория управляет некоторой частью мультивселенной, мы можем сделать очень мало предсказаний. Нетрудно увидеть, почему.

Чтобы сделать предсказание в теории, которая постулирует гигантское семейство вселенных, удовлетворяющих хаотически выбираемым законам, мы должны были бы сначала записать все вещи, которые мы знаем о нашей собственной вселенной. Эти вещи будут применимы также и к некоторому числу других вселенных, и мы можем обозначить это подмножество вселенных, где указанные факты верны, как *возможно правильные вселенные*.

Все, что мы знаем, это что наша вселенная является одной из возможно правильных вселенных. Задав, что семейство вселенных произведено посредством хаотического распределения фундаментальных законов

природы между ними, мы можем узнать еще немного. Мы можем сделать новое предсказание, только если каждая или почти каждая возможно правильная вселенная имеет свойство, не входящее в список свойств, которые мы уже наблюдаем в нашей собственной вселенной.

Например, предположим, что в почти каждой возможно правильной вселенной большинство резонансных колебаний подчиняется закону *C*. Тогда в высшей степени вероятно, что вселенная, случайно выбранная из возможно правильных вселенных, будет резонировать по закону *C*. Поскольку мы ничего не можем узнать о нашей собственной вселенной, за исключением того, что это возможно правильная вселенная, мы можем предсказать с высокой вероятностью, что наша вселенная тоже подчиняется закону *C*.

Проблема в том, что, поскольку распределение теорий среди всех вселенных предполагается хаотичным, имеется очень мало свойств, подобных этому. Наиболее вероятно, раз уж мы перечислили свойства, которые мы наблюдаем в нашей собственной вселенной, оставшиеся свойства, которые любая вселенная может иметь, будут распределены хаотически среди других возможно правильных вселенных. Таким образом, мы не можем сделать никаких предсказаний.

То, что я описал, космологи называют *слабым антропным принципом*. Как указывает название, единственная вещь, которую мы можем узнать о нашей вселенной, это что она поддерживает разумную жизнь; следовательно, любая возможно правильная вселенная должна быть местом, где разумная жизнь смогла бы существовать. Сасскайнд и другие утверждают, что этот принцип совсем не нов. Например, как нам объяснить факт, что мы находимся на планете, расположенной так, что температура находится в пределах, в которых вода жидкая? Если мы уверены, что имеется только одна планета во вселенной, мы должны расценить этот факт как приводящий в замешательство. У нас появляется соблазн склониться к вере в необходимость разумного создателя. Но раз уж мы знаем, что имеется огромное число звезд и множество планет, мы понимаем, что только случайно тут будут планеты, благоприятствующие жизни. Следовательно, мы не удивляемся, находясь на одной из них.

Однако имеется большая разница между планетной аналогией и космологической ситуацией, которая в том, что мы не знаем ни одной вселенной, за исключением нашей собственной. Существование семейства других вселенных есть гипотеза, которая не может быть подтверждена прямым наблюдением; поэтому она не может быть использована в целях объяснения. Верно, что *если* имеется семейство вселенных со случайно распределенными законами, мы не должны быть удивлены, находясь в одной, где мы можем жить. Но факт, что мы находимся в биологически благоприятной вселенной, не может быть использован для подтверждения теории, что имеется огромное семейство вселенных.

Имеется контраргумент, который мы можем проиллюстрировать на примере планет. Допустим, что было бы невозможно наблюдать ни одну другую планету. Если мы отсюда делаем вывод, что, фактически, имеется только одна планета, это заставит нас поверить в нечто весьма маловероятное, а именно, что единственная существующая планета биологически благоприятна. С другой стороны, если мы предположим, что имеется много планет с хаотическими свойствами, даже если мы никогда не наблюдаем их, тогда вероятность, что некоторые из них благоприятны для жизни, намного повышается – фактически, она приближается к 1. Следовательно, это доказывает, что намного более вероятно, что имеется много планет, чем только одна единственная.

Но этот, очевидно, сильный аргумент ошибочен.* Чтобы увидеть, почему, сравним его с другим аргументом, который может быть сделан из тех же данных. Некто, кто верит в разумное творение, мог бы утверждать, что если имеется только одна планета и она благоприятна для жизни, есть высокая вероятность, что это работа разумного создателя. При выборе между двумя теориями – (1) единственная планета благоприятна для жизни только благодаря экстремальному везению и (2) был разумный создатель, который сделал эту единственную планету и сделал ее благоприятной для жизни, – та же логика приведет нас к заключению, что более рационально выбрать вторую альтернативу.

---

* Использованный здесь ошибочный принцип подобен следующему. Пусть мы наблюдаем *O* и используем два объяснения. При

объяснении *A* вероятность *O* очень мала, но при объяснении *B* вероятность велика. Появляется соблазн сделать из этого заключение, что вероятность намного больше для *B*, чем для *A*, но не имеется принципа логики или теории вероятностей, который допускал бы такое заключение.

Сценарий множества ненаблюдаемых вселенных играет ту же самую логическую роль, как и сценарий разумного создателя. Каждый обеспечивает непроверяемые гипотезы, которые, если они верны, делают нечто маловероятное кажущимся вполне вероятным.

Часть причины, по которой эти аргументы ошибочны, в том, что они полагаются на несформулированное предположение – что мы имеем в руках полный список альтернатив. Возвращаясь к планетной аналогии, мы не можем предотвратить возможность, что истинное объяснение пригодности нашей планеты для жизни возникнет когда-нибудь в будущем. Ошибочность двух аргументов в том, что оба сравнивают единственную возможность объяснения – но непроверяемую – с установкой, что нет возможного объяснения. Конечно, только при этих двух выборах объяснение кажется более рациональным, чем необъяснимая невероятность.

За сотни лет мы получили хорошие основания для уверенности, что имеется очень много планет, поскольку имеется очень много звезд, – а недавно мы подтвердили существование внесолнечных планет непосредственным наблюдением. Так что мы уверены в многопланетном объяснении пригодности нашей планеты для жизни. Но когда речь идет о пригодности для жизни нашей вселенной, мы имеем, по меньшей мере, три возможности:

1. Наша вселенная одна из гигантской коллекции вселенных с хаотическими законами.

2. Имеется разумный создатель.

3. Имеется до сегодняшнего дня неизвестный механизм, который как объяснит пригодность нашей вселенной для жизни, так и сделает проверяемые предсказания, с помощью которых это объяснение можно будет подтвердить или фальсифицировать.

При том, что первые две возможности принципиально не проверяемы, самым рациональным было бы придерживаться третьей возможности. В самом деле, это единственная возможность, которую мы должны рассматривать как ученые, поскольку принятие одной из двух первых будет означать конец нашей сферы деятельности.

Некоторые физики утверждают, что слабый антропный принцип должен быть принят всерьез, поскольку он приводил в прошлом к истинным предсказаниям. Я говорю здесь о некоторых людях, которыми я больше всего восхищаюсь, – не только о Сасскайнде, но также и о Стивене Вайнберге, физике, который, как вы можете вспомнить из главы 4, вместе с Абдусом Саламом объединил электромагнитные и слабые ядерные силы. Тем огорчительнее мне заключить, что в каждом случае, куда я заглянул, утверждения были обоснованы неверно.

Рассмотрим, например, следующее утверждение о свойствах ядер углерода, базирующееся на исследованиях, проведенных в 1950е великим британским астрофизиком Фредом Хойлом. Это утверждение часто принимают за демонстрацию того, что реальные физические предсказания могут быть основаны на антропном принципе. Утверждение начинается с наблюдения, что для существования жизни должен быть углерод. В самом деле, углерод есть в изобилии. Мы знаем, что он не мог быть создан при Большом Взрыве, поэтому мы знаем, что он должен был быть сделан в звездах. Хойл заметил, что углерод мог бы сформироваться в звездах, только если бы существовало определенное резонансное состояние ядра углерода. Он сообщил это предсказание группе экспериментаторов, которые и нашли его.

Успех предсказания Хойла иногда используется как поддержка эффективности антропного принципа. Но аргумент о жизни в начале предыдущего абзаца не имеет логической связи с последней частью абзаца. Хойл сделал следующее: он вывел из наблюдений, что вселенная полна углерода, заключение о необходимости наличия некоторого процесса, с помощью которого весь этот углерод был сделан. Тот факт, что мы и другие живые организмы сделаны из углерода, не является необходимым для его утверждения.

Другой аргумент, часто приводимый в поддержку антропного принципа, заключается в предсказании по поводу космологической константы, сделанном в знаменитой статье Стивена Вайнберга в 1987. В ней он обратил внимание, что космологическая константа должна быть меньше определенной величины, в противном случае вселенная расширялась бы слишком быстро, чтобы могли сформироваться галактики.[62] Поскольку мы наблюдаем, что вселенная полна галактик, космологическая константа должна быть меньше этой величины. И она меньше, как и должно быть. Это совершенно хорошая наука. Но Вайнберг обсудил этот приемлемый научный аргумент дальше. Он сказал, что, предположим, имеется мультивселенная и предположим, что величины космологической константы распределены среди входящих в нее вселенных хаотически. Тогда среди возможно правильных вселенных типичная величина космологической константы будет порядка величины, максимально возможной для согласования с формированием галактик. Поэтому, если сценарий мультивселенной верен, мы должны ожидать, что космологическая константа имеет настолько большую величину, насколько она может быть, чтобы все еще допустить формирование галактик.

Когда Вайнберг опубликовал это предсказание, была общая уверенность в том, что космологическая константа должна быть равна нулю. Так что было впечатляющим, что его предсказание реализовалось грубо в пределах фактора 10. Однако, когда новые результаты заставили более тщательно проверить установки Вайнберга, возникли некоторые проблемы. Вайнберг рассматривал семейство вселенных, в которых только космологическая константа была хаотически распределена, тогда как все другие параметры принимались фиксированными. Вместо этого он должен был усреднить по всем членам мультивселенной, согласующимся с формированием галактик, позволяя *всем* параметрам изменяться. Используя этот способ, получим, что предсказание величины космологической константы оказывается намного больше.

Это иллюстрирует устойчивую проблему с рассуждениями такого типа. Если ваш сценарий содержит хаотически распределенные параметры, из которых вы можете наблюдать только один набор, вы можете получить широкий диапазон различных предсказаний в зависимости от точности предположений, которые вы можете сделать о неизвестном, ненаблюдаемом семействе других наборов. Например, каждый из нас является членом многих сообществ. Во многих из них мы являемся типичными членами, но во многих других мы нетипичны. Предположим, что в моей авторской биографии на обложке книги все, что я напишу, это что я являюсь типичной персоной. Как много вы информации сможете вывести обо мне?

Имеется много других случаев, в которых некоторые версии слабого антропного принципа могут быть проверены. В рамках стандартной модели физики элементарных частиц имеются константы, которые просто не имеют величин, которые, как мы могли бы ожидать, они должны иметь, если они выбираются хаотическим распределением среди семейства возможно правильных вселенных. Мы могли бы ожидать, что массы кварков и лептонов, за исключением их первого поколения, должны были бы быть распределены хаотически, но между ними наблюдаются соответствия. Мы могли бы ожидать, что некоторые симметрии элементарных частиц должны были бы быть нарушены сильным ядерным взаимодействием в большей степени, чем они нарушены на самом деле. Мы могли бы ожидать распад протона с намного более быстрым темпом, чем это позволяют настоящие экспериментальные ограничения. Фактически, мне не известны успешные предсказания, которые были сделаны через рассуждения о мультивселенной с хаотическим распределением законов.

Но как насчет третьей возможности, что объяснение пригодности нашей вселенной для жизни основано на проверяемых гипотезах? В 1992 я поставил на обсуждение предположение именно этого вида. Чтобы сделать проверяемое предсказание из теории мультивселенной, семейство вселенных должно быть далеко не хаотичным. Оно должно быть сложно структурированным, так что имеются свойства, которыми обладают все или большинство вселенных и которые не должны ничего делать с нашим существованием.

Отсюда мы можем предсказать, что наша вселенная обладает этими свойствами.

Один из способов получить такую теорию заключается в подражании способу естественного отбора, работающему в биологии. Я придумал такой сценарий в конце 1980х, когда стало ясно, что теория струн может перейти в очень большое число версий. Из книги биологов-эволюционистов Ричарда Доукинса и Линна Маргулиса я узнал, что у биологов есть модель эволюции, которая базируется на пространстве возможных фенотипов, именуемом *пригодными ландшафтами*. Я усвоил идею и термин и придумал сценарий, в котором вселенные рождаются из внутренних частей черных дыр. В своей книге *Жизнь космоса* (1997) я обстоятельно размышлял о следствиях этой идеи, так что я не буду здесь вдаваться в ее детали, за исключением замечания о том, что эта теория, которую я назвал *космологический естественный отбор*, делает настоящие предсказания. В 1992 я опубликовал два из них, и они с тех пор держатся, хотя они могли бы быть опровергнуты множеством экспериментов, проделанных за это время. Это (1) что не должно существовать более массивных нейтронных звезд, чем 1,6 масс Солнца, и (2) что спектр сгенерированных инфляцией флуктуаций – и, возможно, наблюдаемый космический микроволновой фон – должны согласовываться с простейшей из возможных версией инфляции, с одним параметром и одним полем инфлатона.[63]

Сасскайнд, Линде и другие критиковали идею космологического естественного отбора, поскольку они утверждали, что множество вселенных, созданных вечной инфляцией будет превосходить любое число сделанных через черные дыры. Чтобы рассматривать это возражение, важно знать, насколько надежным является предсказание вечной инфляции. Обстоятельства временами складываются так, что тяжело иметь инфляцию совсем без вечной инфляции. Тот факт, что некоторые предсказания инфляционной космологии подтвердились, принимается как свидетельство в ее пользу. Однако, двигаясь от инфляции к вечной инфляции, предполагается, что там нет препятствий для распространения заключений, связанных с нашей сегодняшним космологическим масштабом, на безмерно б*о*льшие масштабы. С этим имеется две проблемы: первая в том, что экстраполяция на б*о*льшие масштабы в настоящее время подразумевает в некоторых моделях инфляции экстраполяцию к слишком маленьким масштабам в ранней вселенной. (Я не буду объяснять этого здесь, но это верно для нескольких инфляционных моделей.) Это означает, что, чтобы получить инфляционную вселенную, безмерно б*о*льшую, чем наша современная вселенная, мы должны распространить описание ранней вселенной до времен безмерно меньших, чем планковское время, до которого эффекты квантовой гравитации доминировали над эволюцией вселенной. Это проблематично, поскольку обычное описание инфляции предполагает, что пространство-время является классическим и в нем нет эффектов квантовой гравитации; более того, некоторые теории квантовой гравитации предсказывают, что не бывает временного интервала, более короткого, чем планковское время. Вторая, имеются указания, что предсказания инфляции не удовлетворяются на самых больших масштабах, которые мы в настоящее время можем наблюдать (см. главу 13). Поэтому экстраполяция от инфляции к вечной инфляции попадает как в теоретические, так и в наблюдательные неприятности, так что она не кажется сильным возражением против космологического естественного отбора.

Несмотря на факт, что антропный принцип не приводит ни к каким реальным предсказаниям, и маловероятно, что приведет, Сасскайнд, Вайнберг и другие ведущие теоретики приняли его как сигнал о революции не только в физике, но и в нашей концепции того, что такое физическая теория. Вайнберг заявил в недавнем эссе:

«Самые большие успехи в истории науки были отмечены открытиями по поводу природы, но с определенного поворотного пункта мы делаем открытия по поводу самой науки. ... Теперь мы можем быть в новом поворотном пункте, радикальное изменение в котором мы принимаем как допустимое основание физической теории. ... Чем большее число возможных величин физических параметров обеспечивается струнным ландшафтом, тем больше струнная теория оправдывает антропное обоснование как новый базис физических теорий: Любые ученые, которые изучают природу, должны жить в части ландшафта, где физические параметры принимают значения, подходящие для появления жизни и ее эволюции в ученых.» [64]

Стивен Вайнберг заслуженно почитается за его вклад в стандартную модель, и его письменные работы

обычно выделяются убедительностью и сдержанной рациональностью. Но просто оценим, что, раз уж вы основываетесь на подобном, вы теряете способность отнести свою теорию к тому виду тестов, которые, как снова и снова показывает история науки, требуются для отсеивания правильных теорий из кучи красивых, но неверных. Чтобы делать это, теория должна предлагать особые и точные предсказания, которые можно либо подтвердить, либо отвергнуть. Если имеется высокий риск не получить подтверждения, то подтверждение гораздо выше ценится. Если нет ни того, ни этого риска, тогда нет способа продолжать науку.

Мне кажется, что полемика о том, как наука сталкивается с недавним огромным струнным ландшафтом, сводится к трем возможностям:

1. Теория струн верна и хаотическая мультивселенная верна, так что, чтобы приспособиться к ним, мы должны поменять правила, которыми управляется научная деятельность, поскольку в соответствии с обычной научной этикой мы не должны позволять себе верить в теорию, которая не делает однозначных предсказаний, на основании которых ее можно было бы подтвердить или опровергнуть.

2. В конце концов будет найден некотрый путь, чтобы вывести истинные и проверяемые предсказания из теории струн. Это может быть сделано либо через демонстрацию, что реально имеется однозначная теория, или через другую, нехаотическую теорию мультивселенной, которая приведет к подлинным проверяемым предсказаниям.

3. Теория струн не является правильной теорией природы. Природу лучше описывать другой теорией, которая должна быть еще открыта или должна быть еще принята, которая приводит к истинным предсказаниям, которые эксперимент в итоге подтвердит.

Для меня поразительным является число различных ученых, кто кажется не в состоянии принять возможность того, что как теория струн, так и гипотеза хаотической мультивселенной являются ложными. Вот подборка соответствующих комментариев:

«Антропный принцип настолько сильно идет против исторических целей теоретической физики, что я долго сопротивлялся ему даже после осознания его вероятной необходимости. Но сейчас я побежден.» – ДЖОЗЕФ ПОЛЧИНСКИ

«Те, кому не нравится антропный принцип, просто не хотят признавать очевидного.» – АНДРЕЙ ЛИНДЕ

«Возможное существование гигантского ландшафта является восхитительным развитием в теоретической физике, которое заставляет нас радикально переосмыслить многие из наших представлений. Мое инстинктивное чувство говорит, что это вполне может быть верным.» – НИМА АРКАНИ-ХАМЕД (Гарвардский университет)

«Я думаю, вполне правдоподобно, что ландшафт реален.» – МАКС ТЕГМАРК (Массачусетский технологический институт)

Даже Эдвард Виттен кажется поставленным в тупик: "Я в самом деле не могу сказать ничего резкого. Я думаю, мы узнаем больше."[65]

Среди процитированных здесь нет ни одной личности, кем бы я глубоко не восхищался. Тем не менее, мне кажется, что любая непредубежденная персона, не запятнавшая себя иррациональной верой в теорию

струн, должна бы ясно видеть эту ситуацию. Теория не способна сделать ни одного предсказания, через которые она может быть проверена, а некоторые из ее сторонников вместо того, чтобы согласиться с этим, пытаются изменить правила так, что их теория не будет нуждаться в проведении обычных испытаний, которым мы подвергаем научные идеи.

Кажется рациональным отвергнуть эти притязания и настоять на том, что мы не должны изменять правила науки только чтобы сохранить теорию, которая не смогла выполнить ожиданий, которые мы исходно к ней питали. Если теория струн не делает однозначных предсказаний для экспериментов и если она не объясняет по поводу стандартной модели физики частиц ничего такого, что ранее было загадочным, – оставляя в стороне очевидную установку, что мы должны жить во вселенной, где мы можем жить, – не кажется, что она может оказаться очень хорошей теорией. История науки видела множество падений многообещающих теорий. Почему это не еще один такой случай?

Мы с прискорбием пришли к заключению, что теория струн не делает новых, точных и фальсифицируемых предсказаний. Но, однако, она делает некоторые изумительные утверждения о мире. Смогут ли эксперимент или наблюдение однажды обнаружить доказательство для любого из этих удивительных свойств? Даже если нет определенных предсказаний за и против – предсказаний такого сорта, которые могли бы убить или подтвердить теорию, – не можем ли мы увидеть доказательство свойства, которое является центральным для струнного взгляда на природу?

Самым очевидным нововведением теории струн являются сами струны. Если бы мы могли исследовать струнный масштаб, не было бы проблем увидеть обильные свидетельства струнной теории, если она верна. Мы могли бы увидеть указания на то, что фундаментальные объекты одномерны, а не подобны точкам. Но мы не в состоянии провести эксперименты на ускорителях в пределах требуемых энергий. Есть ли иной путь, следуя которым, мы могли бы обнаружить сами струны? Могут ли струны быть как-то инициированы, чтобы стать больше, так что мы смогли бы их увидеть?

Один из таких сценариев был недавно предложен Эдмундом Копелэндом, Робертом Майерсом и Джозефом Полчински. При определенных очень специальных предположениях по поводу космологии может оказаться правильным, что некоторые очень длинные струны были созданы в ранней вселенной и продолжают существовать.[66] Расширение вселенной расширило их до таких размеров, что сейчас их длина составляет миллионы световых лет.

Это явление не ограничивается теорией струн. Некоторое время популярная теория о формировании галактик предполагала, что они начинаются от присутствия гигантских струн электромагнитного потока, оставшихся со времен Большого Взрыва. Эти космические струны, как их называют, никогда не работали с теорией струн, они были следствиями структуры калибровочных теорий. Они являются аналогами квантованных линий магнитного потока в сверхпроводниках, и они могут формироваться в ранней вселенной как следствие прохождения вселенной через фазовые переходы при ее охлаждении. Сегодня мы имеем определенные свидетельства из космологических наблюдений, что такие струны не были главной составляющей в формировании структуры вселенной, но несколько космический струн после Большого Взрыва все еще могли бы остаться. Астрономы ищут их через поиск их влияния на свет от удаленных галактик. Если космическая струна проходит через линию зрения, соединяющую наш взгляд и удаленную галактику, гравитационное поле струны будет действовать как линза, удваивая изображение галактики особым образом. Другие объекты, такие как темная материя или другие галактики, могут иметь сходный эффект, но астрономы знают, как провести различия между генерируемыми ими образами и изображениями, которые производятся космической струной. Недавно было сообщение, что такая линза могла быть обнаружена. Ее оптимистично назвали CSL-1 (Cosmic String Lens – линза на космической струне), но, когда на нее посмотрели через Космический телескоп Хаббла, оказалось, что это две близко расположенные друг к другу галактики.[67]

Что нашли Копелэнд и его коллеги, так это то, что при определенных специальных условиях

фундаментальные струны, растянутые расширением вселенной до огромных длин, могли бы иметь сходство с космическими струнами. Так что их можно было бы наблюдать через их действие, подобное линзам. Такие фундаментальные космические струны могли бы также быть очень большими излучателями гравитационных волн, которые могли бы наблюдаться на LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory – обсерватория гравитационных волн на лазерных интерферометрах).

Предсказания этого вида дают нам некоторую надежду, что теория струн однажды может быть проверена через наблюдения. Хотя открытие космических струн само по себе не может проверить теорию струн, поскольку несколько других теорий также предсказывают существование таких струн. Неудача в поиске таких струн не может привести к фальсификации теории струн, поскольку условия, при которые космические струны существуют, были выбраны специально, и нет причин думать, что они могут существовать в нашей вселенной.

Кроме существования струн есть три другие общие особенности струнного мира. Все осмысленные струнные теории согласуются с тем, что имеются дополнительные измерения, что все силы объединяются в одну силу и что существует суперсимметрия. Так что, даже если мы не имеем детальных предсказаний, мы можем увидеть, сможет ли эксперимент подтвердить эти гипотезы. Поскольку они независимы от теории струн, нахождение доказательств для любой из них не доказывает, что теория струн верна. Но противоположное здесь не имеет места: если мы узнаем, что нет суперсимметрии, или нет высших измерений или нет объединения всех сил, тогда теория струн является неверной.

Начнем с дополнительных измерений. Мы не в состоянии их увидеть, но мы определенно можем поискать их проявления. Одним из путей сделать это является поиск дополнительных сил, которые предсказываются всеми теориями с высшими измерениями. Эти силы передаются полями, которые заключают в себе геометрию дополнительных измерений. Такие поля должны быть здесь, поскольку вы не можете ограничить дополнительные измерения, чтобы они производили только те поля и силы, которые мы до сегодняшнего дня наблюдаем.

Силы, которые возникают из таких полей, ожидаются грубо столь же сильными, как и гравитация, но они могут отличаться от гравитации одним или многими свойствами: они могут иметь конечную область распространения, и они могут не взаимодействовать одинаково со всеми формами энергии. Некоторые текущие эксперименты экстраординарно чувствительны к таким гипотетическим силам. Около десяти лет назад один эксперимент показал предварительное свидетельство для такой силы, которую назвали *пятой силой*. Дальнейшие эксперименты не поддержали это утверждение, и на настоящий момент нет доказательств для таких сил.

Струнные теоретики обычно предполагали, что дополнительные измерения мизерны, но несколько предприимчивых физиков поняли в 1990х, что это не являлось обязательным условием – что дополнительные измерения могли бы быть большими или даже бесконечными. Это возможно в сценарии миров на бране. В такой картине наше трехмерное пространство на самом деле является браной – то есть чем-то, подобным мембране, но трехмерной – подвешенной в мире с четырьмя или более измерениями пространства. Частицы и силы стандартной модели – электроны, кварки, протоны вместе с силами, которыми они взаимодействуют, – ограничены в пределах трехмерной браны, составляющей наш мир. Так что, используя только эти силы, вы не сможете увидеть свидетельств дополнительных измерений. Единственное исключение составляет гравитационная сила. Гравитация, будучи универсальной, распространяется через все измерения пространства.

Этот вид сценария был впервые сконструирован в деталях тремя физиками, работающими в SLAC (Стэнфордском Линейном Ускорительном Центре), Нимой Аркани-Хамедом, Гиа Двали и Савасом Диопоулосом. На удивление, они нашли, что дополнительные измерения могли бы быть совсем большими без конфликта с известными экспериментами. Если имеется два дополнительных измерения, они могли бы быть порядка миллиметра в поперечнике.[68]

Главный эффект от добавления таких больших дополнительных измерений в том, что гравитационная сила

в четырех- или пятимерном мире, оказывается, может быть намного сильнее, чем это проявляется на трехмерной бране, так что эффекты квантовой гравитации происходят на намного большем масштабе длин, чем всегда ожидалось. В квантовой теории больший масштаб длин означает меньшую энергию. Делая дополнительные измерения размером в миллиметр, можно понизить масштаб энергий, при котором должны быть видны эффекты квантовой гравитации – от планковской энергии, которая есть 10^{19} ГэВ, всего лишь к 1000 ГэВ. Это разрешает один из самых стойких вопросов по поводу параметров стандартной модели, а именно: почему планковская энергия на столько порядков величины больше, чем масса протона? Но что на самом деле возбуждает, так это то, что это делает квантово-гравитационные явления наблюдаемыми в диапазоне, который достижим на Большом Адронном Коллайдере (LHC), запускающемся в 2007*. Среди этих эффектов могло бы быть рождение квантовых черных дыр в соударениях элементарных частиц. Это было бы значительное открытие.

Другой вид сценария мира на бране был разработан Лайзой Рэндалл из Гарварда и Раманом Сундрумом из Университета Джонса Гопкинса.

Они нашли, что дополнительные измерения могли бы быть бесконечными по размерам, пока в высокоразмерном мире имелась отрицательная космологическая константа.[69] Поразительно, это также согласуется со всеми наблюдениями на сегодняшний день и даже делает предсказания для новых наблюдений.

Это весьма смелые идеи и забавно подумать о них, и я глубоко восхищаюсь их изобретателями. Как упоминалось, мне с трудом даются сценарии мира на бране. Они уязвимы для тех же проблем, которые приговорили оригинальные попытки объединения через высшие размерности. Сценарии мира на бране работают, только если вы делаете специальные предположения о геометрии дополнительных измерений и способе, которым трехмерная поверхность, которая является нашим миром, помещается внутри них. В добавление ко всем проблемам, от которых страдали старые теории Калуцы-Кляйна, имеются новые проблемы. Если может быть одна брана, плавающая в высокоразмерном мире, почему их не может быть много? И если имеются другие, то как часто они сталкиваются? В самом деле, имеются преложения, по которым Большой Взрыв возник из-за столкновения миров на бранах. Но, если это может произойти один раз, почему с тех пор это больше не происходило? Прошло около 14 миллиардов лет. Ответ может быть в том, что браны встречаются редко, но в этом случае мы опять получаем тончайше настроенные условия.

Помимо этих проблем, я настроен скептически, поскольку эти сценарии зависят от специального выбора фоновой геометрии, а это противоречит главному открытию Эйнштейна, как изложено в его ОТО, что геометрия пространства-времени является динамической и что физика должна быть выражена независимым от фона способом. Тем не менее, это наука, какая она и должна быть: смелые идеи, которые можно протестировать возможными экспериментами. Однако, поясним. Если любое из предсказаний миров на бране окажется верным, это не будет означать подтверждения теории струн. Теории миров на бране стоят особняком, они не нуждаются в струнной теории. Также нет полностью разработанного понимания модели мира на бране в рамках теории струн. Наоборот, если ни одно из предсказаний миров на бране не обнаружится, это не фальсифицирует теорию струн. Миры на бране являются просто одним из способов, которым могли бы проявиться допонительные измерения теории струн.

Второе общее предсказание теории струн в том, что мир суперсимметричен. Здесь тоже нет фальсифицируемых предсказаний, поскольку мы знаем, что суперсимметрия, если она верно описывает мир, который мы видим, должна быть нарушена. В главе 5 мы отмечали, что суперсимметрия может быть обнаружена на LHC. Это возможно, но при этом не гарантировано, даже если суперсимметрия верна.

К счастью, имеется другой способ протестировать суперсимметрию. Одна из возможностей включает темную материю. Во многих суперсимметричных расширениях стандартной модели самые легкие новые частицы стабильны и не заряжены. Эти новые частицы могли бы быть темной материей. Они должны будут взаимодействовать с обычной материей, но только через гравитацию и слабые ядерные силы. Такие частицы называют ВИМПы (WIMPs – weakly interacting massive particles – слабо взаимодействующие массивные частицы), и готовится несколько экспериментов для их обнаружения. Эти детекторы

используют идею, что частицы темной материи будут взаимодействовать с обычной материей через слабые силы. Это делает их очень похожими на тяжелые версии нейтрино, которые тоже взаимодействуют с веществом только через гравитацию и слабые силы.

К несчастью, поскольку суперсимметричные теории имеют так много свободных параметров, нет особого предсказания, что за массу должны иметь ВИМПы или точно, насколько сильно они должны взаимодействовать. Но, если темная материя на самом деле состоит из них, мы можем вывести, какой диапазон допустим для их масс, предполагая, что они играют ту роль в формировании галактик, как мы думаем. Предсказанный диапазон совпадает с тем, что теория и эксперимент предполагают для легчайших суперпартнеров.

Экспериментаторы ищут ВИМПы, используя детекторы, подобные тем, которые использовались для обнаружения солнечных нейтрино и нейтрино, приходящих от удаленных сверхновых. Были проведены всесторонние поиски, но до сегодняшнего дня ВИМПы не найдены. Это, конечно, не окончательно – это означает только, что, если они существуют, они взаимодействуют слишком слабо, чтобы инициировать отклик детектора. Можно сказать, что если они взаимодействуют с веществом так же сильно, как нейтрино, они должны были бы быть видны к этому времени. Тем не менее, открытие суперсимметрии любым способом было бы впечатляющим триумфом для физики.

Главная вещь, которую надо держать в уме, что даже если теория струн требует, чтобы мир был суперсимметричным на некотором масштабе, она не дает предсказания, что это за масштаб. Таким образом, если суперсимметрия не будет найдена на LHC, это не фальсифицирует теорию струн, поскольку масштаб, на котором она может быть обнаружена, полностью подгоняется.

С другой стороны, обнаружение суперсимметрии не подтвердит теорию струн. Имеются обычные теории, которые требуют суперсимметрию, такие как минимальное суперсимметричное расширение стандартной модели. Даже среди квантовых теорий гравитации суперсимметрия не однозначно связана с теорией струн; например, альтернативный подход, именуемый *петлевая квантовая гравитация*, полностью согласуется с суперсимметрией.

Теперь мы подошли к третьему общему предсказанию теории струн: что все фундаментальные силы становятся едиными на некотором масштабе. Как и в других случаях, эта идея шире теории струн, так что ее подтверждение не докажет, что теория струн верна; на самом деле, теория струн допускает несколько возможных форм объединения. Но имеется одна форма, которая, как уверены большинство теоретиков, представляет *великое объединение*. Как мы обсуждали в главе 3, великое объединение делает общее предсказание, до сих пор не верифицированное, что протоны должны быть нестабильны и должны распадаться на некотором временном масштабе. Эксперименты искали распад протона и не нашли его. Эти результаты (или их отсутствие) убивают определенные теории великого объединения, но не общую идею. Однако, неудача поисков распада протона остается ограничением на возможные теории, включая суперсимметричные теории.

Большое число теоретиков верят, что все три из этих общих предсказаний будут подтверждены. Следовательно, экспериментаторы предпринимают огромные усилия в поиске свидетельств, которые поддерживают эти предсказания. Не является преувеличением сказать, что сотни карьер и сотни миллионов долларов были исчерпаны за последние тридцать лет в поиске знаков великого объединения, суперсимметрии и дополнительных измерений. Несмотря на эти попытки, не было обнаружено доказательств ни одной из этих гипотез. Подтверждение каждой из этих идей, даже если оно не могло бы быть принято за прямое подтверждение теории струн, было бы первым указанием, что, по меньшей мере, некоторая часть комплексной сделки, которую требует теория струн, скорее, подводит нас ближе к реальности, чем удаляет от нее.

12. Что объясняет теория струн

Что мы до сих пор должны были понять в странной истории теории струн? Сегодня прошло более чем два десятилетия с первой суперструнной революции. В течение этого времени теория струн доминировала в привлекаемом внимании и потребляемых ресурсах во всем мире – в ней работали более тысячи самых талантливых и высокоподготовленных ученых мира. Хотя имелось место для заслуживающего внимания несогласия по поводу перспектив теории, раньше или позже наука, предполагается, соберет доказательства, которые позволят нам достигнуть консенсуса по поводу истинности теории. Помня, что будущее всегда открыто, я хотел бы закрыть эту секцию, попытавшись оценить теорию струн как *проект для научной теории*.

Позвольте мне пояснить. Во-первых, я не оцениваю качество работы; многие струнные теоретики являются блестящими и хорошо подготовленными специалистами, а их труд – высочайшего качества. Второе, я хочу отделить вопрос, является ли теория струн убедительным кандидатом на физическую теорию, от вопроса, привели или нет исследования в теории к успешным прозрениям для математики или для других проблем в физике. Никто не подвергает сомнению, что из теории струн было получено много хорошей математики и что наше понимание некоторых калибровочных теорий было углублено. Но пригодность побочных результатов для математики или других областей физики не является доказательством за или против корректности теории струн как научной теории.

Что я хочу оценить, так это степень, с которой теория струн выполнила ее оригинальное обещание как теории, которая объединяет квантовую теорию, гравитацию и физику элементарных частиц. Является или нет теория струн кульминацией научной революции, которую Эйнштейн начал в 1905? Этот вид оценки не может основываться на нереализованных гипотезах, на недоказанных догадках или на надеждах сторонников теории. Это наука, и правильность теории может быть оценена только на основе результатов, которые опубликованы в научной литературе; так что мы должны позаботиться о проведениие различия между догадками, свидетельствами и доказательствами.

Можно спросить, не слишком ли рано проводить такую оценку. Но теория струн находится под непрерывной разработкой уже больше тридцати пяти лет, а более двадцати лет назад она захватила внимание многих ярчайших ученых мира. Как я подчеркивал ранее, в истории науки нет прецедента, по меньшей мере, с конца восемнадцатого века, чтобы для предложенной крупной теории прошло больше десятилетия или до ее падения, или до сбора впечатляющей экспериментальной и теоретической поддержки. Ссылки на экспериментальные трудности являются не убедительными по двум причинам: большинство данных, для объяснения которых теория струн была придумана, уже существуют в величинах констант стандартных моделей физики частиц и космологии. Второе, хотя верно, что струны слишком малы, чтобы наблюдать их непосредственно, предыдущие теории почти всегда быстро приводили к изобретению новых экспериментов – экспериментов, которые никто не мог бы и помыслить провести в противном случае.

В добавление, мы имели огромное количество данных для рассмотрения при проведении наших вычислений. Многие люди, работая в теории струн, дали нам огромный материал для обработки. Одинаково информативными являются догадки и гипотезы, которые остались открытыми, несмотря на интенсивное исследование. Большинство ключевых догадок, которые не разрешены, имеют, по меньшей мере, десятилетний возраст, и нет признаков, что они будут вскоре решены.

Наконец, в результате открытия громадного ландшафта теорий, описанного в главе 10, теория струн находится в кризисе, который приводит многих ученых к пересмотру своих обещаний. Таким образом, хотя мы должны помнить, что новое развитие может изменить картину, это означает, что наступило хорошее время, чтобы попытаться оценить теорию струн как научную теорию.

Первый этап оценки любой теории заключается в сравнении с наблюдением и экспериментом. Это

обсуждалось в последней главе. Мы узнали, что даже после всех трудов, которые были вложены в теорию струн, не имеется реалистичной возможности для определенного подтверждения или фальсификации однозначного предсказания из теории путем эксперимента, возможного к проведению в настоящее время.

Некоторые ученые могли бы принять это как причину, достаточную, чтобы сдаться, но теория струн была изобретена для решения определенных теоретических головоломок. Даже в отсутствие экспериментального теста мы могли бы быть готовы поддержать теорию, которая обеспечивает убедительные решения знаменитых проблем. В первой главе я описал пять главных проблем, стоящих перед теоретической физикой. Теория, которая закроет эйнштейновскую революцию, должна решить их все. Таким образом, будет честно оценить теорию струн, задав вопрос, насколько хорошо она делает это.

Начнем с точного перечисления, что мы знаем о теории струн.

Прежде всего, отсутствует полная формулировка теории. Нет общепринятых предложений о том, что представляют собой базовые принципы теории струн или каковы должны быть главные уравнения теории. Отсутствует доказательство, что такая полная формулировка существует. Что мы знаем о теории струн, состоит, большей частью, из приблизительных результатов и догадок, которые имеют отношение к следующим четырем классам теорий:

1. Наиболее хорошо понятые теории свойств струн, движущихся в простых фонах, таких как плоское десятимерное пространство-время, где геометрия фона не изменяется во времени, а космологическая константа равна нулю. Имеется также много случаев, где некоторые из девяти пространственных измерений свернуты, хотя остальные остаются плоскими. Эти теории мы лучше всего понимаем, поскольку могут быть проведены детальные расчеты струн и бран, двигающихся и взаимодействующих в этих фонах. В этих теориях мы описываем движение и взаимодействие струн в фоновых пространствах в терминах аппроксимационной процедуры, именуемой *теория возмущений*. Было обеспечено, что эти теории хорошо определены и дают конечные и последовательные предсказания вплоть до второго порядка этой аппроксимационной схемы. Другие результаты поддерживают, но до сегодняшнего дня не доказывают непротиворечивость этих теорий. Кроме того, большое число результатов и догадок описывают сеть соотношений дуальности между этими теориями. Однако, каждая из этих теорий не согласуется с установленными фактами о нашем мире. Большинство из них имеют ненарушенную суперсимметрию, которая не наблюдается в реальном мире. Некоторые из них, которые не имеют ненарушенной суперсимметрии, предсказывают, что фермионы и бозоны имеют суперпартнеров с одинаковой массой, которые также не наблюдаются, а также они предсказывают существование сил с бесконечной областью действия в дополнение к гравитации и электромагнетизму, которые опять же не наблюдаются.

2. В случае мира с отрицательной космологической константой имеется аргумент в пользу существования класса теорий струн, основывающихся на предположении Малдасены. Это связывает теорию струн в определенных пространствах с отрицательной космологической константой с определенными суперсимметричными калибровочными теориями. До настоящего момента эти теории струн не могли быть сконструированы и изучены явно, за исключением определенных, очень специальных, высокосимметричных предельных случаев. Наиболее слабые версии предположения Малдасены поддержаны большим количеством подтверждений, но точно не известно, какая из версий предположения верна. Если верна более сильная версия, то теория струн эквивалентна калибровочной теории, и это соотношение обеспечивает точное описание теорий струн с отрицательной космологической константой. Однако, эти теории также не могут описывать нашу вселенную, поскольку, как мы знаем, космологическая константа положительна.

3. Предсказывается существование бесконечного числа других теорий, что соответствует струнам, двигающимся в более усложненных фонах, в которых космологическая константа не равна нулю, в которых пространственно-временная фоновая геометрия эволюционирует во времени или в которых фон содержит браны и другие поля. Это включает громадное число случаев, где космологическая константа

положительна в согласии с наблюдениями. До настоящего момента не удалось точно определить эти струнные теории или провести явные вычисления, чтобы извлечь из них предсказания. Подтверждение их существования основывается на удовлетворении необходимых, но далеко не достаточных условий.

4. В двадцати шести пространственно-временных измерениях имеется теория без фермионов и суперсимметрии. Эта теория имеет тахионы, которые приводят к бесконечным выражениям, что показывает противоречивость теории.

Предполагается, что все догадки и сконструированные теории объединяются в более глубокой теории, именуемой М-теорией. Основная идея в том, что все теории, которые мы понимаем, соответствуют решениям этой более глубокой теории. Имеется подтверждение ее существования во многих дуальных взаимосвязях, которые предполагаются и демонстрируются сохраняющимися между различными теориями струн, но до сегодняшнего дня никто не смог сформулировать их основные принципы или выписать их основные законы.

Из этого обобщения мы можем видеть, почему любое вычисление в теории струн с необходимостью будет дискуссионным. Если мы ограничим наше внимание на теориях, о которые известно, что они существуют, – таких, которые позволяют нам проводить реальные вычисления и делать предсказания, – мы должны будем заключить, что теория струн не должна иметь ничего общего с природой, поскольку каждая такая теория не согласуется с экспериментальными данными. Так что надежда, что теория струн может описать наш мир, полностью основывается на вере в теории струн, чье существование только предполагается.

Тем не менее, многие работающие струнные теоретики уверены, что предполагаемые теории существуют. Эта уверенность, кажется, должна базироваться на косвенных рассуждениях, вроде следующих:

1. Они предполагают, что общая формулировка теории струн существует и определяется неизвестными принципами и неизвестными уравнениями. Эта неизвестная теория, как предполагается, имеет много решений, каждое из которых обеспечивает непротиворечивую теорию струн, распространяющихся в некотором фоновом пространстве-времени.

2. Затем они выписывают уравнения, которые предполагаются аппроксимирующими правильные уравнения неизвестной теории. Затем предполагается, что эти приблизительные уравнения дают необходимые, но не достаточные условия для фона, чтобы получить последовательные теории струн. Эти уравнения являются версиями теории Калуцы-Кляйна, в которую они включили ОТО, расширенную до высших размерностей.

3. Для любого такого решения этих приблизительных уравнений они предполагают существование теории струн, даже если они не могут записать ее явно.

Проблема с этими рассуждениями в том, что первый этап является догадкой. Мы не знаем, что теория или уравнения, которые его определяют, реально существуют. Это делает второй этап тоже догадкой. Итак, мы не знаем, что предполагаемые приблизительные уравнения дают нам достаточные, в противоположность необходимым, условия существования теории струн.

Имеется опасность в таком способе рассуждений – в допущении того, что нуждается в доказательстве. Если вы верите в предполагаемые доказательства, тогда теории, чье существование предполагается, могут изучаться как примеры теорий струн. Но необходимо помнить, что они *не являются* ни теориями струн, ни вообще теориями любого вида, а, скорее, решениями классических уравнений. Их смысл полностью зависит от существования теорий, которые никто не смог сформулировать, и предположений, которые

никто не смог доказать. Раз так, кажутся не убедительными основания для уверенности, что существует какая-либо теория струн, которая не была детально сконструирована.

Какие заключения можно сделать из всего этого? Первое, признавая незавершенное состояние знаний о теории струн, имеется широкий диапазон возможных вариантов будущего. Базируясь на том, что мы знаем сегодня, теория может оказаться хорошо оправдывающей исходные надежды. Возможно также, что вообще нет реальной теории и все, что когда-либо может быть, это большой набор приблизительных результатов о специальных случаях, которые удерживаются только потому, что ограничиваются специальными симметриями.

Кажется неизбежным заключение, что сама теория струн – то есть, теория струн, движущихся на фоновом пространстве-времени, – вряд ли является фундаментальной теорией. *Если теория струн вообще является важной для физики, это потому, что она обеспечивает подтверждение существования более фундаментальной теории*. Это в целом осознано, и фундаментальная теория имеет имя – М-теория, – даже если она еще не изобретена.

Это может не быть таким плохим, как кажется. Например, не известно, существуют ли на строгом уровне большинство квантовых теорий поля. Квантовые теории поля, которые изучают физики, занимающиеся частицами, – включая квантовую электродинамику, квантовую хромодинамику и стандартную модель, – разделяют с теорией струн тот факт, что они определены только в терминах процедуры приближений. (Хотя было доказано, что эти теории дают конечные и непротиворечивые результаты во всех порядках приближения). Тем не менее, имеется хорошее основание верить, что стандартная модель не существует как строго определенная математическая теория. Это не возмущает, пока мы верим, что стандартная модель является только шагом в направлении более глубокой теории.

Теория струн сначала мыслилась как такая более глубокая теория. На основании существующих свидетельств мы должны признать, что это не так. Подобно квантовым теориям поля, теория струн кажется приблизительной конструкцией, которая указывает (в той степени, в которой она соответствует природе) на существование более фундаментальной теории. Это не обязательно делает теорию струн не относящейся к делу, но чтобы продемонстрировать ее достоинства, необходимо действовать точно так же, как и в стандартной модели. Она должна предсказать нечто новое, что окажется правильным, и она должна объяснять наблюдаемые явления. Мы видели, что до настоящего времени она не делала первое. Делала ли она второе?

Мы можем ответить на это, оценив, насколько хорошо теория струн отвечает на пять ключевых проблем, подчеркнутых в главе 1.

Начнем с хороших новостей. Теория струн была исходно мотивирована третьей проблемой, проблемой *объединения частиц и сил*. Насколько она кажется правдоподобной как такая объединяющая теория?

Вполне хорошо. На фонах, где определены последовательные струнные теории, колебания струн включают состояния, которые соответствуют всем известным видам материи и сил. Гравитон, частица, которая переносит гравитационную силу, происходит из колебаний петель (то есть, замкнутых струн). Фотон, носитель электромагнитной силы, также появляется из колебаний струны. Более сложные калибровочные поля, в терминах которых формулируется наше понимание сильных и слабых ядерных сил, также возникают автоматически; то есть, теория струн предсказывает в целом, что имеются калибровочные поля, сходные с указанными, хотя она не предсказывает той особой смеси сил, которую мы видим в природе.

Таким образом, – по меньшей мере, на уровне бозонов или частиц, переносящих силы, на фоновом пространстве-времени – теория струн объединяет гравитацию с другими силами. Все четыре фундаментальные силы возникают как колебания одного фундаментального вида объекта, струны.

Как насчет объединения бозонов с частицами, составляющими вещество, вроде кварков, электронов и нейтрино? Оказывается, что они тоже возникают как состояния колебаний струн, когда добавляется суперсимметрия. Таким образом, суперсимметричные струнные теории объединяют все различные виды

частиц друг с другом.

Более того, теория струн делает все это с помощью простого закона: что струны распространяются через пространство-время так, чтобы заметать площадь минимальной величины. Здесь не нужны никакие законы, отдельно описывающие, как взаимодействуют частицы; законы, по которым взаимодействуют струны, следуют непосредственно из простого закона, который описывает, как они распространяются. И, поскольку все различные силы и частицы являются просто колебаниями струн, описывающие их законы тоже следуют отсюда. В самом деле, целый набор уравнений, описывающих распространение и взаимодействие сил и частиц, выводится из простого условия, что струна распространяется так, чтобы занимать минимальную площадь в пространстве-времени. Великолепная простота этого является тем, что возбуждало нас первоначально и что удерживает многих людей в том же возбуждении: отдельный вид сущности, удовлетворяющий отдельному простому закону.

Как насчет первой проблемы в главе 1, *проблемы квантовой гравитации*? Здесь ситуация смешанная. Хорошими новостями является то, что частицы, переносящие гравитационную силу, возникают из колебаний струн, как и факт, что гравитационная сила, оказываемая частицей, пропорциональна ее массе. Приводит ли это к последовательной унификации гравитации с квантовой теорией? Как я подчеркивал в главах 1 и 6, ОТО Эйнштейна является независимой от фона теорией. Это означает, что вся геометрия пространства и времени является динамической; ничто не является фиксированным. Квантовая теория гравитации также должна быть фоново-независимой. Пространство и время должны возникать из нее, а не служить задним планом для действий струн.

Теория струн в настоящее время не формулируется как независимая от фона теория. В этом ее главная слабость как кандидата на роль квантовой теории гравитации. Мы понимаем теорию струн в терминах струн и других объектов, двигающихся в фиксированных классических фоновых геометриях пространства, которое не эволюционирует во времени. Так что открытие Эйнштейна, что геометрия пространства и времени является динамической, не включено в теорию струн.

Интересно подумать, что в стороне от нескольких специальных одномерных теорий не существует строгой независимой от фона квантовой теории поля. Все они определяются только в терминах аппроксимационной процедуры. Вероятно, теория струн разделяет это свойство, поскольку она фоново-зависимая. Возникает соблазн предположить, что любая последовательная квантовая теория поля должна быть фоново-независимой. Если это верно, это будет означать, что унификация квантовой теории с ОТО не является необязательной, она является вынужденной.

Утверждается, что ОТО может быть в определенном смысле выведена из теории струн. Это существенное утверждение, и важно понимать смысл, в котором оно верно, то есть, как независимая от фона теория может быть выведена из фоново-зависимой теории? Как может теория, в которой геометрия пространства-времени является динамической, быть выведена из теории, которая требует фиксированной геометрии?

Аргумент в пользу этого следующий: рассмотрим пространственно-временную геометрию и поинтересуемся, есть ли тут последовательное квантово-механическое описание струн, двигающихся и взаимодействующих в этой геометрии. Когда вы исследуете это предположение, вы найдете, что необходимое условие для непротиворечивости теории струн заключается в том, что в определенном приближении пространственно-временная геометрия является решением уравнений высокоразмерной версии ОТО. Так что тут имеется смысл, в котором уравнения ОТО *появляются* из условий, чтобы струны двигались непротиворечиво. Это основание для утверждений, которые струнные теоретики делают по поводу вывода ОТО из теории струн.

Однако тут есть загвоздка. То, что я только что описывал, есть ситуация в оригинальной двадцатишестимерной теории бозонных струн. Но, как отмечалось, эта теория имеет нестабильность, тахион, так что это, на самом деле, нежизнеспособная теория. Чтобы сделать теорию стабильной, ее можно сделать суперсимметричной. А суперсимметрия вызывает дополнительные необходимые условия, которым должна удовлетворять фоновая геометрия. В настоящее время в деталях известны только

суперсимметричные струнные теории, непротиворечиво живущие в фоновом пространстве-времени, которое не эволюционирует во времени.[70] Так что в этих случаях нельзя утверждать, что вся ОТО заново открывается как приближение в суперсимметричной струнной теории. Верно, что многие решения ОТО заново открываются, включая все решения, в которых некоторые размерности являются плоскими, а остальные скрученными. Но они очень специальны; общее решение ОТО описывает мир, чья пространственно-временная геометрия изменяется во времени. В этом заключено существенное прозрение Эйнштейна, что геометрия пространства-времени динамическая и эволюционирующая. Вы не можете открыть заново только те решения, которые не содержат зависимости от времени, и все еще говорить, что ОТО выводится из теории струн. Также вы не можете утверждать, что вы имеете теорию гравитации, поскольку наблюдается много гравитационных явлений, содержащих зависимость от времени.

В ответ некоторые струнные теоретики предполагают, что имеются последовательные струнные теории на пространственно-временных фонах, которые варьируются во времени, но их просто очень трудно изучать. Они не могут быть суперсимметричными и, насколько я знаю, отсутствует явная общая конструкция таких теорий. В их пользу имеются свидетельства двух видов. Первое, имеется утверждение, что, по меньшей мере, небольшие количества зависимости от времени могут быть введены без возмущения условий, требующихся, чтобы устранить тахион и сделать теорию последовательной. Этот аргумент похож на правду, но в отсутствие детализированной конструкции его тяжело оценить. Второе, некоторые специальные случаи были разработаны в деталях; однако, самые успешные из них имели скрытую симметрию во времени, так что они не годятся. Другие имели возможные проблемы с нестабильностями или разрабатывались только на уровне классических уравнений, которые не достаточны, чтобы показать, существуют они реально или нет. Еще другие имели очень быструю зависимость от времени, управляемую масштабом самой струнной теории.

В отсутствие явной конструкции теории струн на общем зависящем от времени пространстве-времени, или неотразимого аргумента о ее существовании без предположения о существовании мета-теории, в настоящий момент нельзя утверждать, что вся ОТО может быть выведена из теории струн. Это другая проблема, которая остается открытой и должна быть решена в ходе будущей работы.

Все еще можно спросить, дает ли теория струн последовательную теорию, которая включает гравитацию и квантовую теорию в тех случаях, где теория может быть сконструирована явно? То есть, можем ли мы, по крайней мере, описать гравитационные волны и силы, столь слабые, что они могут рассматриваться лишь как рябь на геометрии пространства? И можем ли мы сделать это полностью согласованно с квантовой теорией?

Это может быть сделано в определенном приближении. До сих пор попытки обеспечить это вне любого уровня приближения не были полностью успешными, хотя было собрано множество позитивных свидетельств и не появилось контрпримеров. Определенно, среди струнных теоретиков широко распространена уверенность, что это должно быть верно. В то же время, препятствия на пути доказательства кажутся солидными. Метод приближений (он же теория возмущений) дает ответы на любой физический вопрос через сумму бесконечного числа членов. Для первых нескольких слагаемых каждый член меньше предыдущего, так что вы получаете приближение, просто вычислив несколько членов. Так обычно поступают в теории струн и в квантовой теории поля. Тогда, чтобы доказать конечность теории, вам нужно доказать, что для любого вычисления, которое вы можете проделать, чтобы ответить на физический вопрос, каждый из бесконечного числа членов конечен.

Здесь вещи и находятся в настоящее время. Первый член, очевидно, конечен, но это соответствует классической физике, так что в нем нет квантовой механики. Второй член, первый из тех, которые, возможно, могли бы быть бесконечными, тоже конечен, как можно легко показать. К 2001 говорили о полном доказательстве конечности третьего члена. Это был героический труд, много лет проводимый Эриком Д'Хокером в Калифорнийском университете, Лос Анжелес, и его сотрудником Дуонгом Х. Фонгом в Колумбийском университете.[71] С тех пор они работали над четвертым членом. Они очень много узнали об этом члене, но до сих пор не доказали, что он конечен. Преуспеют они или нет в доказательстве конечности всех бесконечных членов, остается посмотреть. Часть стоящей перед ними проблемы в том, что

алгоритм для выписывания теории становится неоднозначным после второго члена, так что им нужно сначала найти правильное определение для теории, прежде чем они смогут попытаться доказать, что она дает конечные ответы.

Как это может быть? Разве я не указывал, что теория струн базируется на очень простом законе? Проблема в том, что этот закон простой только тогда, когда он применяется к исходной теории в двадцати шести измерениях. Когда добавляется суперсимметрия, он становится значительно более сложным.

Имеются добавочные результаты, которые показывают для любого члена, что определенные возможные бесконечные выражения, которые могли появиться, на самом деле не возникают. Мощное доказательство такого сорта было опубликовано в 1992 Стэнли Мандельштамом. Недавно большой прогресс был достигнут Натаном Берковицем, американским физиком, который успешно предпочел работать в Сао Пауло. Берковиц придумал новую формулировку суперструнной теории. Он достиг доказательства, хорошего для каждого члена в теории возмущений, внеся только пару дополнительных предположений. Еще слишком рано говорить, что будет, если эти дополнительные предположения будут легко рассеяны. Однако, это существенный прогресс на пути к доказательству. Проблема конечности не является проблемой, которая получает много внимания струнных теоретиков, и я испытываю огромное уважение к тем немногим, кто все еще тяжело работает над ней.

Имеется одна еще более беспокоящая проблема, близкая к проблеме конечности. В конце, даже если каждый член в вычислении окажется конечным, точные ответы вычисления выводятся суммированием всех членов. Поскольку тут имеется бесконечное число членов, которые должны быть сложены, результат опять может быть бесконечным. Хотя это суммирование еще не было проведено, имеются свидетельства (слишком технические, чтобы описывать их здесь), что результат будет бесконечным. Иными словами это можно выразить так, что процедура приближений всего лишь подходит близко к реальным предсказаниям, а затем отклоняется от них. Это общее свойство квантовых теорий. Оно означает, что теория возмущений, хотя и является полезным инструментом, не может быть использована для определения теории.

На существующих в настоящее время свидетельствах, не имея в руках доказательства или контрпримера, просто невозможно узнать, является ли теория струн конечной. Свидетельства могут быть прочитаны одним из двух способов. После огромной тяжелой работы (хотя и выполненной всего лишь горсткой людей) имеются несколько частичных доказательств. Это можно расценивать или как ясное свидетельство, что предположение верно, или что что-то неправильно. Если такие талантливые физики пытались и не сумели, и если каждая попытка остается незавершенной, это может быть потому, что само предположение, которое они пытаются доказать, неверно. Причина того, что математика изобретает идею доказательства и делает ее критерием для уверенности, в том, что человеческая интуиция слишком часто оказывается ошибочной. Широко распространенные предположения, в которых все уверены, временами оказываются ложными. Это не проблема математической строгости. Физики обычно не стремятся к такому же уровню строгости, который требуют их собратья-математики. Имеется много интересных и широко принятых теоретических результатов, которые не имеют математического доказательства. Но это не тот случай. Отсутствует доказательство конечности теории струн даже на физическом уровне строгости.

Установив это, я не имею точки зрения на то, окажется суперсимметричная теория струн конечной или нет. Но если нечто, настолько центральное для утверждения теории, мыслится как верное, должна быть проделана работа, чтобы перевести эту интуицию в доказательство. Будьте уверены, имеется много случаев, когда популярные предположения остаются недоказанными в течение поколений, но обычно это происходит потому, что ключевые прозрения являются неправильными. Даже если конечный результат доказывает то, в чем каждый и так был уверен, усилия обычно окупаются приобретением нами намного более глубокого проникновения в область математики, которая впервые дала начало предположению.

Мы еще вернемся к вопросу, почему конечность теории струн является такой спорной проблемой. А пока мы просто должны заметить, что это не изолированный пример. Несколько ключевых предположений, которые двигали две струнные революции, остались недоказанными. Они включают сильно-слабую дуальность и дуальность Маладасены. В обоих случаях имеется множество указаний, что некоторые

формы соотношений между различными теориями верны. Даже если строгая эквивалентность, заявляемая в предположениях, ложна, все равно имеются важные идеи и результаты. Но при любой реалистичной оценке мы должны проводить различие между предположением, свидетельством и доказательством.

Некоторые заявляют, что предположение Малдасены предлагает независимое доказательство того, что теория струн дает хорошую квантовую теорию гравитации, по меньшей мере, в случае определенных геометрий. Они утверждают, что теория струн в некоторых случаях в точности эквивалентна обычной калибровочной теории в трех пространственных измерениях, давая хорошую квантовую теорию гравитации, заслуживающую доверия в любом порядке приближения.

Проблема с этим утверждением в том, что, как отмечалось, сильная форма предположения Малдасены остается недоказанной. Имеются впечатляющее подтверждение для некоторых соотношений между десятимерной суперсимметричной теорией струн Малдасены и максимально супер калибровочной теорией, но то, что мы на сегодняшний день имеем, еще не является доказательством полного предположения. Подтверждение так же бесспорно объясняется наличием только частичной корреспонденции между двумя теориями, ни одна из которых точно не определена. (Недавно был получен прогресс в подходе к калибровочной теории через вторую аппроксимационную схему, именуемую *решеточной калибровочной теорией*.) Существующее подтверждение совместимо и с ложностью предположения Малдасены о полной эквивалентности, или потому, что две теории являются, фактически, различными, или потому, что одна из них или обе, строго говоря, не существуют. С другой стороны, если сильная форма предположения Малдасены окажется верной, – что также согласуется с существующими свидетельствами, – тогда теория струн обеспечивает хорошую квантовую теорию гравитации в специальном случае фонов с отрицательной космологической константой. Более того, эти теории могли бы быть частично фоново-независимыми, так как девятимерное пространство генерируется из физики в трехмерном пространстве.

Имеются другие свидетельства, что теория струн может обеспечить унификацию гравитации с квантовой теорией. Самые сильные результаты содержат браны и черные дыры. Эти результаты экстраординарны, но, как мы обсуждали в главе 9, они недостаточно далеко заходят. До сегодняшнего дня они ограничены очень специальными черными дырами, и кажется, есть слабая надежда, что точные результаты будут вскоре распространены на общий случай черных дыр, включая те их виды, которые, как мы уверены, существуют в природе; результаты могут быть связаны с дополнительной симметрией, которой обладают эти специальные черные дыры. Наконец, результаты теории струн не включают существенное описание квантовой геометрии специальных черных дыр; они ограничены изучением модельных систем с бранами, которые разделяют многие свойства черных дыр, но существуют в обычном пространстве-времени, и они изучались в приближении, в котором гравитационная сила выключена.

Некоторые утверждают, что эти экстремальные системы с бранами станут черными дырами, когда гравитационная сила будет снова включена. Но теория струн не может быть доведена до конца без обсуждения детального описания того, как формируется черная дыра. Чтобы сделать это, вам необходима теория струн, которая работает в пространстве-времени, эволюционирующем во времени, а мы видели, что такая пока не существует.

С момента оригинальных результатов по черным дырам было много впечатляющих предложений о том, как описать реальную черную дыру в теории струн. Но все они страдали от общей проблемы, что, как только они отклонялись от очень специальных черных дыр, где мы можем использовать суперсимметрию, чтобы провести расчеты, они не могли прийти к точным результатам. Раз уж мы изучаем ординарные черные дыры, или когда мы пытаемся проникнуть в вопрос, что происходит в сингулярности, мы неизбежно попадаем в режим, где пространственно-временная геометрия эволюционирует во времени. Суперсимметрия не может работать в этих условиях, и также не работают все те прекрасные вычислительные инструменты, которые от нее зависят. Так что мы остаемся с той же дилеммой, которая беспокоит так много исследований в струнной теории: мы получаем изумительные результаты для очень специальных случаев, но мы не в состоянии выбрать, распространяются ли результаты на целую теорию или они верны только в специальных случаях, где мы можем проводить вычисления.

Зафиксировав эти ограничения, можно ли утверждать, что теория струн решает загадки энтропии черных дыр, температуры и потери информации, обозначенные открытием Якоба Бекенштейна и Стивена Хокинга? Ответ таков, что, хотя имеются внушительные результаты, теория струн еще не может заявить, что решила эти проблемы. Для экстремальных и почти экстремальных черных дыр вычисления с использованием модельных систем бран воспроизводят все детали формул, которые описывают термодинамику соответствующих черных дыр. Но это не черные дыры, это просто системы, ограниченные требованиями наличия большого количества суперсимметрии, чтобы они имели тепловые свойства черных дыр. Результаты не обеспечивают описания действительной квантовой геометрии черных дыр. Поэтому они не объясняют результатов Бекенштейна и Хокинга в терминах микроскопического описания черных дыр. Более того, как отмечалось, результаты применимы только к очень специальному классу черных дыр и не применимы к черным дырам, имеющим реальный физический интерес.

Суммируем: на основании текущих результатов мы не можем уверенно провозгласить, что теория струн решает проблему квантовой гравитации. Подтверждения двойственные. Для определенных приближений теория струн кажется последовательно объединяющей квантовую теорию и гравитацию и дающей осмысленные и конечные ответы. Но тяжело решить, верно ли это для полной теории. Имеются свидетельства в поддержку чего-то вроде предположения Малдасены, но нет доказательств самог*о* полного предположения, а только полное предположение позволит нам объявить существование хорошей квантовой теории гравитации. Картина черных дыр впечатляет, но только для нетипичных черных дыр, которые теория струн в состоянии смоделировать. За их пределами есть постоянно существующая проблема, что теория струн не является фоново-независимой и даже в пределах этих ограничений до сих пор не может описать чего-либо другого, кроме статических фонов, где геометрия не эволюционирует во времени.

Что мы *можем* сказать, так это то, что в пределах указанных ограничений имеются свидетельства, что теория струн указывает на существование последовательного объединения гравитации и квантовой теории. Но является ли сама теория струн такой последовательной унификацией? В отсутствие решения указанных проблем это кажется маловероятным.

Обратимся к другим проблемам из списка главы 1. Четвертая проблема заключается в объяснении величин параметров стандартной модели физики частиц. Ясно, что теория струн до настоящего момента не смогла сделать это, и нет причин верить, что сможет. Вместо этого, как мы обсуждали в главе 10, предложены свидетельства, что имеется настолько огромное число последовательных теорий струн, что теория почти ничего не может предсказать по этому поводу.

Пятая проблема заключалась в объяснении, что такое темная материя и темная энергия, и в объяснении величин констант космологии. Здесь ситуация тоже не хороша. Теории струн, поскольку они обычно включают намного больше частиц и сил, чем это наблюдается, предлагают множество кандидатов на роль темной материи и энергии. Некоторые из дополнительных частиц могли бы быть темной материей. Некоторые из дополнительных сил могли бы быть темной энергией. Но теория струн не предлагает *конкретных* предсказаний о том, какие из многих возможных кандидатов являются темной материей или темной энергией.

Например, среди возможных кандидатов на темную материю есть частица, названная *аксион* (название отмечает определенные свойства, в которые я не хочу вдаваться). Многие (но не все) теории струн содержать аксионы, так что сначала это кажется хорошо. Но большинство струнных теорий, которые содержат аксионы, предсказывают, что они имеют свойства, которые не согласуются со стандартной космологической моделью. Так что это кажется плохо. Но ведь имеется так много теорий струн, что некоторые могут вполне содержать аксионы, согласующиеся с космологической моделью. Возможно также, что космологическая модель неверна в этом аспекте. Так что разумно сказать, что, если аксионы являются темной материей, то это согласуется с теорией струн. Но это очень далеко от того, чтобы сказать, что теория струн или предсказывает, что темная материя является аксионами, или делает любые дополнительные предсказания, с помощью которых наблюдения темной материи могли бы фальсифицировать теорию струн.

Остающаяся проблема в нашем списке есть номер 2: *проблема обоснований квантовой механики*. Предлагает ли теория струн какое-либо решение этой проблемы? Ответ: нет. Теория струн до сих пор ничего прямо не говорит о проблеме обоснований квантовой теории.

И вот оценка ситуации. Из пяти ключевых проблем теория струн потенциально полностью решает одну, проблему объединения частиц и сил. Эта проблема и мотивировала изобретение теории струн, и она является до сих пор самым впечатляющим ее успехом.

Имеются свидетельства, что теория струн указывает на решение проблемы квантовой гравитации, но, в лучшем случае, она указывает на существование более глубокой теории, которая решает проблему квантовой гравитации, а не сама является решением.

В настоящее время теория струн не решает ни одну из трех оставшихся проблем. Она кажется неспособной объяснить параметры стандартных моделей физики и космологии. Она обеспечивает список возможных кандидатов на роли темной материи и темной энергии, но не предсказывает их однозначно или не объясняет чего-либо по их поводу. И до сегодняшнего дня теория струн ничего не говорит о величайшей тайне из всех, которая заключается в смысле квантовой теории.

Кроме всего этого, имеются ли какие-нибудь успехи, чтобы поговорить о них? Одно из мест, где мы обычно ищем успехи теории, есть предсказания, которые она делает для новых экспериментов или наблюдений. Как мы говорили, теория струн не делает абсолютно никаких предсказаний этого вида. Ее сила заключается в том, что она унифицирует виды частиц и сил, о чем мы уже знаем. Если бы мы, например, ничего не знали о гравитации, мы могли бы предсказать ее существование из теории струн. Это не мелочь. Но это не предсказание для нового эксперимента. Более того, нет возможности фальсифицировать теорию – доказать ее ложность, – обнаружив такой эксперимент или наблюдение, которые бы расходились с предсказаниями теории.

Если теория струн не делает новых предсказаний, тогда мы должны, по крайней мере, спросить, насколько хорошо она оценивает уже имеющиеся у нас данные. Тут ситуация своеобразная. Вследствие неполного состояния нашего знания мы должны разделить многие возможные теории струн на две группы и исследовать каждую из них отдельно. Первая группа строится из тех теорий струн, о которых известно, что они существуют, а вторая группа содержит те теории, которые предположительно существуют, но еще не сконструированы.

Из-за недавних наблюдений, что расширение вселенной ускоряется, мы должны сконцентрироваться на теориях струн из второго класса, поскольку только они согласуются с данными находками. Но мы не знаем, как рассчитать вероятности движения и взаимодействия струн в этих теориях. Мы не только не можем показать, что эти теории существуют; свидетельства, которые мы для них имеем, заключаются в их фонах, удовлетворяющих определенно необходимым, но далеко не достаточным условиям. Так что даже в очень хорошем случае, если имеется какая-либо теория струн, описывающая нашу вселенную, должны быть изобретены новые техники, чтобы рассчитать предсказания для экспериментов, которые работают в этой новой теории. Все известные теории струн, как отмечалось, не согласуются с наблюдаемыми фактами о нашем мире: Большинство имеет ненарушенную суперсимметрию; другие предсказывают, что фермионы и бозоны появляются парами одинаковой массы; и все они предсказывают существование новых (и до сегодняшнего дня не наблюдавшихся) сил с бесконечной областью действия. Тяжело избежать заключения, однако, хорошо мотивированного, что теория струн потерпела неудачу в осуществлении надежд, которых на нее так много возлагалось двадцать лет назад.

В расцвете 1985 одним из самых увлеченных сторонников новой революционной теории был Дэниэл Фридэн, тогда работавший в Университете института Ферми в Чикаго. Вот что он сказал в недавней статье:

«Теория струн потерпела неудачу как теория физики вследствие существования многообразия возможных фоновых пространств-времен. ... Долго продолжающийся кризис теории струн заключается в ее полной неспособности объяснить или предсказать что-либо из физики больших масштабов. Теория струн не может

сказать ничего определенного о физике больших расстояний. Теория струн не способна определить размерность, геометрию, спектр частиц и константы связи макроскопического пространства-времени. Теория струн не может дать никакого определенного объяснения существующему знанию о реальном мире и не может сделать никаких определенных предсказаний. Достоверность теории струн не может быть оценена, еще меньше установлена. Теория струн не имеет веры как кандидат на теорию физики.» [72]

Однако, многие струнные теоретики все еще на службе. Но как это так, что перед лицом проблем, которые мы обсуждали, множество ярких людей продолжают работать над теорией струн?

Одна из причин в том, что струнные теоретики восхищены тем, что теория красива или «элегантна». Это что-то из эстетических обоснований, с которыми люди могут быть не согласны, так что я не уверен в том, как это должно быть оценено. В любом случае это не играет роли в объективном определении достижений теории. Как мы говорили в Части I, множество прекрасных теорий оказались не имеющими ничего общего с природой.

Некоторые молодые струнные теоретики утверждают, что даже если теория струн не добьется успеха в конечной унификации, она имеет побочные результаты, которые способствуют нашему пониманию других теорий. Они особенно ссылаются на предположение Малдасены, обсужденное в главе 9, которое обеспечивает способ изучения определенных калибровочных теорий из расчетов, которые легче провести в соответствующей теории гравитации. Это определенно хорошо работает для теорий с суперсимметрией, но, если это должно быть значимо для стандартной модели, это должно хорошо работать и для теорий, которые не имеют суперсимметрии. В этом случае имеются другие техники, и вопрос в том, насколько хорошо предположение Малдасены согласуется с ними. Судьи все еще консультируются. Хорошим проверочным случаем является упрощенная версия калибровочной теории, в которой имеются только два пространственных измерения. Недавно эта задача была решена с использованием техники, которая не имела никакого отношения к суперсимметрии или теории струн.[73] Это также можно изучить через третий подход – грубый расчет на компьютере. Компьютерные вычисления считаются надежными, поэтому они могут служить тестовым испытанием, с которым сравниваются предсказания других подходов. Такое сравнение показывает, что предположение Малдасены не работает так же хорошо, как другие техники.*

---

* Совсем недавно эти новые техники были также успешно применены к КХД в случае реального мира с тремя пространственными измерениями.

Некоторые теоретики также указывают на потенциальные достижения в математике, как на основание продолжать работу над струнами. Одно такое потенциальное достижение содержит геометрию шестимерных пространств, которые струнные теоретики изучали как возможные примеры компактифицированных измерений. Это приветствуется, но мы должны ясно представлять, что происходило. Тут не было контакта с физикой. То, что происходило, имело место в чисто математическом плане: теория струн выдвинула предположения, которые имеют отношение к различным математическим структурам. Струнные теории предположили, что свойства шестимерных геометрий могли бы быть выражены как более простые математические структуры, которые могли бы быть определены на двумерных поверхностях, которые струны заметают во времени. Название таких структур – *конформные поля*. Было предположено, что свойства определенных шестимерных пространств отражаются в структурах этих теорий конформных полей. Это привело к удивительным соотношениям между парами шестимерных пространств. Это чудесный побочный результат из теории струн. Но, чтобы он был полезен, нам не нужно верить, что теория струн является теорией природы. Что касается сути, теория конформных полей играет роль во многих других применениях, включая физику конденсированной материи и петлевую квантовую гравитацию. Так что нет ничего, однозначно связанного с теорией струн.

Имеются другие случаи, в которых теория струн привела к открытиям в математике. В одном очень красивом случае определенная игрушечная модель струнной теории, именуемая *топологической теорией струн*, привела к поразительному новому прозрению в топологии высокоразмерных пространств. Однако,

это само по себе не является подтверждением, что теория струн верна, если речь идет о природе: топологические теории струн являются упрощенной версией теории струн и не объединяют наблюдаемые в природе частицы и силы.

В более общем виде, тот факт, что физическая теория инспирирует развитие в математике, не может быть использован как аргумент в пользу истинности теории как физической теории. Ложные теории инициировали многие разработки в математике. Теория эпициклов Птолемея смогла хорошо подстегнуть разработки в тригонометрии и теории чисел, но это не сделало ее правильной. Ньютоновская физика инициировала развитие крупных разделов математики и продолжает делать это, но это не спасло ньютоновскую физику, когда она разошлась с экспериментом. Имеется множество примеров теорий, основанных на прекрасной математике, которые никогда не имели никакого успеха и в которые никогда никто не верил, первая теория планетарных орбит Кеплера является образцовым примером. Так что факт, что некоторые красивые математические предположения были инспирированы исследовательской программой, не может спасти теорию, которая не имеет ясно выраженных центральных принципов и не делает физических предсказаний.

Трудности, перед которыми стоит теория струн, восходят прямо к корням всего предприятия унификации. В первой части книги мы идентифицировали гигантские препятствия, досаждавшие ранним теориям унификации – препятствия, которые привели к их краху. Некоторые из них содержали попытки объединить мир путем введения высших размерностей. Геометрия высших измерений оказалась далекой от однозначности и поврежденной нестабильностями. Основная причина, как мы видели в предыдущих главах, в том, что унификация всегда имеет последствия, которые подразумевают существование новых явлений. В хороших случаях – таких, как теория электромагнетизма Максвелла, электрослабая теория Вайнберга и Салама, СТО и ОТО, – эти новые явления были быстро обнаружены. Это редкие случаи, в которых мы можем праздновать унификацию. В других попытках унификации новые явления не были быстро обнаружены или уже расходились с наблюдениями. Вместо того, чтобы праздновать следствия унификации, теоретик должен хитро постараться спрятать следствия. Я не знаю случаев, когда это утаивание следствий приводило бы в конце к хорошей теории; раньше или позже предпринятая унификация была заброшена.

Как суперсимметрия, так и высшие размерности оказались теми случаями, в которых должны были быть затрачены громадные усилия, чтобы спрятать последствия предложенных унификаций. Оказалось, что нет двух известных частиц, которые связаны суперсимметрией; вместо этого каждая известная частица имеет неизвестного партнера, и вы должны настраивать множество свободных параметров таких теорий, чтобы удержать неизвестные частицы от обнаружения. В случае высших измерений почти все решения теории не согласуются с наблюдениями. Редкие решения, которые обнаруживают нечто похожее на наш мир, являются нестабильными островами в гигантском море возможностей, почти все из которых выглядят совершенно чужими.[74]

Может ли теория струн избежать проблем, которые происходили с более ранними высокоразмерными и суперсимметричными теориями? Это маловероятно, разве что тут имеется намного больше чего прятать, чем это было как в теории Калуцы-Кляйна, так и в суперсимметричных теориях. Механизм, предложенный Стэнфордской группой для стабилизации высших размерностей, может работать. Но стоимость высока, так как он ведет к гигантскому расширению ландшафта предполагаемых решений. Поэтому цена того, чтобы избежать проблем, приговоривших теорию Калуцы-Кляйна, в лучшем случае сводится к тому, чтобы принять точку зрения, которую струнные теоретики изначально отвергали, что гигантское число возможных теорий струн должно быть принято одинаково серьезно и как потенциальное описание природы. Это означает, что исходные надежды на однозначную унификацию, а поэтому на фальсифицируемые предсказания по поводу физики элементарных частиц, должны быть отброшены.

В главе 11 мы обсуждали заявления Сасскайнда, Вайнберга и других, что ландшафт теорий струн может быть грядущей дорогой для физики, и нашли эти заявления неубедительными. Где тогда то, что нам остается? В недавнем интервью Сасскайнд заявил, что ставки таковы, что мы либо принимаем ландшафт и выхолащивание научного метода, которое он подразумевает, либо отбрасываем науку в целом и принимаем

разумный замысел (РЗ) как объяснение для выбора параметров стандартной модели:

«Если по некоторым непредвиденным причинам ландшафт окажется непоследовательным – может быть, по математическим причинам, или потому, что он разойдется с наблюдениями, – я достаточно уверен, что физики пойдут дальше в поиске естественных объяснений мира. Но я должен сказать, что если это случится при том, как вещи обстоят сегодня, мы будем в очень затруднительном положении. Без какого-либо объяснения природной тонкой настройки мы будем под тяжелым давлением, чтобы ответить на критику со стороны РЗ. Можно утверждать, что надежда на появление в будущем математически однозначного решения столь же основана на (религиозной) вере, как и РЗ.» [75]

Но это ложный выбор. Как мы коротко увидим, имеются другие теории, которые предлагают настоящие ответы на пять великих вопросов и которые быстро прогрессируют. Отбросить теорию в сторону не означает отбросить науку, это означает только отбрасывание одного направления, которое один раз было фаворитом, но не смогло оправдать возлагавшихся на него надежд, с целью сосредоточить внимание на других направлениях, которые, как сегодня кажется, более вероятно преуспеют.

Теория струн преуспела в достаточно большом количестве вещей, так что будет обоснованным надеяться, что ее часть или, возможно, что-либо подобное ей может составить некоторую будущую теорию. Но имеется также непреодолимое свидетельство, что кое-что было сделано неверно. С 1930х было ясно, что квантовая теория гравитации должна быть фоново-независимой, но все еще достигнут минимальный прогресс по направлению к фоново-независимой формулировке теории струн, которая могла бы описывать природу. Между тем, поиски единственной, однозначной, унифицирующей теории природы привели к предположению о бесконечном числе теорий, ни одна из которых не может быть записана в каких-либо деталях. И, если они непротиворечивы, они приводят к бесконечному числу возможных вселенных. И венчает все, что все версии, которые мы можем изучить в каких-либо деталях, расходятся с наблюдениями. Несмотря на множество соблазнительных предположений, не имеется свидетельств, что теория струн может решить некоторые из больших проблем теоретической физики. Те, кто уверен в предположениях теории, находятся в совершенно отличающейся интеллектуальной вселенной от тех, кто настаивает на уверенности только в том, что поддержано реальными подтверждениями. Сам факт, что такая громадная разница во взглядах продолжает существовать в легитимном поле науки, является индикатором того, что что-то плохо.

Так стоит ли все еще изучать теорию струн, или она должна быть объявлена несостоятельной, как предлагают некоторые? Тот факт, что многие надежды были обмануты и многие ключевые предположения остались недоказанными, может быть достаточно хорошей причиной для некоторых, чтобы оставить работу над теорией струн. Но это не является причиной, чтобы совсем остановить исследования.

Что если когда-нибудь в будущем кто-нибудь найдет способ сформулировать теорию струн, который однозначно приведет к стандартной модели физики частиц, будет фоново-независимым и будет жить только в трехмерном несуперсимметричном мире, который мы наблюдаем? Даже если перспективы найти такую теорию кажутся незначительными, такая возможность есть, – подчеркивая общую мудрость, что диверсификация исследовательских программ является благотворной для науки, момент, к которому мы вернемся позднее.

Так что теория струн определенно находится среди направлений, которые заслуживают большего исследования. Но должна ли она продолжать рассматриваться как доминирующая парадигма теоретической физики? Должна ли большая часть ресурсов, направляемых на решение ключевых проблем в теоретической физике, продолжать поддерживать исследования в струнной теории? Должны ли другие подходы продолжать сидеть на голодном пайке в пользу теории струн? Должны ли только струнные теоретики быть пригодными для большинства престижных рабочих мест и исследовательских сообществ, как это имеет место сейчас? Я думаю, ответ на все эти вопросы должен быть: нет. Теория струн не достаточно успешна на любом уровне, чтобы оправдывать складывание почти всех наших яиц в ее корзину.

А что если нет других достойно работающих подходов? Некоторые струнные теоретики защищают

поддержку теории струн, поскольку оня является "единственной игрой в городе"*. Я должен буду обосновать, что даже если это и так, мы должны будем сильно поощрять физиков и математиков на исследование альтернативных подходов. Если там нет новых идей, ну, тогда будем немного изобретать. Поскольку не имеется надежды, что теория струн в ближайшее время сделает фальсифицируемые предсказания, тут нет особенной спешки. Давайте поощрим людей на поиск быстрейшего пути к ответам на пять ключевых вопросов теоретической физики.

Фактически же *имеются* другие подходы – другие теории и исследовательские программы, которые нацелены на решение тех же пяти проблем. И, хотя большинство теоретиков сконцентрировались на теории струн, некоторые люди сделали немалый прогресс в развитии этих других областей. Наиболее важно, что имеются намеки на новые экспериментальные открытия, не предугаданные теорией струн, которые, если подтвердятся, сориентируют физику в новых направлениях. Эти новые теоретические и экспериментальные разработки являются темой следующей части книги.

Часть III
За пределами теории струн

13. Сюрпризы реального мира

Греческий философ Гераклит оставил нам прекрасный афоризм: природа любит скрываться. Это так часто верно. У Гераклита не было способа увидеть атом. Не важно, насколько много его приятели-философы рассуждали по этому поводу, увидеть атом было вне пределов любой технологии, которую они могли представить. В наши дни теоретики нашли великое применение склонности природы к загадочности. Если природа на самом деле суперсимметрична или имеет больше трех пространственных измерений, она это хорошо скрывает.

Но иногда верно противоположное. Иногда ключевые вещи находятся прямо перед нами, готовые к наблюдению. Скрытыми от незамысловатого взгляда Гераклита были легко воспринимаемые факты, которые мы теперь принимаем на веру, вроде принципа инерции или постоянного ускорения падающих объектов. Наблюдения Галилея за движениями на Земле не использовали телескопы или механические часы. Насколько я знаю, они могли бы быть проделаны и во времена Гераклита. Он только должен был задать правильные вопросы.

Итак, хотя мы горевали, как тяжело проверять идеи, идущие за теорией струн, нам стоит поинтересоваться, что может быть спрятано вокруг от нашего обычного взгляда. В истории науки было множество примеров открытий, которые удивляли ученых, поскольку они не предугадывались теорией. Нет ли сегодня наблюдений, которые мы, физики, не запрашивали, которые не навлекли на себя теорию, – наблюдений, которые могли бы подвинуть физику в интересном направлении? Нет ли шанса, что такие наблюдения уже были сделаны, но проигнорированы, поскольку, если они подтвердятся, они могли бы помешать нашим теоретизированиям?

Ответ на эти вопросы: да. Имеется несколько недавних экспериментальных результатов, которые указывают на новые явления, непредвиденные для большинства струнных теоретиков и физиков,

занимающихся частицами. Ни один полностью не установлен. В нескольких случаях результаты достоверны, но интерпретации спорны; в других случаях результаты слишком новы и удивительны, чтобы быть широко принятыми.[76] Но их стоит описать здесь, поскольку, если любая из этих подсказок выльется в настоящее открытие, тогда имеются важные свойства фундаментальной физики, которые не предсказываются ни одной из версий теории струн, и будет тяжело согласоваться с ними. Другие подходы тогда станут основными, а не факультативными.

Начнем с космологической константы с целью представить темную энергию, ускоряющую расширение вселенной. Как обсуждалось в главе 10, эта энергия не была предугадана ни теорией струн, ни большинством других теорий, и у нас нет идеи, как установить ее величину. Многие люди тяжело думали над этим на протяжении лет, и мы более или менее нигде. Я тоже не имею ответа, но у меня есть предложение, как мы могли бы найти его. Надо прекратить попытки оценить величину космологической константы в терминах известной физики. Если нет способа оценить явление на основе того, что мы знаем, тогда, может быть, это знак, что нам нужно поискать что-то новое. Возможно, космологическая константа является симптомом чего-то другого, в таком случае она может иметь и другие проявления. Как нам поискать их или опознать их?

Ответ будет простым, поскольку универсальные явления, в конечном счете, просты. Силы в физике характеризуются только несколькими числами – например, расстоянием, на которое распространяется сила, и зарядом, который говорит, насколько сила велика. Что характеризует космологическую константу, так это масштаб, который является масштабом расстояний, выше которых она искривляет вселенную. Мы можем назвать этот масштаб R. Он порядка 10 миллиардов световых лет или 10^{27} сантиметров.[77] Что является странным в космологической константе, так это что ее масштаб гигантский по сравнению с другими масштабами физики. Масштаб R в 10^{40} раз больше размера атомных ядер и в 10^{60} раз больше планковского масштаба (который составляет примерно 10^{-20} от размера протона). Так что логично поинтересоваться, не может ли масштаб R отражать некоторую совершенно новую физику. Хорошим подходом мог бы стать поиск явлений, которые происходят на том же самом громадном масштабе.

Происходит ли что-нибудь другое на масштабе космологической константы? Начнем с самой космологии. Самыми точными космологическими наблюдениями, которые мы имеем, являются измерения *космического микроволнового фона*. Это излучение, оставшееся от Большого Взрыва, которое приходит к нам со всех направлений в небе. Излучение чисто тепловое – то есть, хаотическое. Оно остывало, пока вселенная расширялась, и сегодня находится при температуре 2,7 Кельвинов. Температура однородна по небу с высокой степенью точности, но на уровне нескольких частей на 100 000 в ней имеются флуктуации (см. Рис. 13, вверху). Картина этих флуктуаций дает нам важную путеводную нить к физике очень ранней вселенной.

За последние десятилетия температурные флуктуации микроволнового фона были картографированы спутниками, детекторами на аэростатах и детекторами, расположенными на грунте. Один из способов понять, что именно измерили эти эксперименты, это подумать о флуктуациях, как если бы они были звуковыми волнами в ранней вселенной. Тогда полезно спросить, насколько громки флуктуации на различных длинах волн. Результаты дают нам картину, такую как на Рис.13, внизу, которая говорит нам, сколько энергии имеется при различных длинах волн.

В картине доминирует большой пик, за которым следуют несколько пиков поменьше. Открытие этих пиков является одним из триумфов современной науки. Они интерпретируются космологами, чтобы отметить, что заполнявшая раннюю вселенную материя звучала почти похоже на корпус барабана или на тело флейты. Длина волны, на которой вибрирует музыкальный инструмент, пропорциональна его размеру, и то же самое верно для вселенной. Длины волн резонансных мод говорят нам, насколько велика была вселенная, когда она впервые стала прозрачной: то есть, когда начальная горячая плазма перешла или «распалась» на отдельные царства вещества и энергии примерно через триста тысяч лет после Большого Взрыва; в это время микроволновое излучение и стало видимым. Эти наблюдения экстремально полезны в привязке параметров нашей космологической модели.

Другое свойство, которое мы видим в данных, заключается в том, что в самой большой длине волны содержится мало энергии. Это может быть просто статистическая флуктуация, поскольку эта область содержит незначительное число точек данных. Но если это не статистическая случайность, это может быть интерпретировано как указание на отсечку, выше которой моды возбуждаются намного меньше. Интересно, что эта отсечка находится на масштабе R, связанном с космологической константой.

−200μK

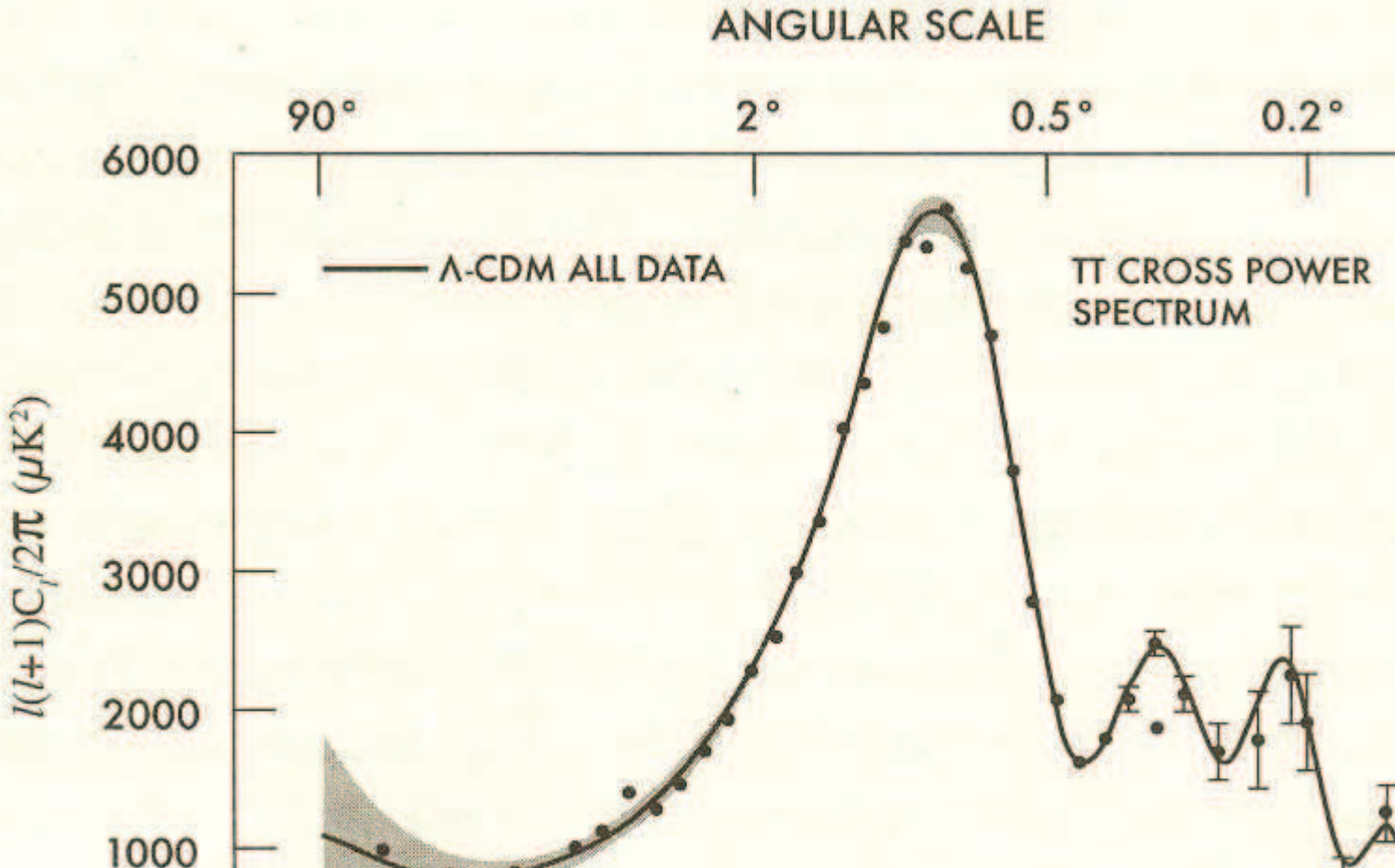
ANGULAR SCALE
90°
2°
0.5°
0.2°
6000
5000
4000
3000
2000
1000
Λ-CDM ALL DATA
TT CROSS POWER SPECTRUM
$l(l+1)C_l/2\pi$ (μK^2)

Рисунок 13. Вверху: как выглядит небо при микроволновых частотах. Сигналы, идущие изнутри нашей галактики, удалены, так что оставлен образ вселенной, каким он был в то время, когда она охладилась до точки, в которой электроны и протоны стали связываться в водород. Внизу: распределение энергии на верхнем изображении при разных длинах волн. Точки представляют данные WMAP и других наблюдений, а кривая соответствует предсказаниям стандартной космологической модели.

Существование такой отсечки загадочно с точки зрения наиболее широко принятой теории очень ранней вселенной, а именно *инфляции*. Согласно теории инфляции вселенная расширялась экспоненциально быстро во время одного экстремально раннего периода. Инфляция объясняет наблюдение, что космическая фоновая радиация близка к однородной. Она делает это, обеспечивая, что все части вселенной, которые мы видим сегодня, находились в причинном контакте, когда вселенная была еще плазмой.

Теория также предсказывает флуктуации космического микроволнового фона, которые гипотетически являются следом квантовых эффектов во время периода инфляции. Принцип неопределенности предполагает, что поля, представлявшие основную энергию вселенной во время инфляции, флуктуировали, и эти флуктуации отпечатались в геометрии пространства. Так как вселенная расширялась экспоненциально, они сохранились, вызвав флуктуации в температуре излучения, возникшие, когда вселенная стала прозрачной.

Инфляция уверенно производит гигантский регион вселенной с относительно однородными свойствами. Это регион мыслится на много порядков величины большим, чем наблюдаемая область, вследствие простых рассуждений о масштабах. Если бы инфляция остановилась точно в точке, где был создан регион размером с наблюдаемую нами сегодня область, должен был бы быть некоторый параметр в физике инфляции, который выбрал бы специальное время для остановки, которое точно оказалось нашей эрой. Но это кажется невероятным, поскольку инфляция имела место, когда вселенная имела температуру на десять в двадцатой степени порядков величины больше, чем центр самой горячей звезды сегодня; таким образом, управляющие ей законы должны быть особыми законами, которые доминируют в физике только в таких экстремальных условиях. Имеется много гипотез о законах, которые управляют инфляцией, но ни одна из них не говорит ничего о временном масштабе в 10 миллиардов лет. Другим способом определить это является то, что, кажется, нет способа для сегодняшней величины космологической константы как-то повлиять на физику, которая вызывала инфляцию.

Таким образом, если инфляция производит однородную вселенную на масштабе, который мы наблюдаем, она, вероятно, произведет вселенную, которая однородна при намного б*о*льших масштабах. Все это подразумевает, что картина произведенных инфляцией флуктуаций должна продолжаться и продолжаться, независимо от того, насколько далеко вы заглядываете. Если бы вы смогли заглянуть за пределы существующего размера наблюдаемой вселенной, вы должны были бы продолжать видеть малые флуктуации в космическом микроволновом фоне. Вместо этого, данные подсказывают, что флуктуации могут прекратиться на масштабе больше *R*.

На самом деле, когда космологи исследовали крупномасштабные моды в микроволновом фоне, они нашли много головоломок. Предметом веры среди космологов является то, что на самых больших масштабах вселенная должна быть симметрична – то есть, любое заданное направление должно выглядеть как любое другое. Это не то, что наблюдается. Излучение на этих крупномасштабных модах не симметрично; имеется предпочтительное направление. (Оно было названо «осью зла» космологами Кэт Лэнд и Жоао Магуэйджо.[78]) Никто не имеет никакого рационального объяснения этому эффекту.

Эти наблюдения вызывают споры, поскольку они сильно не согласуются с тем, что мы ожидали бы на основании инфляции. Поскольку инфляция объясняет в космологии очень много, многие благоразумные ученые подозревают, что имеется что-то неправильное в микроволновых данных. На самом деле, всегда может быть, что данные просто ошибочны. К данным применяются многочисленные тонкие способы анализа, прежде чем они представляются публике. Одной из сделанных вещей является выделение

излучения, о котором известно, что оно идет от галактики, в которой мы живем. Это могло быть сделано некорректно, но некоторые эксперты, близко знакомые с деталями того, как анализировались данные, уверены, что все правильно. Другая возможность, как отмечалось, заключается в том, что наши наблюдения являются просто статистическими аномалиями. Осцилляции на длине волны масштаба *R* занимают гигантскую часть неба – около 60 градусов; следовательно, мы видим только несколько длин волн, и имеются только несколько точек данных, поэтому то, что мы видим, может быть просто хаотической статистической флуктуацией. Возможность подтверждения, что преимущественное направление является статистической аномалией, оценивается меньше чем 1 часть на 1000.[79] Но легче поверить в эту маловероятную неудачу, чем поверить, что предсказания инфляции разрушены.

Эти проблемы в настоящее время не решены. На данный момент достаточно сказать, что мы искали странную физику на масштабе *R* и нашли ее.

Имеются ли какие-нибудь другие явления, связанные с этим масштабом? Мы можем объединить *R* с другими константами природы, чтобы посмотреть, что происходит на масштабах, определяемых получившимся в итоге числом. Позвольте мне предложить пример. Рассмотрим *R*, деленное на скорость света: R/c. Это дает нам время, а время грубо дает нам существующий возраст нашей вселенной. Обратная величина, c/R, дает нам частоту – *очень* низкий тон, одно колебание за время жизни вселенной.

Следующая простейшая вещь для попыток есть c^2/R. Она оказывается ускорением. Фактически, это ускорение, с которым возрастает темп расширения вселенной – то есть, ускорение, производимое космологической константой. Однако, по сравнению с обычными масштабами, это очень малое ускорение: 10^{-8} сантиметров в секунду за секунду. Представим себе жука, ползущего по полу. Ему удастся проделать, возможно, 10 сантиметров в секунду. Если жук удвоит свою скорость за время жизни собаки, он будет ускоряться примерно с темпом c^2/R, на самом деле очень маленькое ускорение.

Но предположим, что имеется новое универсальное явление, которое объясняет величину космологической константы. Только из того факта, что масштаб велик, это новое явление должно будет также влиять на любой другой вид движения с ускорением такой же малости. Так что всегда, когда мы можем наблюдать нечто, двигающееся с таким малым ускорением, мы должны ожидать увидеть что-то новое. Теперь игра начинает быть интересной. Мы знаем вещи, которые ускоряются с указанной медленностью. Одним из примеров является типичная звезда, вращающаяся в типичной галактике. Галактики, вращающиеся вокруг других галактик, ускоряются даже еще медленнее. Итак, видим ли мы какое-нибудь отличие в орбитах звезд с ускорением этой малости по сравнению с орбитами звезд с б*о*льшими ускорениями? Ответ: да, мы видим, и отличие разительное. Это проблема темной материи.

Как мы обсуждали в главе 1, астрономы открыли проблему темной материи путем измерения ускорений звезд на орбитах вокруг центра их галактик. Проблема возникла потому, что, получив измеренные ускорения, астрономы смогли вывести распределения галактической материи. В большинстве галактик этот результат оказался не согласующимся с непосредственно наблюдаемой материей.

Теперь я могу сказать немного больше о том, как возникает такое рассогласование. (С целью упрощения я ограничиваю обсуждение спиральными галактиками, в которых большинство звезд двигаются по круговым орбитам в диске.) В каждой галактике, где была найдена проблема, она оказывала влияние только на звезды, двигающиеся снаружи определенной орбиты. Внутри этой орбиты проблем нет – ускорения таковы, какие и должны быть, если они вызываются видимой материей. Так что кажется, что имеется область внутри галактики, в пределах которой работают законы Ньютона и где не нужна темная материя. Вне этой области вещи приобретают беспорядок.

Ключевой вопрос таков: где располагается специальная орбита, разделяющая две области? Мы можем предположить, что она появляется на особом расстоянии от центра галактики. Это естественная гипотеза, но она не верна: не проходит ли разделяющая линия по определенной плотности звезд или их излучения? Ответ опять: нет. Что кажется определяющим разделительную линию, это, что удивительно, темп самого ускорения. Когда что-то удаляется от центра галактики, ускорения уменьшаются, и тут оказывается

критический темп, который отмечает нарушение ньютоновского закона гравитации. Как только ускорение звезды превысит эту критическую величину, ньютоновский закон кажется работающим, и наблюдается предсказанное ускорение. В этих случаях не нужно постулировать никакой темной материи. Но когда наблюдаемое ускорение меньше, чем критическая величина, оно больше не согласуется с предсказанием закона Ньютона.

Что это за специальное ускорение? Оно измерено и равно 1,2 x 10^{-8} сантиметров в секунду за секунду. Это близко к c^2/R, величине ускорения, произведенного космологической константой!

Этот выдающийся поворот в истории темной материи был открыт в начале 1980х израильским физиком по имени Мордехай Милгром. Он опубликовал свои изыскания в 1983, но долгие годы они почти совершенно игнорировались.[80] Однако, когда были получены более точные данные, стало ясно, что его наблюдение было правильным. Масштаб c^2/R характеризует ускорения, где закон Ньютона нарушается для галактик. Это сейчас называется астрономами *законом Милгрома*.

Я хочу, чтобы вы поняли, насколько таинственным является это наблюдение. Масштаб R есть масштаб всей наблюдаемой вселенной, который в чудовищное количество раз больше, чем размер любой индивидуальной галактики. Ускорение c^2/R возникает на космологическом масштабе; как отмечалось, это темп, с которым ускоряется расширение вселенной. Нет очевидных причин, по которым этот масштаб вообще играет какую-либо роль в динамике индивидуальной галактики. К осознанию, что это происходит, нас подтолкнули данные. Я вспоминаю свое изумление, когда я впервые узнал об этом. Я был шокирован и возбужден.

Я гулял около часа в удивлении, бормоча бессвязные ругательства. Наконец-то! Возможная подсказка из эксперимента, что в мире имеется намного больше, чем мы, теоретики, представляем!

Как это должно быть объяснено? В стороне от случайного совпадения имеются три возможности. Могла бы быть темная материя, а масштаб c^2/R мог бы характеризовать физику частиц темной материи. Или гало темной материи могло бы характеризоваться масштабом c^2/R, поскольку это связано с плотностью темной материи во время, когда она коллапсировала, чтобы сформировать галактики. В любом случае темная энергия и темная материя являются различными явлениями, но взаимосвязанными.

Другая возможность в том, что нет темной материи и закон гравитации Ньютона нарушается, как только ускорения оказываются столь же малы, как и специальная величина c^2/R. В этом случае необходим новый закон, который заменит закон Ньютона в этих условиях. В своей статье 1983 Милгром предложил такую теорию. Он назвал ее MOND, что означает сокращение от «модифицированной ньютоновской динамики». Согласно закону гравитации Ньютона ускорение тела из-за массы уменьшается особым образом, когда вы удаляетесь от этой массы – а именно, как обратный квадрат расстояния. Теория Милгрома говорит, что закон Ньютона сохраняется, но только пока ускорение не упадет до магической величины 1,2 x 10^{-8} см/сек^2. После этой точки вместо того, чтобы уменьшаться как обратный квадрат расстояния, оно уменьшается только обратно пропорционально расстоянию. Более того, хотя обычно ньютоновская сила пропорциональна массе тела, вызывающего ускорение, умноженной на константу (которая есть гравитационная константа Ньютона), MOND говорит, что, когда ускорение очень мало, сила пропорциональна квадратному корню из массы, умноженной на константу Ньютона.

Если Милгром прав, тогда причина того, что звезды за пределами специальной орбиты ускоряются больше, чем это должно быть, в том, что они ощущают более значительную гравитационную силу, чем предсказывал Ньютон! Здесь совершенно новая физика – не на планковском масштабе, и даже не в ускорителе, а прямо перед нами, в движениях звезд, которые мы видим в небе.

MOND, как теория, не принесла для физиков много смысла. Имеются веские причины, почему гравитационные и электрические силы падают как квадрат расстояния. Это оказывается следствием относительности, объединенной с трехмерной природой пространства. Я не хочу вдаваться здесь в детали,

но заключение радикальное. Теория Милгрома оказывается не совместима с базовыми физическими принципами, включая принципы СТО и ОТО.

Были попытки модифицировать ОТО, чтобы сконструировать теорию, которая включает в себя MOND или нечто близкое к ней. Одна такая теория была придумана Якобом Бекенштейном; другая Джоном Моффатом, тогда из Университета Торонто; и еще одна Филипом Маннхаймом из Университета Коннектикута. Это очень одаренные люди (Бекенштейн, как вы можете вспомнить из главы 6, открыл энтропию черных дыр, тогда как Моффат изобрел много удивительных вещей, включая космологию с переменной скоростью света). Все три теории работают до некоторого предела, но они являются, по моему мнению, в высшей степени искусственными. Они имеют некоторые дополнительные поля и требуют настройки нескольких констант до маловероятных величин, чтобы получить согласие с наблюдениями. Я также беспокоюсь о проблеме нестабильности, хотя авторы заявляют, что такие проблемы урегулированы. Хорошая новость, что люди могут изучать такие теории в рамках старого способа действий – путем сравнения своих предсказаний с большим количеством имеющихся у нас астрономических данных.

Нужно сказать, что за пределами галактик MOND работает не очень хорошо. Имеется множество данных о распределении масс и движении галактик на масштабах, больших, чем галактический масштаб. В этом режиме теория темной материи намного лучше MOND при оценке данных.

Тем не менее, MOND кажется вполне хорошо работающей внутри галактик.[81] Данные, собранные за последнее десятилетие, показали, что более чем в восьмидесяти случаях (по последней оценке) из примерно ста изученных MOND предсказывает, как звезды двигаются внутри галактик *лучше*, чем модели, базирующиеся на темной материи. Конечно, последние все время усовершенствуются, так что я не буду пытаться предсказать, как повернется соответствие. Но на настоящий момент мы, кажется, стоим перед очаровательно скандальной ситуацией. Мы имеем две совершенно разные теории, только одна из которых может быть верной. Одна теория, – которая базируется на темной материи, – имеет хороший смысл, в который легко поверить, и очень хорошо предсказывает движения вне галактик, но не так хорошо внутри них. Другая теория, MOND, очень хорошо работает с галактиками, терпит неудачу вне галактик и, в любом случае, базируется на предположениях, которые кажутся противоречащими в высшей степени хорошо установленной науке. Я должен признаться, что ничто в последний год не вызывает у меня ночью бессонницу больше, чем волнения по поводу этой проблемы.

Было бы легко проигнорировать MOND, если бы не факт, что закон Милгрома предполагает, что масштаб загадочной космологической константы каким-то образом имеет отношение ко всему, что определяет, как звезды двигаются в галактиках. Только из данных опыта оказывается, что ускорение c^2/R играет ключевую роль в том, как двигаются звезды. Происходит ли это из-за связи между темной материей и либо темной энергией, либо космологическим масштабом расширения, либо из-за чего-то еще более радикального, мы видим, что в этом ускорении на самом деле может быть найдена новая физика.

Я беседовал о MOND с несколькими из наиболее одаренных теоретиков, кого я знаю. Часто это происходило примерно так: Мы начинали говорить о некоторых серьезных проблемах генерального направления, и один из нас упоминал галактики. Мы бросали друг на друга быстрый взгляд понимания, и один из нас произносил: "Так вы тоже беспокоитесь по поводу MOND," как будто признавался в секретном пороке. Затем мы делились нашими сумасшедшими идеями – поскольку все идеи по поводу MOND, которые не являются сразу неправильными, оказываются сумасшедшими.

Единственное преимущество, что это тот случай, где имеется множество данных, и все время получаются еще лучшие данные. Раньше или позже мы узнаем, объясняет ли темная материя движение звезд и галактик, или мы должны будем принять радикальную модификацию законов физики.

Конечно, это может быть только случайность, что темная материя и темная энергия разделяют общий физический масштаб. Не все совпадения имеют смысл. Так что мы должны спросить, не имеется ли других явлений, где это слабое ускорение может быть измерено. Если так, имеется ли там ситуация, где теория и эксперимент расходятся?

Оказывается, что *есть* другой такой случай, и он тоже тревожащий. NASA до сегодняшнего дня послало несколько космических аппаратов за пределы Солнечной системы. Среди них два – *Пионер 10* и *11* – прослеживались десятилетия. Пионеры были сконструированы для путешествия к внешним планетам, после чего они продолжили движение прочь от Солнца в противоположных направлениях в плоскости Солнечной системы.

Ученые NASA в Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory – JPL) в Пасадене, Калифорния, смогли определить скорости аппаратов *Пионер* с использованием допплеровского сдвига, и, таким образом, смогли точно отследить их траектории. JPL попыталась предугадать траектории с помощью предсказания сил, действующих на аппараты от Солнца, планет и других составляющих Солнечной системы. В обоих случаях наблюдаемые траектории не соответствовали предсказанным.[82] Расхождения были вызваны дополнительным ускорением, притягивающим аппараты в направлении Солнца. Величина этого мистического ускорения была около 8×10^{-8} сантиметра в секунду за секунду – больше, чем величина аномального ускорения, измеренного в галактиках, примерно в 6 раз. Но это все еще довольно близко, учитывая, что тут нет видимой связи между двумя явлениями.

Я должен подчеркнуть, что данные в этом случае еще полностью не приняты. Хотя аномалия наблюдалась у обоих *Пионеров*, что намного более убедительно, чем если бы это было видно только у одного, они оба были построены и отслеживались JPL. Однако, данные JPL независимо анализировались учеными с помощью Компактной высокоточной программы движения спутников Аэрокосмической корпорации, и эти результаты согласовались с результатами JPL. Так что данные до настоящего времени кажутся правдоподобными. Но астрономы и физики имеют понятно высокие стандарты доказательства, особенно когда мы задаемся вопросом об уверенности в данных, что закон гравитации Ньютона нарушается сразу за пределами нашей Солнечной системы.

Поскольку расхождение мало, может быть возможным оценить его через некоторый мелкий эффект, вроде того, что сторона аппарата, обращенная к Солнцу, была чуть горячее, чем противоположная сторона; или вроде слабой утечки газа. Команда JPL приняла во внимание каждый такой эффект, они были учтены, и до сих пор не удается объяснить наблюдавшееся аномальное ускорение. Недавно были предложения послать наружу специально подготовленный зонд, сконструированный и построенный так, чтобы удалить так много подобных паразитных эффектов, насколько возможно. Такому зонду потребуется много лет, чтобы покинуть Солнечную систему, но даже так, эта миссия стоит затраченного труда. Закон гравитации Ньютона простоял более трех сотен лет; если его удастся или слегка точнее подтвердить, или доказать его неправильность, тогда больше не останется вопросов.

Что если MOND или аномалия *Пионеров* окажется правильной? Могут ли их данные быть согласованы с некоторой существующей теорией?

По самой меньшей мере, MOND не совместима со всеми версиями теории струн, изученными до сегодняшнего дня. Может ли она быть совместима с некоторой пока не известной версией теории струн? Конечно. Учитывая гибкость теории струн, нет оснований отвергать это, хотя это было бы трудно выполнить. Как насчет других теорий? Некоторые люди с трудностями пытались вывести MOND из сценария мира на бране или некоторых версий квантовой гравитации. Имеется несколько идей, но ни одна из них не работает впечатляюще. Фотини Маркопоулоу, моя коллега по Пограничному институту теоретической физики, и я рассуждали о том, как получить MOND из квантовой гравитации, но мы не смогли показать, как наша идея работает в деталях. MOND является мучительной тайной, но нет никого, кто бы решил ее сегодня, так что будем двигаться к другим подсказкам по новой физике, следующим из эксперимента.

Самые поразительные эксперименты те, которые переворачивают всеми поддерживаемые убеждения. Некоторые убеждения настолько врезались в наше мышление, что они отражены в нашем языке. Например, мы говорим о физических *константах*, чтобы обозначить те числа, которые никогда не изменяются. Сюда включается большинство основных параметров законов физики, таких как скорость света или заряд электрона. Но являются ли эти константы на самом деле постоянными? Почему не могло бы быть, что

скорость света изменяется во времени? И можно ли было бы измерить такое изменение?

В теории мультивселенной, обсуждавшейся в главе 11, мы представляли параметры, изменяющиеся по широкому диапазону различных вселенных. Но как мы можем наблюдать такие вариации в нашей собственной вселенной? Могли бы константы, такие как скорость света, изменяться со временем в нашей вселенной? Некоторые физики указывали, что скорость света измеряется в некоторой системе единиц – то есть, столько-то километров в секунду. Как, они утверждали, вы можете различить изменение скорости света со временем в ситуации, в которой сами единицы изменяются со временем?

Чтобы ответить на этот вопрос, нам нужно узнать, как определяются единицы расстояния и времени. Эти единицы основываются на некоторых физических стандартах, которые определяются в терминах поведения некоторых физических систем. Сначала стандарты ссылались на Землю: метр был одной миллионной долей расстояния от Северного полюса до экватора. Теперь стандарты базируются на свойствах атомов – например, секунда определяется в терминах колебаний атома цезия.

Если вы приняли во внимание, как определяются единицы, тогда физические константы определяются через соотношения. Например, скорость света может быть определена, если вы знаете отношение между временем, которое требуется свету, чтобы пересечь атом, и периодом света, который испускает атом. Эти виды отношений являются одними и теми же во всех системах единиц. Отношение ссылается чисто на физические свойства атомов; в его измерении не содержится решения по поводу выбора единиц. Поскольку отношения определяются в терминах одних только физических свойств, имеет смысл спросить, изменяются ли эти отношения во времени, или нет. Если изменяются, то тогда во времени изменяются и взаимоотношения между одними физическими свойствами атома и другими.

Изменения в этих отношениях могли бы быть измеримы через изменения в частотах света, испускаемого атомами. Атомы испускают свет в спектре, состоящем из многих дискретных частот, так что имеется множество отношений, определенных парами этих частот. Можно спросить, не отличаются ли эти отношения в свете от удаленных звезд и галактик – то есть, в свете, который имеет возраст в миллиарды лет.

Эксперименты такого рода не смогли обнаружить изменения в константах природы внутри нашей галактики или среди близлежащих галактик. На масштабе времени в миллионы лет, таким образом, константы не изменяются никаким обнаружимым образом. Но непрерывно продолжающийся эксперимент группы из Австралии нашел изменения в отношениях, рассматривая свет от квазаров – свет, который был излучен примерно 10 миллиардов лет назад. Австралийские ученые не изучали атомные спектры самих квазаров; то, что они делали, более остроумно. На пути от квазара до нас свет путешествовал через многие галактики. Каждый раз, когда он проходил через галактику, некоторое количество света поглощалось атомами этой галактики. Атом поглощают свет на особых частотах, но из-за эффекта Допплера частота, на которой свет был поглощен, сдвинута в направлении красного конца спектра на величину, пропорциональную расстоянию от галактики до нас. В результате спектр света от квазара был декорирован лесом линий, каждая из которых соответствовала свету, поглощенному галактикой на определенном расстоянии от нас. Изучая отношения частот этих линий, мы можем поискать изменения в фундаментальных константах за время, в течение которого свет путешествовал от квазара. Поскольку изменения должны проявиться как отношения частот и имеется несколько фундаментальных констант, физики взялись за изучение простейшего отношения – *постоянной тонкой структуры*, которая составлена из констант, определяющих свойства атома. Ее называют *альфа*, и она равна квадрату заряда электрона, деленному на скорость света и на постоянную Планка.

Австралийцы изучили измерения света от восьмидесяти экземпляров квазаров, используя очень точные измерения, полученные телескопом Кека (Keck) на Гавайях. Они вывели из своих данных, что около 10 миллиардов лет назад альфа была меньше примерно на 1 часть из 10 000.[83]

Это малое изменение, но если оно поддержится, это будет весомое открытие, самое важное за десятилетия. Это мог бы быть первый раз, когда было обнаружено, что фундаментальная константа природы меняется

во времени.

Многие астрономы, которых я знаю, держат разум открытым. По всем оценкам данные были собраны и проанализированы экстремально тщательно. Никто не нашел очевидных изъянов в методе или результатах австралийской команды, но сам эксперимент очень тонкий, привлеченные для него точности измерений находятся на пределе возможного, и мы не можем исключить вероятности, что некоторая ошибка проскользнула в анализ. Как следует из написанного, ситуация шаткая, что типично для новых экспериментальных технологий. Другие группы пытаются провести те же измерения, и результаты дискуссионны.[84]

Многие теоретики скептически настроены к свидетельствам изменений в постоянной тонкой структуры. Они беспокоятся, что такое изменение будет чрезмерно неестественным, так как оно могло бы ввести в теорию электронов, ядер и атомов временну*ю* шкалу больших порядков величины, удаленную от шкал атомной физики. Конечно, речь могла бы идти о масштабе космологической константы. Фактически, масштаб, при котором постоянная тонкой структуры изменяется, не связан ни с чем другим, что было измерено, за исключением самой космологической константы. Так что, возможно, это другое загадочное явление, которое должно иметь дело с масштабом *R*.

Еще другим проявлением масштаба *R* могут быть загадочные массы нейтрино. Вы можете конвертировать масштаб *R* к масштабу масс, используя только фундаментальные константы физики, и итог будет того же порядка величины, как и разницы между массами различных видов нейтрино. Никто не знает, почему нейтрино, легчайшие из частиц, должны иметь массы, связанные с *R*, но это так – другая мучительная подсказка.

Могла бы быть финальная экспериментальная подсказка, содержащая масштаб *R*. Объединяя его с ньютоновской гравитационнной константой, мы можем заключить, что могли бы быть эффекты, изменяющие гравитационную силу на масштабе миллиметров. В настоящее время группой в Университете Вашингтона, возглавляемой Эриком Адельбергером, проводятся ультраточные измерения силы гравитации между двумя объектами, которые разделены миллиметрами. На июнь 2006 все, что они могли сказать публично, это что они не обнаружили свидетельств, что законы Ньютона нарушаются на масштабах 6/100 миллиметра.

По крайней мере, наши эксперименты должны определенно проверять фундаментальные принципы физики. Имеется великая склонность думать, что эти принципы, будучи раз открытыми, являются вечными, пока что история говорит о другом. Почти каждый принцип, раз объявленный, занял чье-то место. Не важно, насколько они полезны, или насколько хороши приближения, которые они дают для явлений, раньше или позже большинство принципов падет, как только эксперимент прозондирует естественный мир более точно. Платон объявил, что все в небесных сферах движется по окружностям. Для этого имелись веские причины: все выше сферы Луны, верилось, является вечным и совершенным. А нет движения более совершенного, чем однородное движение по окружности. Птолемей принял этот принцип и расширил его, сконструировав эпициклы – окружности, двигающиеся по окружностям.

Орбиты планет и в самом деле очень близки к круговым, а движение планет по их орбитам является почти однородным. Как-то все было подогнано, что последняя круговая планетарная орбита принадлежала непокорному Марсу – и его орбита была столь близка к круговой, что отклонения были на пределе того, что можно было бы вывести из лучших наблюдений невооруженным глазом. В 1609 после девяти лет усердной работы над марсианской орбитой Иоганн Кеплер понял, что это должен быть эллипс. В этот год Галилей направил телескоп в небо и начал новую эру астрономии, в которой со временем стало ясно, что Кеплер был прав. Окружности являются самыми совершенными формами, но планетарные орбиты не круговые.

Когда древние объявили круг самой совершенной формой, они имели в виду, что она самая симметричная:

каждая точка на орбите такая же, как и любая другая. Принципы, которые тяжелее всего отбросить, это те, которые обращаются к нашей потребности в симметрии и повышают наблюдаемую симметрию до необходимости. Современная физика основана на коллекции симметрий, которые, как мы уверены, хранят большинство базовых принципов. Не менее, чем древние, многие современные теоретики инстинктивно верят, что фундаментальная теория должна быть самым симметричным из возможных законов. Должны ли мы доверять этому инстинкту, или мы должны прислушаться к урокам истории, которые говорят нам, что (как в примере с планетарными орбитами) природа становится менее, а не более симметричной, если мы рассматриваем ее поближе?

Самыми глубоко встроенными в современную теорию симметриями являются те, которые происходят от эйнштейновский СТО и ОТО. Самой основной из них является относительность инерциальных систем отсчета. По существу, это принцип Галилея, и он был основополагающей идеей физики с семнадцатого столетия. Он говорит, что мы не можем отличить движение с постоянной скоростью и направлением от покоя. Этот принцип отвечает за факт, что мы не чувствуем движения Земли или наше движение в самолете, двигающемся в небе с постоянной скоростью. Пока нет ускорения, вы не можете почувствовать своего собственного движения. Другой способ выразить это заключается в том, что не имеется привилегированного наблюдателя и нет привилегированной системы отсчета: пока ускорение отсутствует, один наблюдатель столь же хорош, как и другой.

Эйнштейн в 1905 сделал то, что применил этот принцип к свету. Следствием было то, что скорость света должна рассматриваться как константа вне зависимости от движения источника света или наблюдателя. Не имеет значения, как мы движемся друг относительно друга, вы и я определим у фотона в точности одинаковую скорость. Это основа эйнштейновской СТО.

Имея СТО, мы можем сделать много предсказаний о физике элементарных частиц. Вот одно, касающееся космических лучей. Это сообщество частиц, как мы уверены, в большей части протонов, которые путешествуют через вселенную. Они достигают верхних слоев атмосферы Земли, где сталкиваются с атомами в воздухе, производя ливни других видов частиц, которые могут быть обнаружены на поверхности. Никто не знает источника этих космических лучей, но чем выше их энергия, тем реже они попадаются. Они наблюдались при энергиях, более чем в 100 миллионов раз больших, чем масса протона. Чтобы иметь такую энергию, протон должен двигаться очень, очень близко к скорости света – пределу скорости, который в соответствии с СТО ни одной частице не позволено преодолеть.

Мы убеждены, что космические лучи приходят от удаленных галактик; если так, они должны были путешествовать через вселенную миллионы, а, возможно, миллиарды световых лет, прежде чем прибыли сюда. Давно в 1966 два советских физика Георгий Зацепин и Вадим Кузьмин и (независимо) физик из Корнелльского университета Кеннет Грейзен сделали выдающееся предсказание по поводу космических лучей, используя только СТО.[85] Это предсказание, обычно известное как предсказание GZK (ГЗК), достойно описания, поскольку оно только в настоящее время проверяется. Это самый экстремальный тест СТО, который когда-либо делался. Это, фактически, *первый тест приближения СТО к планковскому масштабу, масштабу, на котором мы можем увидеть эффекты квантовой теории гравитации*.

Хорошие ученые получают преимущество от всех инструментов, которые есть в их распоряжении. Грейзен, Зацепин и Кузьмин поняли, что мы имеем доступ к лаборатории, в гигантское количество раз превосходящей все, что мы когда-либо сможем построить на Земле, – к самой вселенной. Мы можем детектировать космические лучи, которые достигают Земли после путешествия в миллиарды лет через значительную часть вселенной. Когда они путешествуют, очень малые эффекты – эффекты, которые могли бы быть слишком мелкими, чтобы показаться в земных экспериментах, – могут увеличиться до точки, где мы можем их увидеть. Если мы используем вселенную как экспериментальный инструмент, мы сможем заглянуть намного глубже в структуру природы, чем люди когда-либо представляли.

Ключевой момент в том, что пространство, через которое путешествуют космические лучи, не пусто; оно заполнено космической микроволновой фоновой радиацией. Грейзен и советские ученые поняли, что протоны с энергией больше, чем особая величина, будут взаимодействовать с фотонами фоновой радиации

и что это взаимодействие будет создавать частицы (вероятнее всего, пионы, они же пи-мезоны). Это создание частиц требует энергии, а, поскольку энергия сохраняется, высоко-энергичные протоны будут замедляться. Таким образом, пространство в результате непрозрачно для прохождения любых протонов, которые несут энергии больше, чем необходимо для создания пионов.

Следовательно, пространство функционирует как фильтр. Протоны, составляющие космические лучи, могут путешествовать, только если они имеют энергии меньше, чем это требуется, чтобы создать пионы. Если они имеют больше, они делают пионы и замедляются, и так происходит до тех пор, пока протоны не замедлятся до такой точки, в которой они больше не смогут делать пионы. Это выглядит, как если бы вселенная устанавливала предел скорости для протонов. Грейзен, Зацепин и Кузьмин предсказали, что протоны с энергией больше, чем энергия, необходимая для того, чтобы сделать пионы таким способом, не будут достигать Земли. Энергия, при которой они предсказали, что будет происходить создание пиона, составляет около миллиардной доли энергии Планка (10^{19} ГэВ) и называется отсечкой GZK.

Это гигантская энергия, которая ближе к энергии Планка, чем любая другая энергия, которую мы знаем. Она более чем в 10 миллионов раз превышает энергию, которая будет достигнута на самых усложненных ускорителях частиц, планируемых в настоящее время.

Предсказание GZK обеспечивает строгий тест СТО Эйнштейна. Оно зондирует теорию на намного более высокой энергии и на скорости, более близкой к скорости света, чем это было сделано или даже возможно на Земле. В 1966, когда было сделано предсказание GZK, можно было наблюдать только космические лучи с энергиями намного ниже, чем предсказанная отсечка, но недавно были построены несколько инструментов, которые могут детектировать частицы космических лучей при или даже выше предсказанной отсечки. Один такой эксперимент, названный AGASA (по Akeno Giant Air Shower Array – Массив гигантских атмосферных ливней Акено), осуществленный в Японии, сообщает, по меньшей мере, о дюжине таких экстремальных событий. Энергия, заключавшаяся в этих событиях, превышает 3×10^{20} электрон-вольт – грубо это равно энергии, которую подающий вкладывает в быстрый мяч в бейсболе, но вся она переносится одним протоном.

Эти события могут быть сигналом, что СТО нарушается при экстремальных энергиях. Сидни Колеман и Шелдон Глэшоу предположили в конце 1990х, что нарушение СТО могло бы повысить энергию, необходимую для создания пиона, таким образом, повышая энергию отсечки GZK и позволяя протонам более высоких энергий достигать детекторов на Земле.[86]

Это не единственное возможное объяснение наблюдению таких высоко-энергичных протонов из космических лучей. Возможно, что они сами происходят близко от Земли, так что у них нет времени, чтобы быть замедленными через взаимодействие с космическим микроволновым фоном. Это можно было бы проверить, увидев, что протоны, о которых идет речь, прибывают из любого привилегированного места в небе. До сегодняшнего дня нет таких свидетельств, но возможность остается.

Есть также возможность, что эти экстремальные высоко-энергичные частицы совсем не являются протонами. Они могли бы быть пока не известными видами стабильных частиц, с массой, намного большей, чем у протона. Если это так, это тоже было бы крупное открытие.

Конечно, всегда возможно, что ошибочен эксперимент. Команда AGASA сообщает, что их измерения энергии точны с неопределенностью в 25 процентов, что является большим процентом ошибки, но все еще не достаточным, чтобы объяснить существование высоко-энергичных событий, которые они видят. Однако, их оценка степени точности их эксперимента тоже могла быть ошибочной.

К счастью, проводимый в настоящее время эксперимент разрешит рассогласования. Это Детектор космических лучей Аугера, уже запущенный в работу в пампасах западной Аргентины. Если детекторы Аугера подтвердят японские наблюдения, и если другие возможные объяснения могут быть опущены, это было бы самым важным открытием последних ста лет – первое нарушение основных теорий, содержащих в себе научную революцию двадцатого столетия.

Что означает наблюдать частицы космических лучей с такой экстремальной энергией? Когда частица такой энергии ударяется о верхние слои атмосферы, она производит ливень других частиц, которые проливаются вниз на площадь во много квадратных километров. Эксперимент Аугера состоит из сотен детекторов, занимающих более 3000 квадратных километров аргентинских пампасов. Также на этой площади несколько световых сенсоров высокого разрешения сканируют небо, чтобы захватить свет, произведенный ливнем частиц. Объединяя сигналы, полученные от всех этих детекторов, исследователи Аугера могут определить энергию исходной частицы, которая врезалась в атмосферу, точно так же, как направление, с которого она прибыла.

Как об этом пишут, обсерватория Аугера только выпустила свои первые данные. Хорошая новость, что эксперимент работает хорошо, но все еще не вполне достаточно данных, чтобы решить, имеется ли отсечка, предсказанная на основе СТО, или нет. Все еще разумно надеяться, что по истечении нескольких лет будет достаточно данных, чтобы решить проблему.

Даже если команда Аугера объявит, что СТО остается жизнеспособной, одна эта находка будет самой важной в фундаментальной физике за последние двадцать пять лет – это значит, со времен неудачи поиска распада протона (см. главу 4). Долгая темная эра, во время которой теория развивалась без руководства со стороны эксперимента, наконец, закончится. Но если Аугер откроет, что СТО *не* полностью верна, это возвестит приход новой эры в фундаментальной физике. Стоит уделить некоторое время, чтобы рассмотреть последствия такой революционной находки и куда она может привести.

14. Равняясь на Эйнштейна

Предположим, что проект Аугера или некоторый другой эксперимент покажет, что СТО Эйнштейна нарушается. Это будет плохой новостью для теории струн: Это означало бы, что первое великое экспериментальное открытие двадцать первого века было полностью неожиданным для самой популярной «теории всего». Теория струн предполагает, что СТО верна точно в том виде, как она была записана Эйнштейном сто лет назад. На самом деле важным достижением теории струн было сделать теорию струн согласующейся как с квантовой теорией, так и с СТО. Так что теория струн предсказывает, что независимо от того, как далеко находятся их источники друг от друга, фотоны с разными частотами путешествуют с одной и той же скоростью. Как мы видели, теория струн не делает много предсказаний, но это одно из них; фактически, это единственное предсказание теории струн, которое может быть проверено с помощью существующей технологии.

Что означало бы для предсказаний СТО быть фальсифицированными? Имеются две возможности. Одна в том, что СТО не верна, но другая возможность приводит к углублению СТО. На этом разграничении основывается история, возможно, самой удивительной новой идеи, появившейся в фундаментальной физике в последнее десятилетие.

Имеются несколько экспериментов, которые могли бы обнаружить нарушение или модификацию СТО. Эксперимент Аугера мог бы сделать это, но также это могли бы сделать наши наблюдения гамма-вспышек. Это гигантские взрывы, которые за несколько секунд могут произвести столько света, сколько излучает целая галактика. Как подразумевает название, б*о*льшая часть этого света излучается в виде гамма-лучей, которые являются очень энергичной формой фотонов. Сигналы от этих взрывов достигают Земли в среднем около раза в день. Впервые они были обнаружены в конце 1960х военными спутниками, построенными для поиска нелегальных испытаний ядерного оружия. Сегодня они наблюдаются научными спутниками, чья цель и заключается в их обнаружении.

Мы не знаем точно, что является источником гамма-вспышек, хотя имеются правдоподобные теории. Они могут возникать от столкновения двух нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры. Каждая пара могла бы вращаться друг вокруг друга миллиарды лет, но такие системы нестабильны. Поскольку они излучают энергию в виде гравитационных волн, они очень медленно сближаются в направлении друг друга по спирали, пока, наконец, не столкнутся, породив самое неистовое и энергичное из известных событий.

СТО Эйнштейна говорит нам, что весь свет путешествует с одинаковой скоростью независимо от его частоты. Гамма-вспышки обеспечивают лабораторию для проверки этого утверждения, поскольку они дают очень короткую вспышку фотонов в широком диапазоне энергий. Самое важное, им могут потребоваться миллиарды лет, чтобы достичь нас, и в этом заключается сердцевина эксперимента.

Предположим, что Эйнштейн ошибся и фотоны с различными энергиями путешествуют со слегка различными скоростями. Если два фотона, созданные в одном и том же удаленном взрыве, достигли Земли за разные времена, это, несомненно, будет указывать на нарушение СТО.

Что могло бы подразумевать такое важное открытие? Это могло бы, в первую очередь, зависеть от физического масштаба, на котором происходит нарушение. Одна ситуация, когда мы ожидаем, что разрушение СТО происходит на планковской длине. Вспомним из предыдущих глав, что длина Планка составляет около 10^{-20} от размера протона. Квантовая теория говорит нам, что этот масштаб представляет порог, ниже которого классическая картина пространства-времени распадается. Эйнштейновская СТО является частью классической картины, так что мы можем ожидать, что она нарушится точно в этой точке.

Могут ли какие-нибудь эксперименты увидеть эффект нарушения структуры пространства и времени на планковском масштабе? С помощью современной электроники могут быть обнаружены очень мелкие разницы во временах прибытия фотонов, но достаточно ли современная электроника хороша, чтобы измерить даже еще более ничтожные эффекты квантовой гравитации? За десятилетия мы, теоретики, приучились, что планковская длина столь мала, что ни один осуществимый сегодня эксперимент не смог бы ее обнаружить. Точно так же большинство профессоров физики сотню лет назад были уверены, что атомы слишком малы, чтобы увидеть их, мы повторяли эту ложь в бесчисленных статьях и лекциях. Но это ложь.

Поразительно, это говорилось, пока в середине 1990х для нас не стало ясно, что мы на самом деле могли бы прозондировать масштаб Планка. Как временами происходит, несколько людей осознали это, но в итоге были отвергнуты, когда они попытались опубликовать свои идеи. Одним был испанский физик Луис Гонсалес-Местрес из Центра национальных научных исследований в Париже. Открытие, подобное этому, может быть сделано несколько раз независимо, пока кто-то не привлечет внимания сообщества специалистов, в известном смысле, навязав его. В данном случае это был Джованни Амелино-Камелиа из Университета Рима. Сейчас, разменяв свой пятый десяток лет, Амелино-Камелиа энергичен, сфокусирован и влюблен в физику, со всем шармом и огнем, ассоциирующимися с южной Италией. Квантово-гравитационное сообщество счастливо считать его своим членом.

Когда Амелино-Камелиа был постдоком в Оксфорде, он установил себе задачу поиска способа наблюдения физики на планковском масштабе. В то время это казалось совершенно сумасшедшей целью, но он вызвался доказать, что общепринятое знание неверно и можно достичь некоторого способа сделать это. Он был вдохновлен проверками распада протона. Распад протона (см. главу 4) был предсказан как экстремально редкое событие, но если вы соберете достаточно протонов вместе, вы могли бы ожидать увидеть его. Гигантское число протонов выполнило бы функцию усилителя, сделав видимым нечто экстремально малое и редкое. Вопрос, которым задался Амелино-Камелиа, был в том, а не мог бы какой-то такой усилитель помочь обнаружить явления на планковском масштабе.

Мы уже отмечали два примера успешного усиления: космические лучи и фотоны от гамма-вспышек. В обоих случаях мы использовали саму вселенную как усилитель. Ее огромные размеры очень сильно усиливают вероятность экстремально редких событий, а гигантское количество времени, которое нужно свету, чтобы пропутешествовать через нее, может усилить мельчайшие эффекты. На то, что эти виды

экспериментов могли бы теоретически сигнализировать о нарушении СТО, внимание обращалось и ранее. Амелино-Камелиа открыл именно то, что мы могли бы на самом деле разработать эксперименты для зондирования планковского масштаба, а поэтому квантовой гравитации.

Типичное изменение в скорости фотона из-за квантовой гравитации должно было бы быть неправдоподобно малым, но эффект чрезвычайно усиливается за время его путешествия от гамма вспышки, которое может составлять миллиарды лет. Физики несколько лет назад осознали, используя грубые оценки размера эффектов квантовой гравитации, что промежуток времени между прибытиями фотонов с различной энергией, которые путешествовали так долго, мог бы составлять около 1/1000 секунды. Это мельчайший промежуток времени, но он хорошо попадает в область, которая может измеряться современной электроникой. На самом деле новейший детектор гамма-лучей, названный GLAST (Gamma Ray Large Area Space Telescope – Пространственный Гамма-лучевой Телескоп Большой Площади), имеет этот уровень чувствительности. Он запланирован к запуску летом 2007*, и его результаты страстно ожидаются.

---

* По сообщению НАСА запуск GLAST планируется в начале 2008. – *(прим. перев.)*

С того времени, как барьер был впервые пробит Амелино-Камелиа и его сотрудниками, мы открыли, что имеется множество способов зондирования планковского масштаба реальными экспериментами. Сумасшедший вопрос Амелино-Камелиа стал респектабельной областью науки.

Так предполагаемые новые экспериментальные результаты противоречат СТО на планковском масштабе. Что это могло бы сказать нам о природе пространства и времени?

Я упоминал в начале этой главы, что имеются две возможности. Мы уже обсуждали одну, которая состоит в том, что принцип относительности движения неверен – что означает, что мы должны на самом деле различать абсолютное движение от абсолютного покоя. Это было бы провал принципа, который был осью колеса физики со времен Галилея. Я лично нахожу эту возможность отвратительной, но, как ученый, я должен допускать, что это реальная возможность. На самом деле, если результаты AGASA, японского эксперимента по космическим лучам, подтвердятся, такое нарушение в СТО могло уже быть видно.

Но это единственная возможность? Большинство физиков, вероятно, могли бы сказать, что если фотоны с различными энергиями путешествуют с различными скоростями, то СТО неверна. Я определенно сказал бы так десять лет назад. Но я ошибся бы.

СТО Эйнштейна основывается на двух постулатах: Один есть относительность движения, а второй есть постоянство и универсальность скорости света. Может ли первый постулат быть верным, а второй ложным? Если это невозможно, Эйнштейн не стал бы выдвигать два постулата. Но я не думаю, что многие люди осознавали до недавнего времени, что вы можете получить последовательную теорию, в которой вы измените только второй постулат. Оказывается, что вы можете это сделать, и разработка этого была одной из самых возбуждающих вещей, в которых я имел счастье принимать участие на протяжении моей карьеры.

Новая теория названа *деформированной* или *двойной СТО*, для краткости DSR (deformed, doubly special relativity). Она возникла из простого вопроса, который кажется приводящим к парадоксу.

Как отмечалось, мы убеждены, что длина Планка есть своего рода порог, ниже которого обнаруживается новый вид геометрии, из тех, что по своей внутренней сути квантово-механический. Различные подходы к квантовой гравитации согласуются в одном: Планковская длина в некотором смысле есть размер минимальной вещи, которая может быть наблюдаема. Вопрос в том, будут ли *все наблюдатели* согласны с тем, что это самая короткая длина?

Согласно СТО Эйнштейна различные наблюдатели не согласуются по поводу длин движущихся объектов. Наблюдатель, совпадающий с метровой палкой, скажет, что ее длина метр. Но любой наблюдатель,

двигающийся по отношению к первому, будет наблюдать ее более короткой. Эйнштейн назвал это *феноменом сокращения длины*.

Но это подразумевает, что не может *быть* такой вещи как «самая короткая длина». Не имеет значения, насколько коротким что-либо является, вы можете сделать его еще короче, начав двигаться относительно него со скоростью очень близко к скорости света. Таким образом, обнаруживается противоречие между идеей планковской длины и СТО.

Теперь вы можете подумать, что кто-то, профессионально вовлеченный в проблему квантовой гравитации, мог бы споткнуться об это противоречие. Вы можете даже подумать, что некоторый блестящий студент на первом курсе физфака поднял этот вопрос. Как никак, каждый выдающийся физик, отвечающий за самую тяжелую работу в теории струн и квантовой гравитации, однажды был наивным студентом. Не должны ли были, по меньшей мере, несколько из них увидеть эту проблему? Но, насколько мне известно, очень немногие это сделали до недавнего времени.

Один из них был Джованни Амелино-Камелиа. В некоторый момент в 1999 он пришел к только что описанному парадоксу, и он решил его. Его идея была в расширении рассуждений, которые привели Эйнштейна к СТО.

Второй постулат СТО, который говорит, что скорость света универсальна, оказывается почти противоречащим сам себе. Почему? Рассмотрим отдельный протон, отслеживаемый двумя наблюдателями. Предположим, что два наблюдателя двигаются по отношению друг к другу. Если они измеряют скорость этого отдельного протона, мы обычно ожидали бы, что они получат различные ответы, поскольку так ведут себя нормальные объекты. Если я вижу автобус, обгоняющий меня, что выглядит для меня, как будто он едет со скоростью 10 километров в час, поскольку я нахожусь в автомобиле, с визгом несущемся по автостраде при 140 километрах в час, наблюдатель, стоящий на обочине дороги, будет видеть автобус, двигающийся со скоростью 150 км/час. Но если я наблюдаю фотон при тех же условиях, СТО говорит, что придорожный наблюдатель измерит ту же самую скорость фотона, которую он имеет и по моему мнению.

Так почему здесь нет противоречия? Ключ в том, что мы не измеряем скорость непосредственно. Скорость есть отношение: Это определенное расстояние, отнесенное к определенному времени. Центральное прозрение Эйнштейна в том, что различные наблюдатели измеряют фотон, имеющий одну и ту же скорость, даже если они двигаются по отношению друг к другу, поскольку они различным образом измеряют пространство и время. Их измерения времени и расстояния изменяются от одного к другому таким образом, что одна скорость, а именно, световая, является универсальной.

Но если мы можем проделать это с одной константой, почему не можем с другой? Не могли бы мы сыграть тот же трюк с расстоянием? Это значит, мы понимаем, что в общем случае наблюдатели измеряют двигающуюся метровую палку как имеющую меньше метра в длину. Это будет верно для большинства длин, но не можем ли мы устроить вещи так, что, когда мы в конце получим любыми путями планковскую длину, эффект пропадет? Это означает, что если палка в точности планковской длины, все наблюдатели будут согласны с ее длиной, даже если она движется. Не можем ли мы тогда получить две универсальные величины, скорость и длину?

Эйнштейн сформировал первый трюк, поскольку ничто не может двигаться быстрее, чем свет. В мире имеются два вида вещей – вещи, которые двигаются со скоростью света, и вещи, которые двигаются медленнее, чем скорость света. Если один наблюдатель видит нечто, двигающееся медленнее скорости света, все наблюдатели будут видеть то же. А если один наблюдатель видит нечто, двигающееся точно со скоростью света, все наблюдатели тоже будут согласны с этим.

Идея Амелино-Камелиа была в том, чтобы сыграть ту же игру с длиной. Он предложил модифицировать правила, по которым измерения пространства и времени отличаются от одного наблюдателя к другому, так что если нечто имеет планковскую длину, тогда все наблюдатели будут согласны, что это имеет планковскую длину, а если оно длиннее, чем длина Планка, все наблюдатели будут согласны по этому

поводу тоже. Эта схема может быть последовательной, поскольку ничто не может быть меньше для любого наблюдателя, чем длина Планка.

Амелино-Камелиа быстро нашел, что имеется модификация уравнений СТО Эйнштейна, которая реализует эту идею. Он назвал ее *двойной СТО*, поскольку трюк, который сделал относительность специальной, теперь был сыгран два раза. Я следил за его попытками придумать способ прозондировать планковский масштаб, но в 2000, когда он разослал препринт с идеей двойной СТО, я с первого раза ее не понял.[87]

Это смущающее обстоятельство, но тут есть нечто даже еще более смущающее. Примерно десятью годами раньше я натолкнулся на совершенно тот же парадокс. Он возник в работе, которую я вел в теории квантовой гравитации, именуемой *петлевая квантовая гравитация*. Детали не важны – суть в том, что наши расчеты в петлевой квантовой гравитации оказались противоречащими СТО Эйнштейна. Теперь я понимаю, что те особые вычисления на самом деле противоречили СТО Эйнштейна. Но в то время такая возможность была слишком устрашающей для рассмотрения, и после борьбы с ней я прервал всю линию исследований. На самом деле это был первый в серии шагов, которые со временем привели меня к отказу от петлевой квантовой гравитации и к временной работе на теорию струн.

Но как только я прервал исследования, я подумал: возможно, СТО могла бы быть модифицирована так, что все наблюдатели, двигаются они или нет, согласятся, что планковская длина существует. Это была ключевая идея двойной СТО, хотя я не был достаточно одарен воображением, чтобы что-нибудь сделать по этому поводу. Я подумал об этом немного, не смог придать этому никакого смысла и перешел к чему-то другому. Даже увидев статью Амелино-Камелиа десятью годами позже, я не возвратился к этому. Я пришел к идее из другого направления. В то время я был приглашенным профессором в Империал Колледже в Лондоне, где познакомился с замечательным ученым по имени Жоао Магуэйджо, блестящим молодым космологом из Португалии, примерно того же возраста, что и Джованни Амелино-Камелиа, и с одинаково бурным латинским темпераментом.

Жоао Магуэйджо был известен своей реально сумасшедшей идеей, что свет двигался быстрее в очень ранней вселенной. Эта идея делает инфляцию не необходимой, поскольку она объясняет, как каждая область в ранней вселенной могла бы быть в причинном контакте с другими и, таким образом, быть при той же самой температуре. Тогда, чтобы осуществить это, могло и не быть необходимости в экспоненциальном расширении в самые ранние моменты.

Это прекрасно, но идея чокнутая – на самом деле чокнутая. Она не согласуется ни с СТО, ни с ОТО. Для нее нет другого слова, кроме как «еретическая». Однако, британский академический мир питает слабость к еретикам, и Магуэйджо процветал в Империал Колледже. Будь он в Соединенных Штатах, я сомневаюсь, что он с подобными идеями был бы приглашен на работу даже как постдок. Магуэйджо развивал свою идею в Империале вместе с молодым профессором по имени Андреас Альбрехт, который в качестве аспиранта в Университете Пенсильвании был одним из изобретателей инфляции. Альбрехт недавно покинул Англию, чтобы вернуться в Америку. После того, как я прибыл в Империал на несколько месяцев, я нашел Магуэйджо у моей двери. Он хотел увидеть, нет ли способа сделать его идею космологии с переменной скоростью света (variable speed of light – VSL) совместимой с СТО и ОТО. Каким-то образом он почувствовал, что разговор со мной мог бы помочь.

Я не знал в то время, что это уже было сделано. На самом деле вся VSL космология была разработана раньше одаренным профессором физики из Торонто Джоном Моффатом. Во много раз больший еретик, Моффат придумал идею и разработал ее способом, который был совместим и с СТО и с ОТО, но его предложение опубликовать его теорию в научном журнале встретило отказ.

Как Жоао рассказал эту историю в 2003 в своей книге *Быстрее чем скорость света*, он изучал труд Моффата, когда он и Альбрехт пытались опубликовать их собственную статью.[88] Это характеризует Жоао, что его побуждением было записать Моффата в друзья – и, на самом деле, они остались близки. Он знал о труде Моффата к тому времени, когда начал разговор со мной, но я не думаю, что он понимал, что тот решил проблему, которую он пытался решить. Или, если понимал, ему не нравился путь, каким это

было сделано.

Джон Моффат сейчас является моим другом и коллегой в Пограничном институте теоретической физики. Нет никого, кого бы я уважал больше за его смелость и оригинальность. Я также говорил, как сильно я восторгался Джованни Амелино-Камелиа за его открытие по поводу зондирования планковского масштаба. Так что мне больно признать, что Жоао и я проигнорировали труд их обоих. В известном смысле, то, что мы сделали, хорошо, ибо мы нашли отличающееся решение проблемы, как сделать переменную скорость света совместимой с принципами относительности. Я, определенно, не стал бы пытаться, если бы я знал, что проблема уже была решена – и не один раз, а дважды.

Жоао часто приходил ко мне с этой проблемой. Я всегда находил время, чтобы поговорить с ним, поскольку я был захвачен его энергией и его свежим способом видения физики. Но за многие месяцы я не задумывался очень глубоко о том, что он говорил. Поворотный пункт пришел, когда он показал мне старую книгу, в которой проблема обсуждалась. Это был учебник по ОТО выдающегося русского математического физика по имени Владимир Фок.[89] Я знал некоторые работы Фока по квантовой теории поля (все физики их знают), но я никогда не видел его книги по относительности. Проблема Жоао заставила меня подумать о том, что было домашним заданием в книге Фока. Раз уж я увидел ее, я вспомнил мою идею десятилетней давности, и все вещи соединились вместе. Ключ был на самом деле в том, чтобы сохранить принципы СТО Эйнштейна, но изменить правила так, что все наблюдатели согласятся, что скорость света и планковский масштаб являются универсальными. На самом деле скорость, которая постоянна, больше не является скоростью всех фотонов, а только очень низкоэнергетических фотонов.

Сначала мы не видели, что делать с этой идеей. Мы имели историю с некоторыми кусками математики, но еще не полную теорию. Примерно в это время я предпринял путешествие с остановкой в Риме, где я потратил много часов, разговаривая с Джованни Амелино-Камелиа. Неожиданно я понял, что он говорил. Он пришел к той же самой идее, которую мы развивали, и он пришел к ней раньше и разработал ее первым. Тем не менее, на том пути, которым он разрабатывал идею, имелось много всего, чего я не понимал. Математика казалась трудной для понимания, и она оказалась завязанной на формализм, придуманный несколькими десятками лет ранее группой польских математических физиков – формализм, в который я определенно не смог проникнуть.

Мне потребовалось много лет, чтобы разобраться в математических тонкостях предмета. Я находил их непостижимыми, пока не начал читать ранние статьи английского математика Шена Маджида, который был одним из изобретателей квантовых групп. Его труд был тесно связан с математикой, которую использовала польская группа. Маджид начинал с некоторых воображаемых идей о том, как выразить в единой математической структуре существенные прозрения относительности и квантовой теории. Это привело его к квантовым группам (которые являются революционным расширением идеи симметрии), а затем к модификациям теории относительности на основе объекта, который мы называем некоммутативной геометрией. Его прозрения были в ядре математики, требуемой, чтобы ясно выразить теорию DSR, но они были затеряны – по меньшей мере, для меня – в запутанных статьях, где я впервые увидел их выраженными.

В любом случае Жоао и я проигнорировали математику и пытались говорить о физике. Наш прогресс был прерван моим отбытием в сентябре 2001 в Канаду, во вновь созданный Пограничный институт. Месяцем позже Жоао прибыл в Пограничный институт как его второй посетитель. Теория, наконец, встала на место в послеполуденное время после его прибытия. Мы работали в престижной части города Ватерлоо, в кафе с названием *Симпозиум* с комфортабельными диванами. У него были расстроены биоритмы в связи с перелетом через несколько часовых поясов. Я был травмирован и истощен, только что вернувшись после уикэнда в Нью-Йорке, следующего за событиями 11 сентября. Я впадал в апатию, когда говорил Жоао, затем просыпался и находил его дремлющим. Я вспоминал что-то, что он сказал, как я терял сознание, я набрасывал что-то на блокноте, затем опять впадал в спячку. Я просыпался, когда он начинал говорить, и мы имели несколько взаимно вразумительных минут, прежде чем он опять впадал в спячку. Так и прошло послеобеденное время, мы говорили, вычисляли и дремали по очереди. Я могу представить, что думал персонал кафе. Но в некоторый момент во время этого полудня мы случайно обнаружили ключевой фактор,

который ускользал от нас в течение месяцев, заключающийся в замене импульсов на положения. Когда мы были готовы, мы изобрели вторую версию DSR, намного более простую, чем та, которую разработал Джованни Амелино-Камелиа. Теперь она известна у специалистов как DSR II.

Это и было, грубо говоря, то, что Жоао хотел. В нашей версии фотоны, которые имели больше энергии, путешествовали быстрее. Таким образом, в очень ранней вселенной, когда температура была очень высока, скорость света была, в среднем, быстрее, чем сегодня. Если вы идете еще дальше назад во времени, и температура подходит к планковской энергии, скорость света становится бесконечной. Потребовалось немного дольше повозиться, чтобы показать, что это привело к версии теории с переменной скоростью света, которая также согласуется с принципами *общей* теории относительности, но мы, в конечном счете, получили это тоже. Мы назвали эту теорию *Гравитационной радугой* в честь новеллы Томаса Пинчона*.

---

* Имеется в виду Gravity Rainbow (1973) – самый известный роман Томаса Пинчона, одного из крупнейших американских прозаиков XX века (р. 1937). – *(прим. перев.)*

«Двойная СТО» дурацкое название, но оно укоренилось. Идея элегантна, до настоящего времени много обсуждается и изучается. Мы не знаем, описывает ли она природу, но мы знаем о ней достаточно, чтобы полагать, что она могла бы.

Первые отклики на DSR былы не воодушевляющими. Некоторые люди говорили, что она непоследовательна; другие говорили, что она ничто иное как очень сложный способ записать эйнштейновскую СТО. Несколько человек критиковали теорию в обоих направлениях.

Мы ответили на второе критическое замечание, показав, что теория делает предсказания, отличающиеся от предсказаний СТО. Ключевая роль в этих дискуссиях была сыграна высококультурным фанатиком тяжелой металлической музыки по имени Джерзи Ковальски-Гликман из Варшавы. (Возможно, только европейцы могли бы в полном смысле слова быть ими обоими.) Я убежден, что он был первой персоной, которая на самом деле осмыслила то, что говорил Джованни Амелино-Камелиа; я определенно понял его статью, которая была краткой и кристалльно прозрачной, прежде чем я понял статью Джованни, которая была длинной, напечатанной мелким шрифтом и полной отступлений и деталей. Джерзи нашел несколько важных следствий двойной СТО, и именно он привел в порядок взаимосвязь между нашими попытками и более ранним математическим трудом его польских коллег.

Водоразделом в моем понимании DSR и того, как связаны различные подходы к ней, была дискуссия, которую мы имели однажды после обеда в доме моей подруги в Торонто. Джованни, Джерзи, Жоао и я сжались вокруг небольшого стола в ее узкой столовой в попытке добраться до дна наших разногласий и недопониманий. Джерзи спокойно настаивал, что если все имеет смысл, оно должно подходить к непротиворечивой математической структуре, которая для него означает некоммутативную геометрию, которую изучали он и его польские коллеги. Жоао говорил, что все, что делается в физике, должно быть понятно без причудливой математики. Джованни утверждал, что легко говорить бессмыслицы об этих теориях, если вы не позаботились о том, какие математические выражения соответствуют вещам, которые могли бы быть измерены. В некоторый момент – я не помню особый комментарий, который побудил его, – Джованни схватил огромный хлебный нож и взвыл: «Если то, что вы говорите, верно, я перережу себе глотку. *Сейчас же!*»

Мы уставились на него, и после мгновения шокированного молчания мы свалились в хохоте, так уж он сделал. Только затем каждый из нас был готов начать слушать то, что говорят другие.

Фактически, имелись различные версии DSR, которые давали различные предсказания. В некоторых имелась энергия, которую нельзя было превысить, аналогично максимальной скорости света. В других не было максимальной энергии, но был максимальный импульс. Это неудачно, так как это уменьшает предсказательную силу теории, но это, кажется, не портит последовательность теории, так что это нечто, с чем нам надлежит жить.

Непротиворечивость DSR была показана через демонстрацию, что имеется возможная вселенная, в которой она могла бы быть верна. Возможная вселенная подобна нашей собственной с одним отличием, которое в том, что пространство имеет только два измерения. В 1980е было открыто, что квантовая гравитация может быть точно определена в мире с только двумя пространственными измерениями. Мы называем это *2+1 квантовой гравитацией*, для двух измерений пространства и одного времени. Более того, если там нет материи, теория может быть решена точно – то есть, можно найти точные математические выражения, которые отвечают на любой вопрос, который может быть задан о мире, который описывает теория.

Оказалось, что DSR верна в любом мире с двумя измерениями пространства, квантовой гравитацией и материей. Особая форма DSR, которая понята, была форма, оригинально открытая Джованни. Когда Джерзи и я просмотрели назад литературу, мы увидели, что некоторые люди находили свойства этого двумерного мира, которые являются аспектами DSR, но они сделали это до того, как концепция DSR была изобретена. Возбужденные, мы описали это Лауренту Фрейделю, коллеге по Пограничному институту из Франции, который работал над квантовой гравитацией. Он сказал нам, что он не только уже знает это, но и пытался поговорить об этом с нами ранее. Я согласен, это верно. В обсуждении Фрейдель имеет больше энергии, чем я, и я обычно перестаю понимать, о чем он говорит, на что он отвечает путем более быстрого и громкого разговора. В любом случае, мы написали вместе статью, которая объяснила, почему DSR должна быть верной во вселенных с двумя измерениями пространства.[90]

Через некоторое время после этого Фрейдель в сотрудничестве с Этерой Ливин, постдоком в Пограничном институте из Французского Таити, показал в деталях, как DSR срабатывает в теории 2+1 мерной гравитации с материей.[91] Это важные результаты, поскольку факт, что имеется модель возможного мира, где DSR верна, гарантирует последовательность теории.

Имеется еще одна проблема, которая должна была быть решена, прежде чем DSR могла бы рассматриваться как жизнеспособная теория. Как отмечалось, во многих версиях имеется максимум энергии, которую частица может иметь, которая обычно принимается за планковскую энергию. Это не есть экспериментальная проблема, поскольку самая большая энергия, которая наблюдалась, была энергия протона в детекторе космических лучей AGASA, которая составляла примерно миллиардную часть от максимума.

Но на первый взгляд кажется, что ограничение должно быть применимо к любым сортам тел: Не только электроны и протоны, но и собаки, звезды и футбольные мячи должны все иметь энергию меньше максимума. Это явно противоречит природе, поскольку любая система с более чем 10^{19} протонами имеет энергию больше планковской массы. Собаки имеют около 10^{25} протонов, звезды даже еще больше. Мы называем это *проблемой футбольного мяча*.

Проблема футбольного мяча существует в двумерном мире, но нет необходимости решать ее там, поскольку мы не делаем экспериментов в этом мире. В этом мире просто верно, что любой объект имеет энергию меньше планковской, независимо от того, как много частиц его составляют.

Имеется естественное решение проблемы футбольного мяча, которое может сохраниться в нашем мире трех пространственных измерений. Жоао и я предложили это решение раньше. Идея в том, что тело имеет максимум энергии, которая есть одна энергия Планка на каждый протон, который тело содержит. Таким образом, футбольный мяч с примерно 10^{25} протонами не может иметь энергию больше, чем 10^{25} планковских энергий. Тогда нет проблем с наблюдениями.

Мы могли бы увидеть, что это решение могло бы работать, но мы не знаем, почему оно должно быть правильным. Объяснение недавно было дано Этерой Ливин и Флорианом Джирелли, другим постдоком из Франции в Пограничном институте. Они нашли изумительный способ переформулировать теорию так, что это решение выпадает.[92] Теперь, когда проблема футбольного мяча решена, нет препятствий, насколько я знаю, чтобы DSR была верна для нашего мира. Она может быть хорошо подтверждена наблюдениями Аугера и GLAST, которые будут сделаны в следующие несколько лет; если нет, это, по меньшей мере, покажет ее ложность, что означает, что DSR является настоящей научной теорией.

Теперь мы можем вернуться к вопросу о том, какие последствия могли бы быть для различных теорий квантовой гравитации, если СТО нарушается. Мы видели, что такое нарушение может означать две различных вещи, в зависимости от того, что нам говорит эксперимент. СТО могла бы нарушиться полностью на этом масштабе, что реально означало бы, что там имеется абсолютное различие между движением и покоем. Или СТО могла бы сохраниться, но углубиться, как в DSR.

Могла бы теория струн пережить оба изменения? Определенно, все известные теории струн должны были бы оказаться ложными, поскольку они очень сильно зависят от сохранения СТО. Но может все же быть, что имеется версия теории струн, которая могла бы быть последовательной при обоих типах нарушения? Некоторые струнные теоретики убеждали меня, что даже если СТО оказалась бы нарушенной или модифицированной, когда-нибудь может быть изобретена форма теории струн, которая смогла бы приспособить все, что бы ни увидел эксперимент. Они, возможно, правы. Теория струн, как отмечалось, имеет много ненаблюдаемых областей. Имеется множество путей изменить фон теории струн так, что останется преимущественное состояние покоя, так что относительность движения будет неправильной. Вообще, таким образом можно было бы сконструировать версию теории струн, которая согласна с экспериментом.

Как насчет DSR? Могла бы иметься версия теории струн, совместимая с ней? Как было написано, Жоао Магуэйджо и я являемся единственными людьми, кто исследовал этот вопрос, и свидетельства, которые мы получили, двойственны. Мы смогли сконструировать теорию струн, которая удовлетворяет некоторым тестам согласованности, но мы не преуспели в поиске ясного ответа в отношении других тестов.

Итак, хотя все известные версии теории струн согласуются с СТО, может также быть, что, если СТО окажется недействительной, струнные теоретики могут быть в состоянии приспособиться к такому открытию. Что удивляет меня, так это почему струнные теоретики думают, что это поможет их делу. Для меня есть много указаний, что теория струн не в состоянии сделать любое предсказание, поскольку она не более, чем коллекция теорий, по одной для каждого из громадного числа возможных фонов. Вопрос, являющийся предметом наблюдений GLAST и Аугера, заключается в симметрии пространства и времени. В фоново-зависимой теории это решается выбором фона. Пока теория позволяет это, вы можете получить любой ответ, какой вам нужно получить, путем выбора подходящего фона. Это сильно отличается от формирования предсказаний.

Что насчет других подходов к квантовой гравитации? Предсказывает кто-либо нарушение СТО? В фоново-независимой теории ситуация сильно отличается, поскольку геометрия пространства-времени не определяется выбором фона. Эта геометрия должна возникать как следствие решения теории. Фоново-независимый подход к квантовой гравитации должен делать истинное предсказание по поводу симметрии пространства и времени.

Как я обсуждал ранее, если мир имеет два измерения пространства, мы знаем ответ. Там нет свободы; вычисления показывают, что частицы ведут себя в соответствии с DSR. Может ли то же самое быть верным для реального мира с тремя пространственными измерениями? Моя интуиция говорит, что могло бы, и мы имеем результаты в петлевой квантовой гравитации, которые обеспечивают подтверждение, но еще не доказательство, этой идеи. Моя самая необоснованная надежда в том, что этот вопрос может быть урегулирован быстро, прежде чем наблюдения скажут нам, что верно. Было бы чудесно получить реальное предсказание квантовой теории гравитации, а затем показать, что оно ложно недвусмысленным наблюдением. Единственная вещь, которая была бы еще лучше, это если эксперимент подтвердил бы предсказание. В обоих случаях мы делали бы реальную науку.

15. Физика после теории струн

В последних двух главах мы показали, что имеются основания ожидать значительного прогресса в поиске законов природы. Имеются указания, что удивительные экспериментальные открытия могут быть прямо за углом. И далеко идущее расширение теории относительности предлагает предсказания для осуществляемых экспериментов. Верна двойная СТО или нет, это реальная наука, поскольку эксперименты, которые сейчас на полном ходу, или подтвердят, или отвергнут ее основные предсказания.

Теоретики и экспериментаторы, чью работу я описывал в последних двух главах, уже торжественно открыли пост-струнную эру в фундаментальной физике. В этой главе я предприму с вами тур по этому новому миру, освещая самые многообещающие идеи и разработки. Заглянув за пределы теории струн, мы найдем благотворное возрождение фундаментальной теории, сделанное старым способом – через тяжелое, сконцентрированное размышление об основных вопросах, заботливое по отношению как к математике, так и к экспериментальной физике. Во всех пограничных областях – квантовой гравитации, основаниях квантовой физики, физике элементарных частиц и космологии – смелые новые идеи развиваются в тандеме с захватывающими новыми экспериментами. Эти инициативы должны быть взращены, или они умрут незрелыми, но они показывают большие перспективы.

Начнем с области, в которой мы видели быстрый прогресс: с подходов к квантовой гравитации, которые, скорее, включают в себя великое открытие Эйнштейна, что геометрия пространства-времени является динамической и зависящей от обстоятельств, чем уклоняются от него..

Как я несколько раз подчеркивал, недостаточно иметь теорию с гравитонами, сделанными из струн, шевелящихся в пространстве. Нам нужна теория о том, *что составляет пространство*, независимая от фона теория. Как описывалось ранее, успех ОТО демонстрирует, что геометрия пространства не фиксирована. Она является динамической и эволюционирует во времени. Это основное открытие, которое не может быть отменено, так что любая будущая теория должна заключать его в себе. Теория струн этого не делает, так что, если теория струн обоснована, за ней должна лежать более фундаментальная теория – которая является фоново-независимой. Другими словами, обоснована теория струн или нет, мы все еще должны открыть независимую от фона теорию квантовой гравитации.

К счастью, благодаря трудам последних двадцати лет мы многое знаем о том, как построить такую теорию. Область фоново-независимых подходов к квантовой гравитации берет начало с 1986, точно через два года после первой революции теории струн. Катализатором была публикация физика-теоретика Абэя Аштекара, тогда работавшего в Сиракузском университете, о переформулировке ОТО, которая делает ее уравнения намного проще.[93] Достаточно интересно, он сделал это, выразив теорию Эйнштейна в форме, очень близкой к форме калибровочных теорий – теорий, лежащих в основе стандартной модели физики частиц.

К сожалению, большинство струнных теоретиков не уделило внимания выдающемуся прогрессу, сделанному в области квантовой гравитации за эти последние двадцать лет, так что две области развивались отдельно друг от друга. Это отсутствие контактов может показаться странным постороннему. Оно определенно кажется странным мне, поэтому я делал все, от меня зависящее, чтобы изменить его, убеждая каждое сообщество в достоинствах другого. Но я не могу сказать, что я достиг большого успеха. Отказ людей, которые работают над одной и той же проблемой с разных точек зрения, общаться друг с другом является частью того, что привело меня к уверенности, что физика находится в кризисе – и к тяжелым раздумьям о том, как ее спасти.

Вся атмосфера области квантовой гравитации отличается от атмосферы теории струн. Тут нет гранидиозных теорий, нет прихотей или моды. Здесь есть просто немного очень хороших людей, тяжело работающих над несколькими тесно связанными идеями. Имеется несколько направлений исследований, но имеются также некоторые объединяющие идеи, что придает этой области слаженность в целом.

Главная объединяющая идея проста для постановки: *не стартовать с пространства или с чего-либо, движущегося в пространстве*. Стартовать с чего-либо, что является чисто квантово-механическим и имеет,

вместо пространства, некоторый вид чисто квантовой структуры. Если теория верна, тогда пространство должно возникать, представляя некоторые усредненные свойства структуры, – в том же смысле, как температура возникает как представление усредненного движения атомов.

Таким образом, многие квантово-гравитационные теоретики уверены, что имеется более глубокий уровень реальности, на котором пространство не существует (это есть доведение фоновой независимости до ее логического предела). Поскольку теория струн требует существования фоново-независимой теории, чтобы иметь смысл, многие струнные теоретики указывали, что они согласны. В определенном ограниченном смысле, если сильная форма предположения Малдасены (см. главу 9) окажется верной, девятимерная геометрия возникнет из фиксированной трехмерной геометрии. Таким образом, не удивительно слышать слова Эдварда Виттена, которые он недавно произнес в Институте теоретической физики Кавли в Университете Калифорнии, Санта Барбара, что "большинство струнных теоретиков допускают, что пространство-время является «эмерджентным феноменом» на языке физики конденсированной материи."[94]

Некоторые струнные теоретики, наконец, начали принимать во внимание этот момент, и можно только надеяться, что они доведут до конца изучение конкретных результатов, которые уже были получены. Но, фактически, большинство людей в квантовой гравитации имеют в виду нечто более радикальное, чем предположение Малдасены.

Начальная точка не имеет ничего общего с геометрией. Что имеют в виду многие из нас, когда мы говорим, что пространство является эмерджентным, это что континуум пространства является иллюзией. Точно так же, как кажущаяся гладкость воды или шелка скрывает факт, что вещество сделано из дискретных атомов, мы полагаем, что гладкость пространства не является реальным и что пространство возникает как приближение чего-то, состоящего из строительных блоков, которые мы можем оценить. В некоторых подходах просто предполагается, что пространство сделано из дискретных «атомов»; в других это предположение строго выводится путем комбинирования принципов ОТО и квантовой теории.

Другая объединяющая идея заключается в важности *причинности*. В классической ОТО пространственно-временная геометрия говорит лучам света, как распространяться. Поскольку ничто не может двигаться быстрее света, раз уж вы знаете, как распространяется свет, вы можете определить, какие события могут быть причиной отдельных событий. Если даны две происходящие вещи, первая может быть причиной второй, только если частица, распространяющаяся от первой ко второй, движется со скоростью света или медленнее, чем скорость света. Таким образом, пространственно-временная геометрия содержит информацию о том, какие события являются причиной каких других событий. Об этом говорят, как о *причинной структуре пространства-времени*.

Дело не только в том, что пространственно-временная геометрия определяет, чем являются причинные связи. Это может быть перевернуто: причинные связи могут определять пространственно-временную геометрию, поскольку бо́льшая часть информации, которая вам нужна, чтобы определить геометрию пространства-времени, фиксирована, если вы знаете, как перемещается свет.

Легко говорить о пространстве или пространстве-времени, возникающем из чего-то более фундаментального, но те, кто попытался развить эту идею, нашли ее трудной для реализации на практике. На самом деле несколько ранних подходов потерпели неудачу. Мы теперь уверены, что они потерпели неудачу потому, что они игнорировали роль, которую причинность играет в пространстве-времени. Сегодня многие из нас, работая над квантовой гравитацией, уверены, что *причинность сама является фундаментальной* – и, таким образом, имеет смысл даже на уровне, где понятия пространства и времени исчезают.[95]

Самые успешные на сегодняшний день подходы к квантовой гравитации объединяют эти три базовые идеи: что пространство является *эмерджентным*, что более фундаментальное описание *дискретно* и что это описание содержит *причинность* в некотором фундаментальном смысле.

Текущее изучение квантовой гравитации в некоторых отношениях аналогично физике столетней давности, когда люди были уверены в атомах, но не знали деталей атомной структуры. Но, несмотря на это неведение, Людвиг Больцман, Эйнштейн и другие смогли довольно много понять о веществе, используя только факт, что оно состоит из атомов. Ничего больше не зная, кроме приблизительного размера атома, они даже смогли сделать предсказания наблюдаемых эффектов. Аналогично, мы смогли вывести важные результаты из простых моделей, основанных только на трех принципах эмерджентности, дискретности и причинности. Фиксируя наше незнание деталей, эти модели делают простейшие возможные предположения о дискретных единицах пространства-времени, а затем смотрят, что из них может получиться.

Самая успешная из этих моделей была придумана Ренатой Лолл и Яном Амбьорном и названа *причинными динамическими триангуляциями*.[96] Это, возможно, слишком техническое название для подхода с очень простой стратегией, которая заключается в представлении базовых причинных процессов простыми строительными блоками, которые на самом деле выглядят как кубики, с которыми играют дети (см. Рис. 14). Это может быть названо подходом Бакминстера Фуллера*. Главная идея в том, что пространственно-временная геометрия выстроена в виде кучи большого количества блоков, каждый из которых представляет простой причинный процесс. Имеется несколько простых правил, которые управляют тем, как блоки могут свалиться в кучу, и простая формула, которая дает квантово-механическую вероятность для каждой такой модели квантового пространства-времени.

---

* Ричард Бакминстер Фуллер (1985-1983) – американский архитектор, дизайнер, инженер и изобретатель. Наиболее известен изобретенный им «геодезический купол», пространственная конструкция из прямых стержней, который произвел революцию в инженерии. В его честь названы *фуллерены*, открытая в 1985 новая аллотропная форма углерода в виде объемных структур с ячеистой поверхностью. – *(прим. перев.)*

Одно из правил, которые постулировали Лолл и Эмбьорн, заключается в том, что каждое квантовое пространство-время должно рассматриваться как последовательность возможных пространств, которые сменяются одно за другим, подобно тиканию универсальных часов. Утверждается, что временная координата произвольна, как и в ОТО, но факт, что история мира может рассматриваться как последовательность геометрий, которые сменяют одна другую во времени, отсутствует.

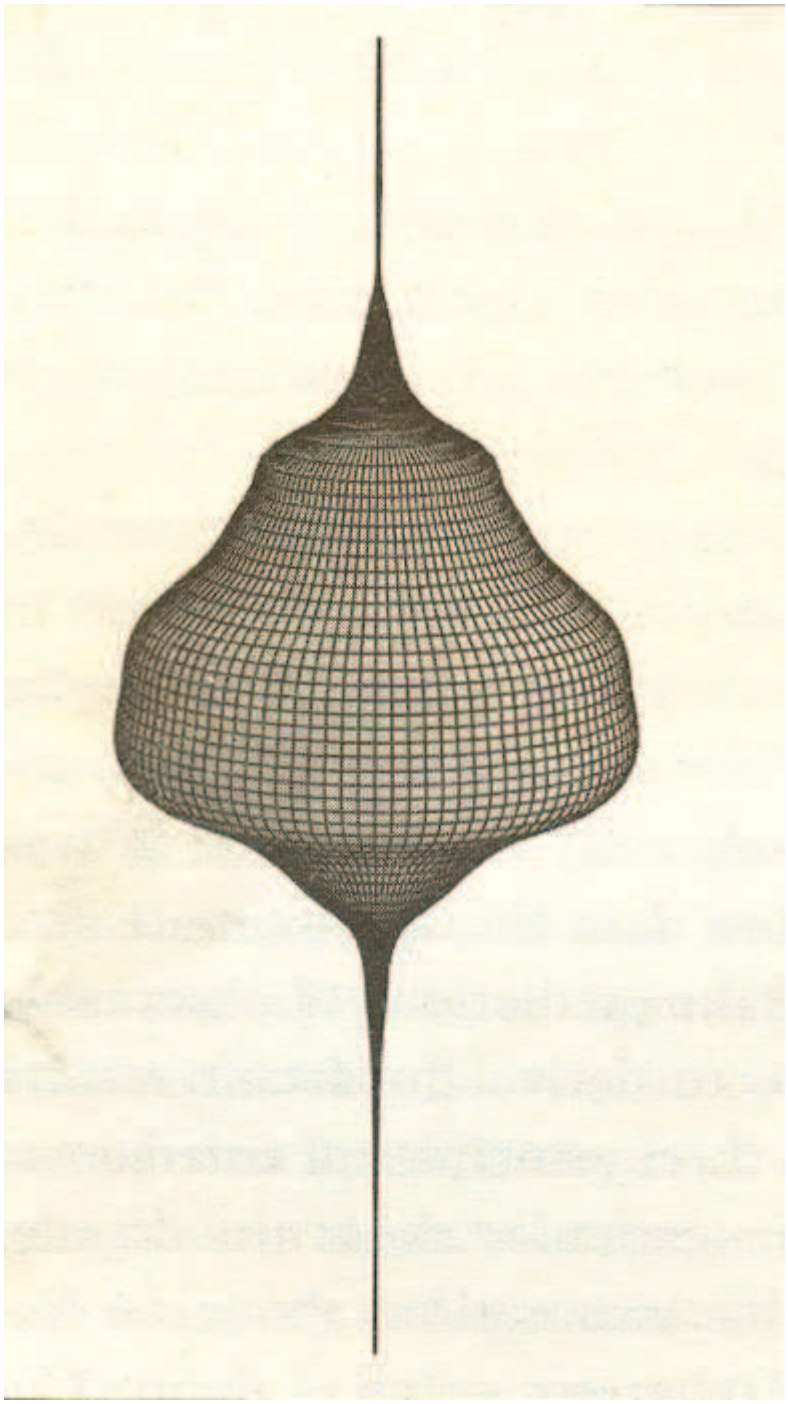

Рисунок 14. Модель квантовой вселенной в соответствии с программой причинной динамической триангуляции. Рисунок изображает историю модельной квантовой вселенной с тремя пространственными измерениями, одно из которых направлено горизонтально, и одним временным, которое направлено вертикально. Любезно предоставлено Ренатой Лолл.

Задавая это ограничение плюс несколько простых правил, они получили существенное свидетельство, что классическое пространство-время с его тремя измерениями пространства и одним времени возникает из простой игры по собиранию кубиков. Это до сих пор лучшее свидетельство в фоново-независимой квантовой теории гравитации, что классическое пространство-время с тремя измерениями пространства может появляться из чисто квантового мира, основанного только на дискретности и причинности. В особенности, Амбьорном и другими было показано, что если не установлено ограничение в отношении причинности, то классическая пространственно-временная геометрия не возникает.

Одним из следствий этих результатов было то, что большинство широко распространенных идей по поводу квантовой гравитации, фактически, были неправильными. Например, Стивен Хокинг и другие

использовали утверждение, что причинная структура является несущественной, и что вычисления в квантовой гравитации могут быть проведены при игнорировании разницы между временем и пространством – разницы, которая существует даже в теории относительности, – и трактовке времени, как если бы оно было просто другим измерением пространства. Это Хокинг и имел в виду в тех таинственных заявлениях в своей книге *Краткая история времени*, что время является «воображаемым». Результаты Амбьорна и Лолл показывают, что эта идея неверна.

До их работы некоторые люди исследовали идею, что фундаментальные строительные кирпичики пространства-времени должны содержать причинность, но никто не дошел до теории, из которой можно было бы показать появление классического пространства-времени. Одна такая формулировка, названная *теорией причинного ряда*, выбирала фундаментальные единицы пространства-времени в виде голых событий, чьими единственными атрибутами были списки других событий, которые могли бы быть их причиной и причиной которых могли бы быть они. Эти идеи были даже проще, чем модели Лолл и Амбьорна, поскольку тут не было требования глобальной последовательности во времени. До сих пор было невозможно показать возникновение классического пространства-времени из этой теории.

Однако имелся один важный триумф теории причинного ряда, который заключался в том, что она, кажется, решила проблему космологической константы. Путем простого предположения, что классический мир возникает из теории причинного ряда, физик Сиракузского университета Рафаэль Д. Соркин и его сотрудники предсказали, что космологическая константа должна быть примерно столь же мала, как впоследствии и показали наблюдения. Насколько я осведомлен, до сегодняшнего дня это единственное чистое решение проблемы космологической константы. Одно это решение плюс добавление теории, базирующейся на таких простых предположениях, делает это исследовательской программой, которая заслуживает продолжения поддержки.

Английский математический физик Роджер Пенроуз также предложил подход к квантовому пространству-времени, базирующийся на принципе, что на самом деле фундаментальными являются отношения причинности. Его подход называется *теорией твисторов*. Он и несколько приверженцев работали над ним с 1960х. Подход базируется на обращении обычного способа рассмотрения событий в пространстве-времени. Традиционно рассмативают, что происходит как исходное, и взаимоотношения между ним и тем, что происходит как вторичное. Таким образом, события реальны, а причинные взаимоотношения между событиями являются просто свойствами событий. Пеонроуз нашел, что этот способ взгляда на вещи может быть перевернут. Вы можете принять элементарные причинные процессы как фундаментальные, а затем определять события в терминах соответствий между причинными процессами. Более точно, вы можете создать новое пространство, состоящее из всех световых лучей в пространстве-времени. Затем вы можете перенести всю физику в это пространство световых лучей. Результатом является немыслимо красивая конструкция, которую Пенроуз назвал *пространством твисторов*.

Первые двадцать лет после того, как Пенроуз ее предложил, теория твисторов быстро развивалась. Удивительным и красивым образом многие из основных уравнений физики смогли быть переписаны в терминах пространства твисторов. На самом деле казалось, как если бы вы могли рассматривать световые лучи как самые фундаментальные вещи, а пространство и время просто как аспекты отношений между ними. Тут имелся также прогресс в унификации, поскольку уравнения, описывающие разные виды частиц, приобретали одну и ту же простую форму, когда записывались в терминах пространства твисторов. Теория твисторов частично реализовала идею, что пространство-время может возникать из другой структуры. События нашего пространства-времени оказываются определенными поверхностями, подвешенными в пространстве твисторов. Геометрия нашего пространства-времени также возникает из структуры пространства твисторов.

Но с этой картиной имеются проблемы. Главная из них в том, что пространство твисторов понято только в отсутствие квантовой теории. И, хотя пространство твисторов очень отличается от пространства-времени, оно является гладкой геометрической структурой. До сих пор никто не знает, на что похоже квантовое пространство твисторов. Имеет ли смысл квантовая теория твисторов и будет ли возникать из него пространство-время, еще нужно показать.

Центром теории твисторов в 1970е был Оксфорд, и я был одним из многих, кто выкраивал время, чтобы провести его здесь. Я находил тут пьянящую атмосферу, не похожую на атмосферу, которая позже выработалась в центрах по струнной теории. Пенроузом глубоко восхищались, как будут позже Эдвардом Виттеном. Я сталкивался с экстремально талантливыми молодыми физиками и математиками, которые пылко верили в теорию твисторов. Некоторые пришли к известности как математики.

Теория твисторов определенно привела к важным успехам в математике. Она дала нам более глубокое понимание некоторых важных уравнений физики, включая главные уравнения теории Янга-Миллса, которые являются основой стандартной модели физики частиц. Теория твисторов также дала нам глубокое и ошеломляюще красивое понимание определенного набора решений ОТО Эйнштейна. Эти прозрения оказались важными в некоторых других разработках, включая петлевую квантовую гравитацию.

Но теория твисторов до сих пор не развилась в жизнеспособный подход к квантовой гравитации – главным образом, потому, что она не нашла способа включить в себя большую часть ОТО. Однако, Пенроуз и несколько коллег все еще не отбрасывают ее. И несколько струнных теоретиков, возглавляемых Виттеном, недавно начали работать над ней, привнеся в пространство твисторов некоторые новые методы, которые быстро двинули вещи вперед. Этот подход до настоящего времени не помог теории твисторов развиться в квантовую теорию гравитации, но он революционизировал изучение калибровочных теорий – указание, если это кому-нибудь нужно, на то, что было ошибкой так долго пренебрегать теорией твисторов.

Роджер Пенроуз не единственный первоклассный математик, который придумал свой собственный подход к квантовой гравитации. Возможно, величайший из живущих математиков – и, определенно, самый странный – это Ален Конне, который является сыном руководителя детективов из Марселя и работает большую часть своей жизни в Париже. Я люблю разговаривать с Аленом. Я не всегда понимаю всего, что он говорит, но я ухожу с головокружением как от глубины его идей, так и от абсурдности его шуточек. (К этому склоняются все разговоры, даже когда они идут о черных дырах или ужасных многообразиях Калаби-Яу.) Однажды он прервал выступление на конференции по квантовой космологии требованием, чтобы для оказания почтения мы все должны вставать всякий раз, когда упоминается вселенная. Но если я не всегда понимаю Алена, он всегда понимает меня; он один из тех людей, которые думают так быстро, что они заканчивают ваше высказывание за вас и постоянно усовершенствуют то, о чем вы собирались говорить. Еще он настолько расслаблен и уверен в себе и своих идеях, что в нем нет ни грамма соперничества, и он проявляет искреннее любопытство к идеям других.

Подход Алена к квантовой гравитации восходил к основам и к изобретению новой математики, которая полностью объединяет математические структуры геометрии и квантовую теорию. Это математика, на которую я ссылался в главе 14, названа *некоммутативной геометрией*. Слово «некоммутативная» указывает на тот факт, что величины в квантовой теории представляются объектами, которые не коммутируют: То есть, AB не равно BA. Некоммутативность квантовой теории тесно связана с фактом, что вы не можете измерить положение частицы и ее импульс одновременно. Но это кажется противоречащим сущности геометрии, которая стартует от наглядного образа поверхности. Именно способность формировать наглядный образ подразумевает полную определенность и полное знание. Сделать версию чего-то, подобного геометрии, построенной на вещах, которые не могут быть известны одновременно, на самом деле являлось основательным шагом. Что убеждает в ней, так это то, что она предлагает новую унификацию некоторых областей математики, одновременно продвигаясь вперед как подходящая математика для следующего этапа в физике.

Некоммутативная геометрия обнаруживалась в нескольких подходах к квантовой гравитации, включая теорию струн, DSR и петлевую квантовую гравитацию. Но ни один подход не охватил глубины оригинальной концепции Конне, которую он и несколько математиков, большей частью во Франции, продолжают развивать.[97] Различные ее версии, которые появляются в других программах, основываются на поверхностных идеях, таких как выразить координаты пространства и времени в некоммутативных величинах. Идея Конне намного глубже; она заключается в унификации оснований алгебры и геометрии. Она могла бы быть изобретением только того, кто не просто изучает математику, но стратегически и творчески мыслит по поводу структуры математического знания и его будущего.

Подобно старым твисторным теоретикам, несколько последователей, которыми обзавелся Конне, являются его ярыми сторонниками. Для конференции по различным подходам к квантовой гравитации в Университете штата Пенсильвания Ален порекомендовал известного старейшего французского физика по имени Дэниэл Кастлер. Джентльмен за неделю до конференции прервал свое путешествие, попав в велокатастрофу, но он выкарабкался из госпиталя и добрался до Марсельского аэропорта, прибыв точно вовремя, чтобы открыть заседание следующим заявлением: «Имеется один истинный Ален, и я пророк его». Струнные теоретики являются не единственными, кто имеет своих истинных верующих, но некоммутативные геометры, несомненно, имеют лучшее чувство юмора.

Один из успехов некоммутативной геометрии в том, что она приводит непосредственно к стандартной модели физики частиц. Как открыли Ален и его коллеги, если вы берете максвелловскую теорию электромагнетизма и записываете ее в простейшей возможной некоммутативной геометрии, выскакивает модель Вайнберга-Салама, объединяющая электромагнетизм со слабыми ядерными силами. Другими словами, слабые взаимодействия вместе с Хиггсовыми полями обнаруживаются автоматически и корректно.

Вспомним из главы 2, что один из способов сказать, является ли особое объединение успешным, заключается в том, что там немедленно появляется обоснование, что теория согласуется с природой. Тот факт, что правильная унификация слабой и электромагнитной сил происходит из простейшей версии идеи Конне, является неотразимым. Это разновидность вещи, которая могла бы произойти с теорией струн, но не произошла.

Имеется другой набор подходов, которые фокусируются на том, как могли бы классическое пространство-время и физика частиц возникнуть из лежащей в основании дискретной структуры. Эти модели разрабатывались физиками из теории конденсированной материи, такими как Роберт Лафлин из Стэнфорда, Григорий Воловик из Хельсинского технологического университета и Ксао-Гань Вэн из Массачусетского технологического института. Недавно эти подходы были подхвачены молодыми людьми в квантовой гравитации, такими как Олаф Дрейер. Эти модели примитивны, но они показывают, что аспекты СТО, такие как универсальность и верхний предел скорости, могут появляться из определенных видов дискретных квантовых систем. Одно провокационное утверждение Воловика и Дрейера заключается в том, что проблема космологической константы решена – поскольку, прежде всего, она никогда не была на самом деле проблемой. Они утверждают, что идея, что здесь была проблема, была ошибкой, следствием слишком серьезного восприятия фоново-зависимых теорий. Ошибка, утверждают они, возникает из разделения на части основных переменных теории и трактовки некоторых из них как замороженного фона, а других как квантовых полей.[98] Если они правы в отношении этого, это будет самым важным результатом, который был получен от квантовой гравитации за много лет.

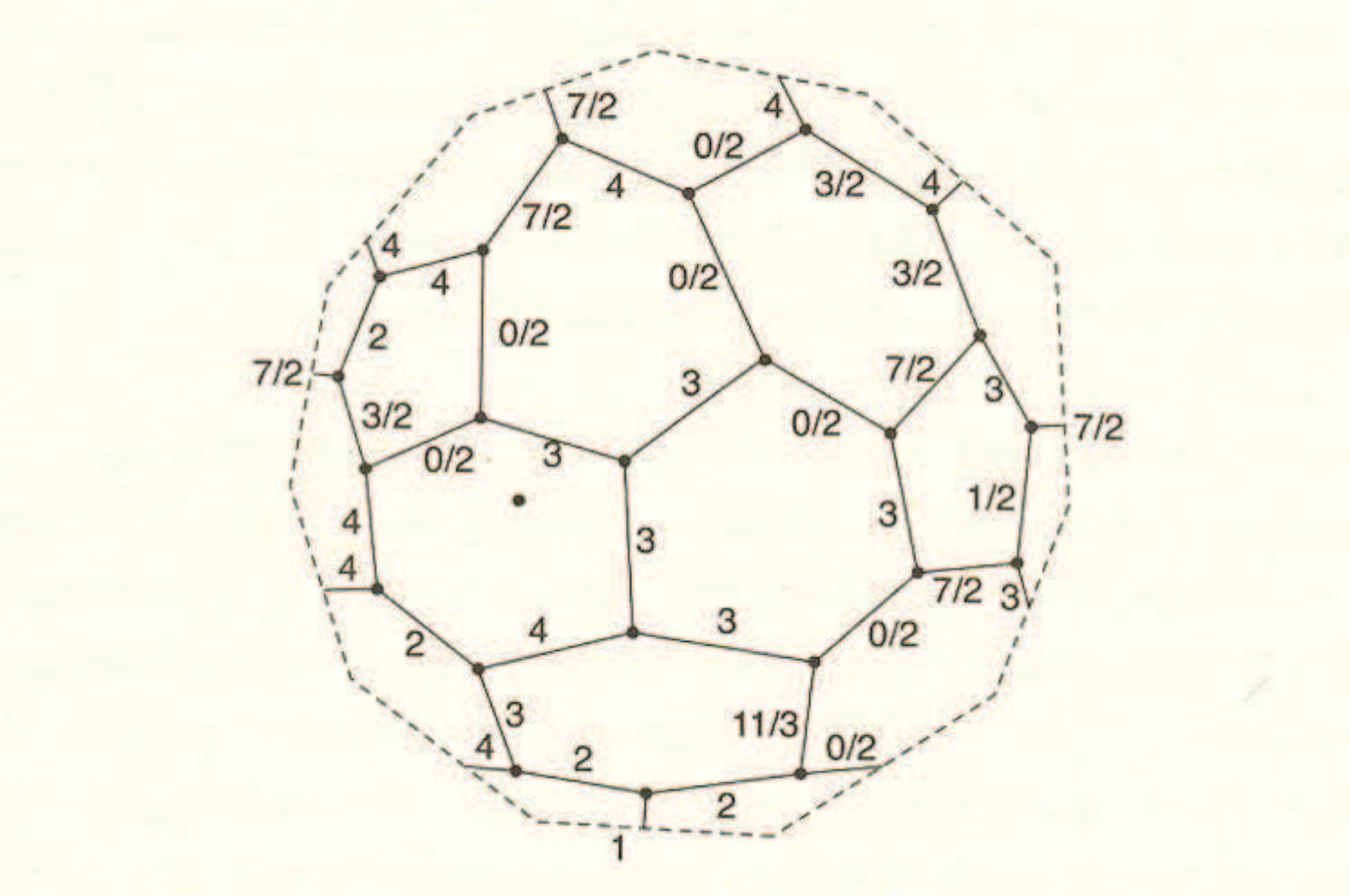

Рисунок 15. Спиновая сеть, которая является состоянием квантовой геометрии в петлевой квантовой гравитации и связанных с ней теориях. Показаны кванты объема, ассоциированные с вершинами, и кванты площади, ассоциированные с ребрами.

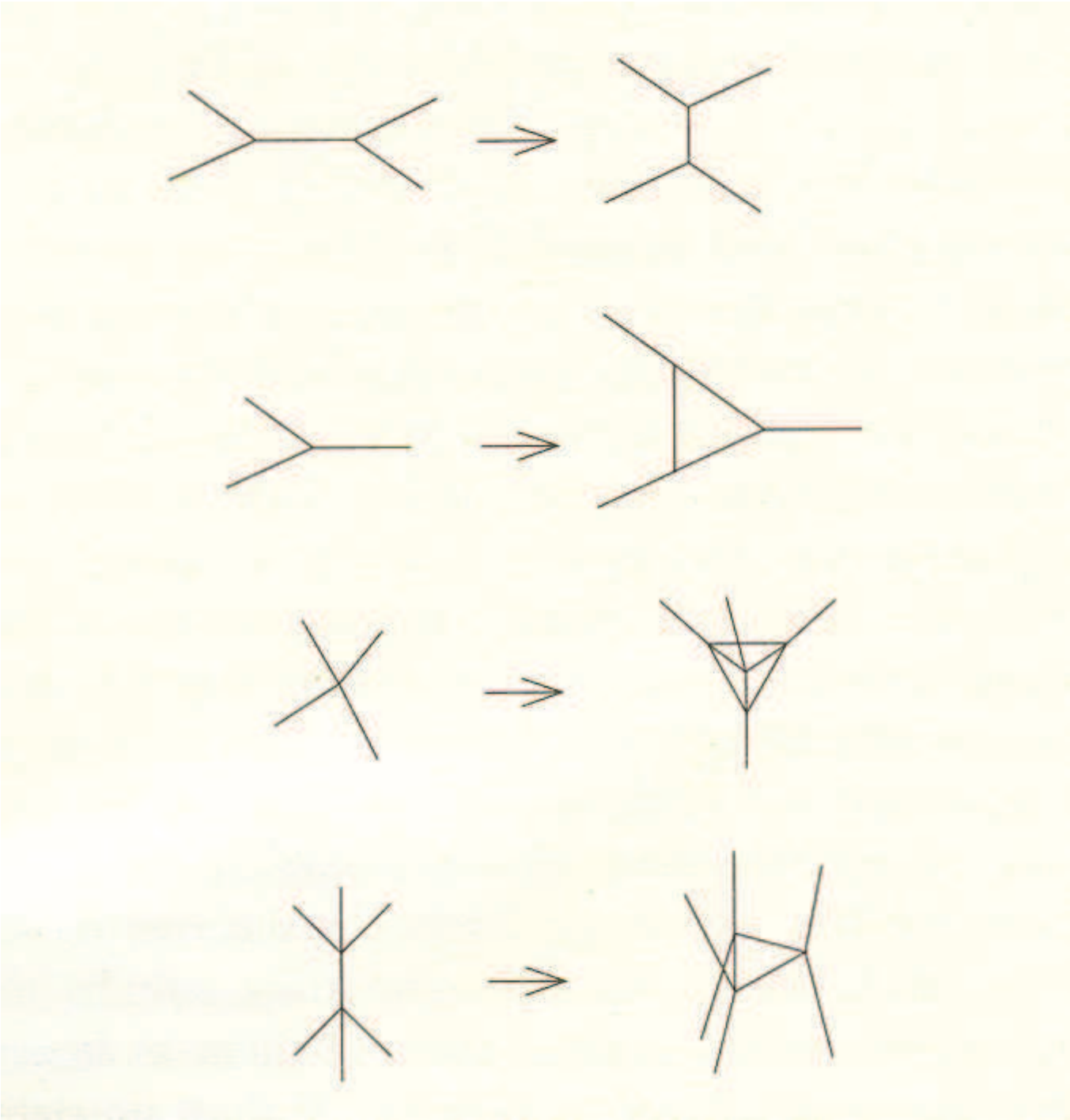

Рисунок 16. Спиновые сети эволюционируют во времени через серии локальных изменений, подобных этим.

Все подходы, которые я описал, являются независимыми от фона. Некоторые начинают с предположения, что пространство-время составлено из дискретных строительных кирпичиков. Одному подходу удалось сделать лучше и показать, что дискретность пространства и времени является следствием соединения вместе принципов квантовой теории и теории относительности. Это то, чего достигла *петлевая квантовая гравитация*. Она так и начала с революционной переформулировки Аштекаром эйнштейновской ОТО в 1986. Мы нашли, что, не добавляя входных данных, но просто переписав теорию Эйнштейна в терминах нового набора переменных, стало возможным точно вывести, что такое квантовое пространство-время.

Ключевая идея, стоящая за петлевой квантовой гравитацией, на самом деле стара, что мы уже обсуждали в главе 7. Это идея описания поля, подобного электромагнитному полю, прямо в терминах линий этого поля. (Слово «петлевая» возникает из того факта, что в отсутствие вещества линии поля могут замыкаться, формируя петли.) Это было предвидение Хольгера Нильсена, Александра Полякова и Кеннета Вильсона, и это была одна из идей, которая привела к теории струн. В своей основе теория струн является развитием

этой провидческой идеи в контексте фиксированного фона пространства и времени. Петлевая квантовая гравитация есть та же самая идея, но развитая в полностью фоново-независимой теории.

Этот труд стал возможным благодаря великому открытию Аштекара, что ОТО могла бы быть выражена на языке, подобном языку калибровочных полей. Метрика пространства-времени тогда оказывается чем-то подобным электрическому полю. Когда мы пытаемся рассмотреть соответствующие силовые линии квантово-механически, мы вынуждены рассматривать их без фона, поскольку его нет – полевые линии уже описывают геометрию пространства. Раз уж мы сделали их квантово-механически, классической геометрии не остается. Так что мы заново изобрели квантовую теорию поля, чтобы работать без фоновой метрики. Чтобы сократить длинную историю, это пытались сделать многие люди с различными уровнями по физике и математике, но мы преуспели. Результат является петлевой квантовой гравитацией.

Итоговая картина очень проста. Квантовая геометрия есть определенный вид графа (см. Рис. 15). Квантовое пространство-время есть последовательность событий, по которым эволюционирует граф через локальные изменения в своей структуре. Это лучше всего иллюстрируется примерами, которые показаны на Рис. 16.

Теория приводит ко многим успехам. Она оказывается конечной в трех смыслах:

1. Квантовая геометрия конечна, так что площади и объемы выражаются в дискретных единицах.

2. Когда вы вычисляете вероятности для квантовой геометрии эволюционировать в направлении различных историй, они всегда предстают конечными (по меньшей мере, в определенной формулировке теории, именуемой *моделью Барретта-Гране*).

3. Когда теория присоединяется к главной теории, такой как стандартная модель физики частиц, бесконечности, которые исходно возникают, переводятся в конечные величины: то есть, без гравитации вы должны проводить специальную процедуру, чтобы изолировать бесконечные выражения и перевести их в разряд ненаблюдаемых; с гравитацией просто нет бесконечных выражений.

Нужно подчеркнуть, что тут нет неопределенности, связанной с предварительными установками. Главные результаты петлевой квантовой гравитации обеспечиваются строгими теоремами.

Самый большой вызов, который с самого начала стоял перед петлевой квантовой гравитацией, заключался в объяснении, как возникает классическое пространство-время. В последние несколько лет был достигнут важный прогресс в этой проблеме, частично благодаря изобретению новых приблизительных процедур. Они показали, что теория имеет квантовые состояния, описывающие вселенные, где геометрия является в хорошем приближении классической. Важный шаг был предпринят год назад Карло Ровелли из Центра теоретической физики в Марселе и его коллегами, они нашли строгое подтверждение, что петлевая квантовая гравитация предсказывает, что две массы должны притягиваться друг к другу в точности тем образом, как это установлено законом Ньютона.[99] Эти результаты также указывают, что при низких энергиях теория имеет гравитоны, так что петлевая квантовая гравитация на самом деле является теорией гравитации.

Сегодня предпринимается много усилий, чтобы применить петлевую квантовую гравитацию к явлениям реального мира. Имеется точное описание горизонта черной дыры, в рамках которого получается правильная энтропия. Эти результаты согласуются со старыми предсказаниями Бекенштейна и Хокинга, что черные дыры имеют энтропию и температуру (см. главу 6). Как я писал, одной из горячих тем среди аспирантов и постдоков является предсказание модификаций результата Хокинга для термодинамики черных дыр, которые, когда они будут измерены при некотором будущем изучении физической черной дыры, смогли бы подтвердить или фальсифицировать петлевую квантовую гравитацию.

Петлевая квантовая гравитация является также основой для моделей, которые позволяют изучать сильно изменяющиеся во времени геометрии внутри черных дыр. Несколько вычислений дают свидетельство, что сингулярности внутри черных дыр удаляются. Таким образом, время может продолжаться и за пределами точки, в которой классическая ОТО предсказывает, что оно должно закончиться. Где это происходит? Это, кажется, происходит внутри вновь созданных областей пространства-времени. Сингулярность заменяется тем, что мы называем *пространственно-временным отскоком*. Прямо перед отскоком материя внутри черной дыры сжимается. Сразу после отскока она расширяется, но внутрь нового региона, который не существовал ранее. Это очень удовлетворительный результат, так как он подтверждает ранние рассуждения Брюса ДеВитта и Джона Арчибальда Уилера. Та же самая техника использовалась, чтобы изучить, что происходит в самой ранней вселенной. И опять теоретики нашли подтверждение, что сингулярность устраняется, что означает, что вселенная существовала и до Большого Взрыва.

Устранение сингулярности в черных дырах обеспечивает естественный ответ на информационный парадокс Хокинга для черных дыр. Как отмечалось в главе 6, информация не теряется; она переходит в новый регион пространства-времени.

Проверка того, что петлевая квантовая гравитация дает нам по поводу очень ранней вселенной, заключается в возможности рассчитать предсказания для реальных наблюдений. Два постдока в Пограничном институте, Стефан Хофманн и Оливер Винклер, недавно смогли вывести точные предсказания для квантово-гравитационных эффектов, которые могут быть обнаружены в будущих наблюдениях космического микроволнового фона.[100]

Теоретики также заняты попытками предсказать, что мы можем увидеть в экспериментах Аугера и GLAST, оба из которых укажут, нарушается ли СТО при планковских энергиях. Одно из великих преимуществ фоново-независимых подходов заключается в их способности делать предсказания для таких экспериментов. Сохраняется или нарушается принцип относительности инерциальных систем отсчета? Модифицируется ли он, как в теориях DSR? Как я подчеркивал, ни одна фоново-зависимая теория не может делать реальные предсказания для этих экспериментов, поскольку ответ на вопрос уже получен выбором фона. Теория струн, в особенности, предполагает, что относительность инерциальных систем остается верной в исходной форме, которую дал Эйнштейн в СТО.

Только фоново-независимые подходы могут сделать предсказание о судьбе принципов СТО, поскольку свойства классического пространства-времени возникают как решение динамической проблемы.

Петлевая квантовая гравитация обещает быть способной делать уверенные предсказания. В моделях, в которых пространство имеет только два измерения, это уже сделано: предсказано, что DSR верна. Имеются указания, что то же самое предсказание сохранится и для нашего трехмерного мира, но до сегодняшнего дня для этого нет убедительных доказательств.

Как насчет других больших проблем, таких как объединение частиц и сил? До недавнего времени мы думали, что петлевая квантовая гравитация мало что может сказать о других проблемах, отличных от квантовой гравитации. Мы могли бы ввести материю в теорию, и хорошие результаты не должны были бы измениться. Если бы мы захотели, мы могли бы ввести всю стандартную модель физики частиц – или любую другую модель физики часиц, которую мы хотели изучить, – но мы не думали, что петлевая квантовая гравитация может внести что-то особенное в проблему объединения. Совсем недавно мы поняли, что мы ошибались по этому поводу. Петлевая квантовая гравитация уже имеет в себе элементарные частицы, и недавние результаты наводят на мысль, что это в точности правильная физика частиц: стандартная модель.

Год назад Фотини Маркопоулоу предложила новый способ подхода к проблеме, как из более фундаментальной теории может возникать геометрия пространства. Маркопоулоу молодой физик, работающая в квантовой гравитации, которая чаще всех удивляет меня невероятными идеями, которые оказываются правильными, и эта была одна из ее лучших идей. Вместо того, чтобы прямо спрашивать, может или нет геометрия квантового пространства-времени появиться как классическое пространство-

время, она предложила отличающийся подход, основанный на идентификации и изучении движения частиц в квантовой геометрии. Ее идея была, что частица должна быть некоторым видом эмерджентного возбуждения квантовой геометрии, путешествующего через геометрию, почти как волна путешествует через твердое тело или жидкость. Однако, чтобы была воспроизведена известная нам физика, эти эмерджентные частицы должны описываться как чисто квантовые частицы, игнорируя квантовую геометрию, через которую они путешествуют.[101]

Обычно, когда частица находится во взаимодействии с окружением, информация о ее состоянии рассеивается в окружении – мы говорим, что наступает декогерентность. Тяжело предотвратить воозникновение этой декогерентности; в этом, кстати, причина, почему тяжело сделать квантовый компьютер, который для своей эффективности зависит от нахождения частиц в чистом квантовом состоянии. Люди, которые делают квантовые компьютеры, имеют идеи о том, когда квантовая система будет оставаться в чистом состоянии, даже будучи в контакте с окружением. Во время работы с экспертами в этой области Маркопоулоу поняла, что их наработки применимы к проблеме, как квантовая частица могла бы возникнуть из квантового пространства-времени. Она обратила внимание, что, чтобы вытащить предсказания из теорий квантовой гравитации, вы можете идентифицировать такую квантовую частицу и показать ее движение, как если бы она была в обычном пространстве. В ее аналогии окружением является квантовое пространство-время, которое, будучи динамическим, постоянно изменяется. Квантовая частица должна двигаться через него, как будто бы оно было фиксированным, нединамическим фоном.

Используя эти идеи, Маркопоулоу и ее сотрудники смогли показать, что некоторые фоново-независимые теории квантовой гравитации имеют эмерджентные частицы. Но что это за частицы? Соответствуют ли они чему-либо, что наблюдается?

Вначале проблема казалась трудной, поскольку квантовая геометрия, предсказываемая петлевой квантовой гравитацией, очень сложна. Состояния частиц ассоциируются с графами, растянутыми в трехмерном пространстве. Пространство является фоном, но оно не имеет свойств, кроме своей топологии; вся информация об измерениях геометрии – вроде длин, площадей и объемов – происходит от графов. Но поскольку графы растянуты в пространстве, теория содержит в себе очень много дополнительной информации, которая, кажется, не должна ничего делать с геометрией. Это происходит вследствие бесконечного числа способов, которыми ребра графов могут запутываться, связываться и заплетаться в трехмерном пространстве.

В последнюю весну (2006) мне случилось увидеть препринт молодого австралийского физика, занимающегося частицами, по имени Сандэнс О. Бильсон-Томпсон. В нем он представил простое сплетение лент, которое совершенно замечательно точно ухватывает структуру преонных моделей физики частиц, которые я обсуждал в главе 5. (Вспомните, что эти модели постулируют гипотетические частицы, называемые преонами, как фундаментальные составляющие протонов, нейтронов и других частиц стандартной модели, считавшихся элементарными.) В его модели преон есть лента, и различные виды преонов соответствуют лентам, закрученным вправо, влево или совсем никак. Три ленты могут быть сплетены вместе, и различные способы сделать это точно соответствуют различным частицам стандартной модели.[102]

Как только я прочитал статью, я понял, что это была недостающая идея, поскольку все плетения, которые изучал Бильсон-Томпсон, могли бы возникнуть в петлевой квантовой гравитации. Это означает, что различные способы сплести и запутать ребра графов в квантовом пространстве-времени должны быть различными видами элементарных частиц. Так что петлевая квантовая гравитация относится не только к квантовому пространству-времени – она уже содержит в себе физику элементарных частиц. И если бы мы могли обнаружить игру Бильсона-Томпсона точно работающей в теории, это было бы *правильной* физикой элементарных частиц. Я спросил Маркопоулоу, а не могут ли его плетения быть ее когерентными возбуждениями. Мы пригласили Бильсона-Томпсона к сотрудничеству с нами, и после нескольких фальш-стартов увидели, что утверждение на самом деле работает во всех направлениях до конца. Сделав некоторые умеренные предположения, мы нашли, что преонная модель описывает простейшее из этих частицеподобных состояний в классе теорий квантовой гравитации.[103]

Этот результат поднял много вопросов, и ответить на них теперь является моей главной целью. Слишком рано говорить, работает ли это достаточно хорошо, чтобы дать недвусмысленные предсказания для грядущих экспериментов на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе. Но одна вещь ясна. Теория струн больше не является единственным подходом к квантовой гравитации, который также унифицирует элементарные частицы. Результаты Маркопоулоу означают, что многие независимые от фона квантовые теории гравитации содержат в себе элементарные частицы как эмерджентные состояния. И данная теория не приводит к громадному ландшафту возможных теорий. Скорее, она показывает перспективы, ведущие к однозначным предсказаниям, которые или будут в согласии с экспериментом, или нет. Самое важное, она избегает необходимости подвергать ревизии научный метод через призывание антропного принципа, что защищают Леонард Сасскайнд и другие (см. главу 11). Наука, действуя старым способом, движется вперед.

Понятно, *имеются* различные подходы к пяти фундаментальным проблемам физики. Область фундаментальной физики вне теории струн быстро прогрессирует, причем в нескольких направлениях, включающих, но не ограничивающихся причинными динамическими триангуляциями и петлевой квантовой гравитацией. Как и в любой здоровой области науки, имеется живое взаимодействие как с экспериментом, так и с математикой. Хотя в этих исследовательских программах работает не так много людей, как в теории струн, – возможно, две сотни, включая всех, – однако, достаточно много людей энергично подключаются к фундаментальным проблемам на границах науки. Большие скачки двадцатого столетия были сделаны очень немногими. Когда дело идет к революционизированию науки, значение имеет качество мышления, а не количество истинных верующих.

Однако, я хочу пояснить, что в этой новой «послеструнной» атмосфере нет ничего, что исключает изучение теории струн самой по себе. Идея, на которой она основана, – дуальность полей и струн – разделяется, как я обращал внимание, и петлевой квантовой гравитацией. К существующему кризису в физике привела не эта стержневая идея, а особый вид ее реализации, разработанный в зависимом от фона контексте – контексте, который навязывает рискованные предположения, такие как суперсимметрия и высшие измерения. Нет причин, почему бы другой подход к теории струн – более близкий к основополагающим проблемами, вроде независимости от фона и проблемам квантовой теории – не мог бы быть частью конечной истории. Но чтобы узнать это, теория струн нуждается в развитии в открытой атмосфере, в которой она рассматривается как одна идея среди нескольких, без какого-либо исходного допущения о ее окончательном успехе или неудаче. С чем новый дух физики не может быть согласен, так это с презумпцией, что одна идея имеет успех, какие бы ни были свидетельства.

Хотя сегодня среди теоретиков по квантовой гравитации есть возбуждающее ощущение прогресса, имеется также сильное ожидание, что дорога вперед принесет, по меньшей мере, несколько сюрпризов. В отличие от струнных теоретиков в веселые дни двух суперструнных революций, немного людей, работающих в квантовой гравитации, уверены, что они имеют в руках конечную теорию. Мы осознаем, что достижения независимых от фона подходов к квантовой гравитации являются необходимым этапом в завершении революции Эйнштейна. Они показывают, что может существовать последовательный математический и концептуальный язык, который объединяет квантовую теорию и ОТО. Это дает нам нечто, чего не дает теория струн, а именно возможную схему, в которой можно сформулировать теорию, которая решит все пять проблем, список который я привел в главе 1. Но мы объективно уверены, что мы еще не имеем все кусочки картины. Даже с недавними успехами еще нет идеи, которая была бы абсолютно правдоподобна.

Когда вы оглядываетесь назад на историю физики, замечается одна вещь: Когда, наконец, предлагается конечная теория, она быстро достигает триумфа. Несколько действительно хороших идей по унификации появились в форме, которая убедительна, проста и однозначна; они не пришли со списком вариантов или настраиваемых свойств. Ньютоновская механика определена тремя простыми законами, ньютоновская гравитация простой формулой с одной константой. СТО была совершенной, когда появилась. Могло потребоваться двадцать пять лет для формулирования квантовой механики, но с самого начала она развивалась в согласии с экспериментом. Многие из ключевых статей по этой теме с 1900 года или объясняли недавние экспериментальные результаты, или делали определенные предсказания для экспериментов, которые были в короткое время проведены. То же самое верно и для ОТО.

Таким образом, все восторжествовавшие теории имели следствия для эксперимента, которые было легко разработать и которые могли быть проверены в течение нескольких лет. Это не означает, что теории могли бы быть решены точно – большинство теорий точно не решатся никогда. Но это означает, что физическое прозрение немедленно приводит к предсказанию нового физического эффекта.

Чего бы другого не говорили о теории струн, петлевой квантовой гравитации и других подходах, они не добились обещанного на этом фронте. Стандартное извинение, что эксперименты на этих масштабах невозможно провести, – но, как мы видели, это не так. Так что должна быть другая причина. Я уверен, что имеется нечто основополагающее, что мы упускаем, некоторое ошибочное предположение, которое мы все делаем. Если это так, тогда нам нужно изолировать ошибочное предположение и заменить его новой идеей.

Что может быть таким ошибочным предположением? Моя догадка, что оно содержит две вещи: основания квантовой механики и природу времени. Мы уже обсуждали первое; я нахожу многообещающим, что недавно были предложены новые идеи по поводу квантовой механики, мотивированные изучением квантовой гравитации. Но я сильно подозреваю, что ключом является время. Все больше и больше я чувствую, что квантовая теория и ОТО обе глубоко ошибаются по поводу природы времени. Не достаточно объединить их. Имеется более глубокая проблема, возможно, восходящая назад к истокам физики.

Примерно в начале семнадцатого столетия Декарт и Галилей оба сделали самое удивительное открытие: Вы можете нарисовать график с одной осью, представляющей пространство, и с другой, являющейся временем. Тогда движение через пространство становится кривой на этом графике (см. Рис.17). Таким образом, время представляется, как если бы оно было еще одним измерением пространства. Движение заморожено, вся история постоянного движения и перемен представляется для нас как нечто статическое и неизменное. Если я догадался (а строить догадки это то, что я делаю, чтобы заработать на жизнь), это и есть сцена для криминала.

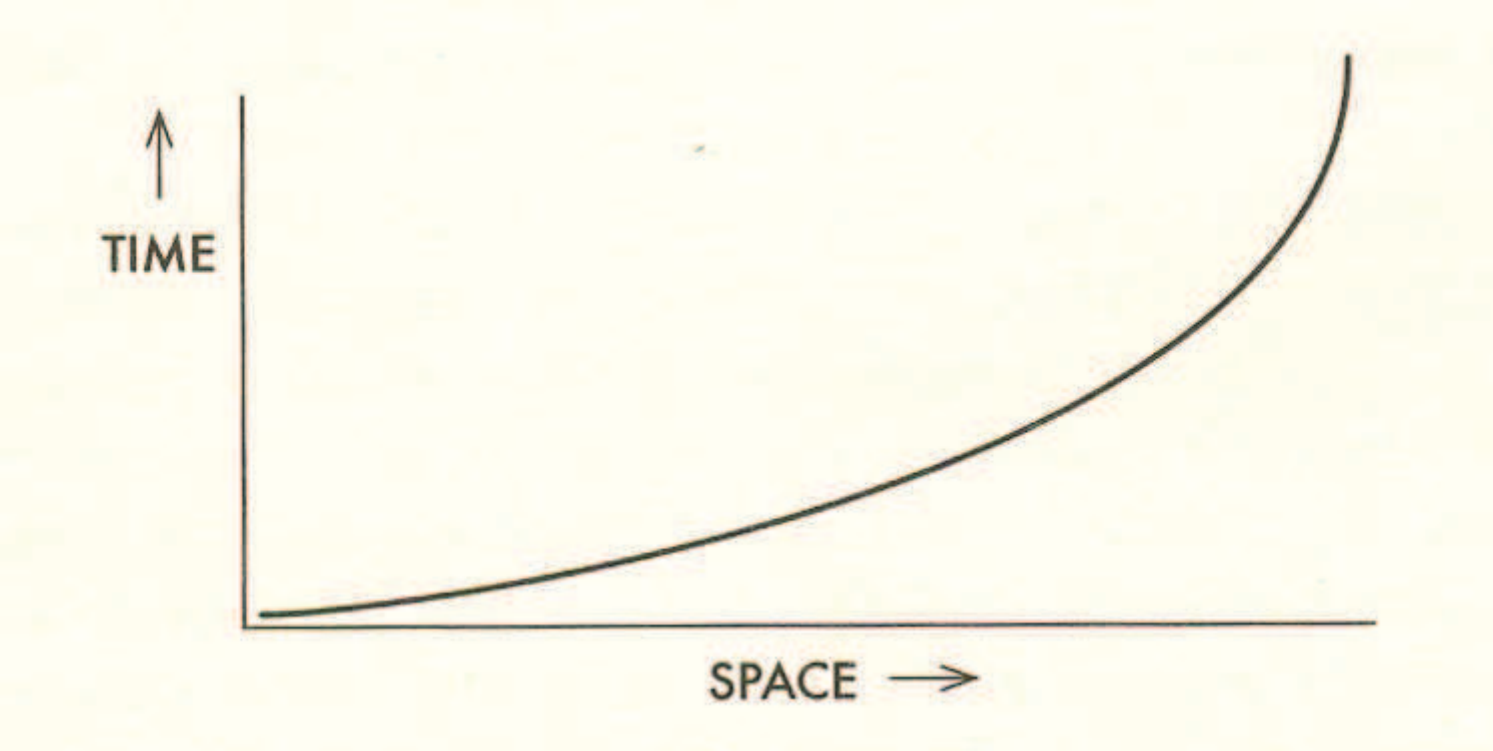

Рисунок 17. Со времен Декарта и Галилея процесс, разворачивающийся во времени, представлялся как кривая на графике с дополнительным измерением, представляющим время. Это наделение времени свойствами пространства полезно, но может вызывать представление о статическом и неизменном мире – замороженном, вечном наборе математических соотношений.

Мы должны найти способ *разморозить* время – представить время без превращения его в пространство. У меня нет идей, как это сделать. Я не могу представить себе математику, которая не представляет мир, как если бы он был заморожен в вечности. Это ужасно тяжело, представить время, и поэтому тут имеется хороший шанс, что это представление и является потерянным кусочком.

Одна вещь ясна: я не могу получить никакого размышления об этом виде проблемы в рамках границ теории струн. Поскольку теория струн ограничена описанием струн и бран, движущихся в фиксированных фоновых пространственно-временных геометриях, она не предлагает ничего тому, кто хотел бы прорваться к новому основному мышлению о природе времени или о квантовой теории. Фоново-независимые подходы предлагают лучшую стартовую позицию, поскольку они уже переступили пределы классической картины пространства и времени. И они проще для определения и легче для игры с ними. Имеется дополнительный бонус, заключающийся в том, что привлекаемая математика связана с одним из нескольких математиков, использующих для исследований радикальные идеи о природе времени – область логики, именуемую теорией топосов.

Одна вещь, которую я знаю по поводу вопроса, как представить время без его превращения в размерность пространства, заключается в том, что возникает в других областях, от теоретической биологии до компьютерных наук и права. В попытке свободно обменяться некоторыми новыми идеями философ Роберто Мангабейра Унгер и я недавно организовали небольшую рабочую группу в Пограничном институте, собрав вместе фантазеров из каждой из этих областей, чтобы поговорить о времени. Эти два дня были самым возбуждающим, что я испытал за годы.[104]

Я не хочу больше говорить об этом, поскольку я хочу перейти к другим вопросам. Предполагаю, что интеллектуально амбициозная молодая персона с оригинальным и нетерпеливым мышлением захочет подумать глубже о пяти великих вопросах. Признавая нашу неудачу в определенном решении каждого из них, я не могу представить, почему такая персона могла бы желать быть ограниченной в работе над любой из текущих исследовательских программ. Ясно, что если бы теория струн или петлевая квантовая гравитация сами были ответом, мы могли бы знать об этом к сегодняшнему дню. Они могут быть стартовой точкой, они могут быть частью ответа, они могут содержать необходимые уроки. Но правильная теория должна содержать новые элементы, которые наша амбициозная молодая персона, вероятно, однозначно сочтет пригодными для поиска.

Что мое поколение могло бы завещать этому молодому ученому? Идеи и технологии, которые он может захотеть или может не захотеть использовать, вместе с предостерегающей историей о частичном успехе в некоторых направлениях, приведшем к общей неудаче в попытке завершить работу Эйнштейна, начатую сто лет назад. Худшая вещь, которую мы могли бы сделать, была бы утаить от него правду, настаивая, чтобы он работал над нашими идеями. Так что вопросом для последней части книги является вопрос, который я задаю себе каждое утро: Всё ли мы сделали, что могли, чтобы поддержать и поощрить молодого ученого – и посредством этого самих себя, – чтобы переступить пределы, которые мы воздвигали последние тридцать лет, и найти верную теорию, которая решит пять великих проблем физики?

Часть IV
Обучаясь на опыте

16. Как вы боретесь с социологией?

В этой последней части книги я хочу возвратиться к вопросам, которые я поднял во Введении. Почему, несмотря на такие большие усилия тысяч самых талантливых и хорошо подготовленных ученых, в фундаментальной физике в последние двадцать пять лет сделан столь незначительный окончательный прогресс? И, фиксируя, что имеются многообещающие новые направления, что мы можем сделать, чтобы гарантировать, что темп прогресса восстановится до уровня, который существовал в течение двухсот лет до 1980?

Один из способов описать неприятности с физикой заключается в констатации, что за последние тридцать лет отсутствуют работы по теоретической физике элементарных частиц, которые уверенно можно было бы выбрать на Нобелевскую премию. Причина в том, что условием премии является проверка достижения экспериментом. Конечно, идеи вроде суперсимметрии или инфляции могут быть показаны экспериментом как правильные, и если это так, их изобретатели будут достойны Нобелевской премии. Но мы не можем сегодня сказать, что открытие любой гипотезы в физике за пределами стандартной модели элементарных частиц проверено.

Ситуация была совершенно иной, когда я поступил в аспирантуру в 1976. Было достаточно ясно, что стандартная модель, которая была доведена до конечной формы только тремя годами ранее, была решительным прогрессом. Уже имелось ее существенное экспериментальное подтверждение, а многие опыты были в процессе выполнения. Не было серьезных сомнений, что ее изобретатели раньше или позже будут удостоены за свой труд Нобелевской премии. Так со временем и произошло.

Ничего подобного сегодня нет. В последние двадцать пять лет имелось много премий, присужденных за работу в теоретической физике частиц, но не Нобелевских. Нобель не выдается за находчивость или успешность; он выдается за правильность.

Это не мешает тому, что имелись великие технические достижения в каждой из исследовательских программ. Это говорит о том, что в настоящее время работают больше ученых, чем за всю историю науки. Это определенно верно для физики; в больших университетских департаментах сегодня имеется больше профессоров физики, чем было сто лет назад во всей Европе, где были получены почти все достижения. Все эти люди работают, и большая часть этой работы технически изощренная. Более того, технический уровень молодых физиков-теоретиков сегодня намного выше, чем это было поколение или два назад. Имеется больше возможностей для молодых людей стать мастерами, и они тем или иным образом умудряются делать это.

Однако, если вы судите по стандартам, которые действовали две сотни лет до 1980, оказывается, что темп необратимого прогресса в теории элементарных частиц замедлился.

Мы уже обсуждали простые объяснения неудач последних двадцати пяти лет. Это не является следствием недостатка данных; имеется изобилие необъясненных результатов, чтобы возбудить воображение теоретиков. Это не связано с тем, что теории требуют много времени для тестирования; редко проходит больше десяти лет между предсказанием нового явления новой теорией и его подтверждением. Это не является следствием недостатка усилий; сейчас гораздо больше людей работают над проблемами фундаментальной физики, чем за всю историю предмета в целом. И, определенно, ответственность не может быть возложена на недостаток таланта.

В предыдущих главах я предположил, что то, что потерпело неудачу, не столько особая теория, сколько особый стиль исследований. Если кто-то проводит время как в сообществе струнных теоретиков, так и в сообществе людей, работающих над независимыми от фона подходами к квантовой гравитации, он не может помочь, но будет поражен огромной разницей в стиле и в ценностях, выражаемых двумя сообществами. Эта разница отражает раскол в теоретической физике, который восходит более чем на

полвека назад.

Стиль мира квантовой гравитации унаследован от того, что использовалось так называемым релятивистским сообществом. Он проводился студентами и партнерами Эйнштейна, и, в свою очередь, их студентами – такими людьми как Петер Бергман, Джошуа Голдберг и Джон Арчибальд Уилер. Стержневыми ценностями этого сообщества были уважение к индивидуальным идеям и исследовательским программам, подозрение к моде, доверие к математически ясным аргументам и убеждение, что ключевые проблемы тесно связаны с основополагающими вопросами о природе пространства, времени и квантов.

С другой стороны, стиль сообщества теории струн является продолжением культуры теории элементарных частиц. Это всегда было более дерзкой, агрессивной и состязательной атмосферой, в которой теоретики соперничают, чтобы быстро откликнуться на новые разработки (до 1980 они были обычно экспериментальными), и подозрительно относятся к философским проблемам. Этот стиль вытеснил более склонный к размышлениям, философский стиль, который характеризовал Эйнштейна и изобретателей квантовой теории, и он восторжествовал, когда центр науки переместился в Америку, а интеллектуальный фокус сместился от исследования фундаментальных новых теорий к их применениям.

Наука нуждается в различных стилях, чтобы обращаться к различным видам проблем. Моя гипотеза в том, что ошибкой с теорией струн является факт, что она развивалась с использованием стиля исследований физики элементарных частиц, который с трудом применим к открытию новых теоретических схем. Стиль, который привел к успеху стандартной модели, также тяжело поддерживать, когда разрывается связь с экспериментом. Этот соревновательный, ведомый модой стиль работал, когда он подпитывался экспериментальными открытиями, но потерпел неудачу, когда не оказалось никаких ведущих способов действий, кроме взглядов и вкусов нескольких выдающихся индивидуальностей.

Когда я начинал мое изучение физики в середине 1970х, оба этих исследовательских стиля процветали. Имелось намного больше физиков, занимающихся элементарными частицами, чем релятивистов, но имелось достаточно места для тех и других. Не было много мест для людей, которые хотели разрабатывать свои собственные решения глубоких фундаментальных проблем по поводу пространства, времени и квантов, но имелась достаточная поддержка тех немногих, кто имел хорошие идеи. С тех пор, хотя необходимость в релятивистском стиле возрастала, их место в академии сокращалось из-за доминирования теории струн и других больших исследовательских программ. За исключением одной исследовательской группы в Университете штата Пенсильвания, примерно с 1990 исследовательскими университетами США не был приглашен на работу ни один доцент, работающий над подходами к квантовой теории гравитации, не основанными на теории струн или высших измерениях.

Почему стиль, менее пригодный для решения находящихся под рукой проблем, стал доминирующим в физике, как в Штатах, так и в Европе? Это социологический вопрос, но мы должны на него ответить, если мы хотим сделать конструктивные предложения для восстановления нашей дисциплины до ее былой живости.

Чтобы вникнуть в суть проблемы, мы должны взглянуть на некоторые распространившиеся изменения в академическом ландшафте, которые молодая персона должна преодолеть, чтобы совершить карьеру в науке.

Наиболее замечательное изменение в том, что имеется намного большее давление на молодую персону, чтобы конкурировать за расположение более старых влиятельных ученых. Великое поколение, которое сделало науку Америки, теперь подошедшее к выходу в отставку, могло бы посоревноваться за высшие позиции в элите университетов и институтов, но от него не было много давления, если все, что вы хотели, это профессорство где-нибудь, которое давало бы свободу заниматься вашей работой. С 1940х по 1970е рост университетов был экспоненциальным, и для молодых ученых было нормальным иметь после окончания высшей школы несколько предложений профессорско-преподавательских позиций в университетах. Я встречал многих более старых коллег, которые никогда на самом деле не должны были

обращаться с просьбой о работе.

Сегодня вещи иные. Университеты прекратили рост в начале 1970х; несмотря на это, профессора, приглашенные на работу в предыдущую эру, продолжали готовить аспирантов с неизменным темпом, что означало существенное перепроизводство новых докторов философии в физике и других науках. В результате имеется свирепая конкуренция за места в исследовательских университетах и колледжах на всех уровнях академической иерархии. Имеется также намного больший акцент на наемное профессорство, которое фондируют исследовательские агентства. Это великое сужение альтернатив для людей, которые хотели бы вести свои собственные исследовательские программы, но вместо этого следуют программам, инициированным вышестоящими учеными. Так что имеется все меньше углов, в которых творческая личность может спрятаться, охраняемая некоторым видом академической работы, и развивать рискованные и оригинальные идеи.

Связан с этим и факт, что университеты сегодня являются намного более профессионализированными, чем это было поколение или два назад. Хотя профессорско-преподавательский состав университетов прекратил рост, было заметное увеличение числа и мощи администраторов. Так что при найме имеется меньше надежды на решение индивидуальных профессоров и больше на статистические меры достижений, такие как уровни фондирования или цитирования. Это также затруднило молодым ученым сопротивление генеральному потоку и посвящение себя изобретению новых исследовательских программ.

В наших попытках сделать беспристрастные оценки нашей работе среди равных мы, профессора, почти рефлекторно стремимся наградить тех, кто согласен с нами, и оштрафовать тех, кто не согласен. Даже когда мы возвышаемся над академической политикой, мы часто попадаем в ловушку оценки равных по положению ученых на основании одномерной характеристики. На собраниях профессорско-преподавательского состава и в неформальных дискуссиях мы говорим о тех, кто «хороший», и тех, кто нет, как если бы мы на самом деле знали, что это означает. Может ли работа жизни личности быть сведена к «Анжела не так хороша, как Крис»? Часто кажется, будто достижения, не требующие ничего, кроме таланта и тяжелого труда, оцениваются более высоко, чем тщательные размышления или воображение. Интеллектуальные увлечения слишком важны, и люди, которые их игнорируют, имеют ненадежную академическую карьеру.

Как-то раз я работал над проектом с отставным генералом, который возглавлял колледж военных офицеров, а затем стал консультантом в бизнесе. Он говорил о его разочаровании в попытках работать с университетами. Я спросил его, как он понимает, в чем проблема. Он сказал: «Имеется простая, но существенная вещь, которую мы преподаем каждому морскому офицеру, и которую ни один университетский администратор, с кем я общался, кажется, не знает: *имеется большое различие между управлением и лидерством*. Вы можете управлять снабжением ресурсами, но как лидер вы должны вести солдат в бой». Я согласен с ним. В мое время в университетах я видел гораздо больше менеджмента, чем лидерства.

Проблема, конечно, не ограничивается наукой. Темп инноваций в планировании курса обучения и методах преподавания положительно средневековый. Любые предложения по изменению должны быть одобрены профессорско-преподавательским составом, а в целом большинство профессоров не видит ничего ошибочного в том, как они преподавали в течение десятилетий. Я рано выучил, насколько университеты сопротивляются изменениям. Мне посчастливилось посещать колледж, где курсом физики первого года обучения была квантовая физика. Это редкость. Несмотря на факт, что квантовая физика заменила ньютоновскую механику восемьдесят лет назад, большинство колледжей и университетов в Северной Америке все еще откладывают квантовую механику до третьего года обучения, и даже тогда она предлагается только специализирующимся в физических науках. Поскольку я знал, как преподавать курс квантовой механики первокурсникам, я предложил сделать это как аспирант в Гарварде. Я заручился согласием молодого члена профессорского состава Говарда Джорджи преподавать это со мной, но на курс было наложено вето деканом искусств и наук. Джорджи сказал мне, что это не имело никакого отношения к нашему предложению, а было связано с фактом, что оно не прошло бы через требуемые комитеты. Он сказал: «Если бы мы позволили каждому профессору преподавать то, что он хочет, мы получили бы

образовательный хаос». Я не уверен, что образовательный хаос является такой уж плохой идеей; в любом случае Гарвард все еще не имеет курса квантовой механики для первокурсников.

Это прискорбный факт, что число американских студентов, заканчивающих учебные заведения с дипломом по физике, уменьшилось за десятилетия. Вы можете подумать, что это должно бы уменьшить конкуренцию за позиции по физике. Это не так, поскольку уменьшение в студенческих дипломах более чем компенсируется увеличением степеней доктора философии, заработанных яркими, амбициозными студентами из развивающихся стран. Та же ситуация имеет место в других развитых странах.

Я иногда имел возможность, – как член комитета профессорско-преподавательского состава Йельского университета, сформированного для исследования этого явления, и поскольку одновременно страдали мои собственные интересы, – спросить студентов, которые покинули физику, почему они так сделали. Одной из причин, которую они дали, это что физический учебный план был скучный – первый год просто повторялось, что они уже изучали в средней школе, и не было никаких признаков возбуждающих тем вроде квантовой теории, космологии, черных дыр и так далее. В надеждах помочь обратить снижение количества студентов-физиков я предложил сделать квантовую механику курсом физики для первокурсников в каждом университете, который предоставит мне работу. Меня все время отвергали, хотя дважды мне позволили преподать маленькие ознакомления с квантовой теорией. Они были успешны, и несколько студентов, кто их воспринял, сейчас начали хорошие карьеры.

Моя цель здесь не заключается в обосновании реформы учебных планов, но эти примеры означают, что университеты не выполняют достаточно хорошо функцию проводников инноваций, даже когда ничего другого не остается, как модернизировать учебную программу, которая на восемьдесят лет отстает от науки.

Ученые по ту сторону сцены сокрушаются о темпе прогресса в их области. Я знаю несколько биологов и физиков-экспериментаторов, которые горько жаловались по поводу растраченных возможностей, поскольку вышестоящие ученые, управляя своими департаментами, потеряли смелость и воображение, которые они, несомненно, имели, будучи новыми докторами философии. Хорошие идеи в академическом мире не воспринимаются достаточно серьезно, когда они исходят от людей с низким статусом; и наоборот, идеи людей с высоким статусом часто воспринимаются слишком серьезно.

Нет возможности обратить внимание на эти разрушительные тенденции без исследования социологии, которая их питает. Если мы, физики, имеем самомнение пытаться объяснить фундаментальные законы природы, определенно мы обязаны суметь рационально обдумать социологию академии и контпродуктивное решение, делающее ее бедствием наших академических институтов.

Ничего не значит, что слово «социология» возникает сегодня больше среди струнных теоретиков, чем среди любых других групп ученых, которых я знаю. Оно кажется сокращением выражения «взгляд сообщества». В обсуждении текущего состояния дел с молодыми струнными теоретиками вы часто слышите от них вещи вроде: «Я уверен в теории, но я ненавижу социологию». Если вы высказываете свое мнение по поводу узости точек зрения, представленных на конференциях по теории струн, или по поводу быстрой смены тем модных исследований из года в год, струнный теоретик согласится и добавит: «Мне это не нравится, но это же просто социология». Не один друг объявлял мне, что «сообщество приняло решение, что теория струн верна, и нет ничего, что бы вы могли с этим сделать. Вы не можете бороться с социологией».

Настоящий социолог скажет вам, что для того, чтобы понять деятельность сообщества, вы должны исследовать власть. Кто над кем имеет власть, и как эта власть осуществляется? Социология науки не является таинственной силой; она опирается на влияние, которое более старые, состоявшиеся ученые оказывают на карьеры более молодых ученых. Мы, ученые, чувствуем неудобство, говоря об этом, поскольку это ставит нас перед возможностью, что организация науки может не быть вполне объективной и рациональной.

Но после размышлений об этом в течение долгого времени я стал убеждаться, что мы должны говорить о социологии теоретической физики, поскольку явление, на которое мы коллективно ссылаемся как на «социологию», оказывает существенное негативное влияние на ее прогресс. Даже если большинство струнных теоретиков являются людьми чести, которые выполняют свою работу с лучшими намерениями, имеются аспекты социологии указанной области, которые не нормальны по сравнению с идеалами, которые определяют б*о*льшее научное сообщество. Они приводят к патологиям в методологии теоретической физики, которые тормозят прогресс. Проблема не в том, является ли теория струн ст*о*ящей или должна ли она поддерживаться, а в том, почему теория струн, несмотря на недостаток экспериментальных предсказаний, монополизировала ресурсы, имеющиеся в распоряжении для продвижения фундаментальной физики вперед, таким образом, задушив исследования равно многообещающих альтернативных подходов. Имеются хорошие свидетельства, что прогресс самой теории струн замедлился из-за социологии, которая ограничивает набор исследуемых вопросов, и исключает как вид одаренных богатым воображением и независимо мыслящих ученых, которых требует прогресс.

Я должен подчеркнуть, что в теоретической физике всегда была доминирующая область. В одно время это была ядерная физика, затем это была физика элементарных частиц. Теория струн только самый недавний пример. Возможно, физическое сообщество организовано таким образом, что всегда в любой выбранный момент будет доминирующая область. Если так, тогда нам нужно изучить, почему.

Первая вещь, которую замечает сторонний наблюдатель по поводу сообщества теории струн, это его потрясающая самоуверенность. Как свидетель первой суперструнной революции в 1984, я вспоминаю ощущение триумфа, с которым приветствовали новую теорию. Дэн Фридэн, одна из молодых звезд этой области, информировал меня: «Это все будет в течение следующих двенадцати или восемнадцати месяцев. Вам лучше войти в тему, пока еще что-нибудь остается делать в теоретической физике». Это было только одно из многих утверждений, что места должны быть быстро заняты.

Конечно, этого не произошло. Но через все последующие достоинства и недостатки многие струнные теоретики продолжили быть в высшей степени уверенными как в истинности теории струн, так и в их превосходстве над теми, кто не может или не хочет ей заниматься. Для многих струнных теоретиков, особенно для молодых, не имеющих воспоминаний о физике до их времен, является непостижимым, что талантливые физики, получив шанс, могли бы выбрать что-нибудь другое вместо того, чтобы быть струнным теоретиком.

Эта позиция, конечно, вызывает отвращение физиков в других областях. Вот мысли физика ДжоЭнн Хьюитт, занимающейся частицами в Стэнфордском Линейном Ускорительном Центре, с ее блога:

«Я нахожу высокомерие некоторых струнных теоретиков поразительным, даже по стандартам физиков. Некоторые искренне уверены, что все не струнные теоретики являются учеными второго сорта. Это повсюду в их рекомендательных письмах друг другу, и некоторые из них на самом деле говорили это мне в лицо. ... Струнная теория [воспринимается] столь важной, что она должна осуществляться на практике в статье расходов любой другой теории. Имеются два проявления этого: струнные теоретики приглашались на работу на профессорско-преподавательские позиции на непропорционально высокий уровень, не обязательно соизмеримый со способностями во всех случаях, и молодые струнные теоретики обычно плохо образованы в физике частиц. Некоторые буквально затруднялись назвать фундаментальные частицы природы. Оба этих проявления вызывают беспокойство по поводу долгосрочного будущего нашего предмета.» [105]

Высокомерие, которое описала доктор Хьюитт, стало свойством сообщества струнных теоретиков с самого начала. Субрахманьян Чандрасекар, возможно, величайший астрофизик двадцатого столетия, любил рассказывать историю визита в середине 1980х в Принстон, где он чествовался за недавнее награждение Нобелевской премией. За завтраком он оказался рядом с важным молодым человеком. Поскольку физики часто идут на неформальное общение, он спросил своего напарника по завтраку: «Над чем вы работаете в эти дни?» Ответ был: «Я работаю над теорией струн, которая является самым важным достижением в физике двадцатого столетия». Молодой человек продолжил советовать Чандре прекратить то, что он делал,

и переключиться на теорию струн, или он рискует стать столь же ненужным, как те, кто в 1920е не принял немедленно квантовую теорию.

"Молодой человек," – ответил Чандра, – «Я знал Вернера Гейзенберга. Я могу обещать вам, что Гейзенберг никогда не был бы столь груб, чтобы сказать кому-нибудь, чтобы тот остановил то, что делает, и занялся квантовой теорией. И он определенно никогда не был бы столь неучтив, чтобы сказать кому-нибудь, кто получил своего доктора философии пятьдесят лет назад, что он близок к тому, чтобы стать ненужным».

Любой, кто имеет дело со струнными теоретиками, регулярно сталкивается с этим видом крайней самонадеянности. Не имеет значения, какая проблема обсуждается, единственный вариант, который никогда не возникает (кроме случаев, когда он вводится сторонним наблюдателем), это что теория может просто быть неправильной. Если обсуждение меняет направление к факту, что теория струн предсказывает ландшафт, а поэтому не делает предсказаний, некоторые струнные теоретики будут напыщенно говорить об изменении определения науки.

Некоторые струнные теоретики предпочитают верить, что теория струн слишком сокровенна, чтобы быть понятой человеческим существом, вместо того, чтобы рассмотреть возможность, что она может быть просто неверна. Одно недавнее объявление на физическом блоге прекрасно озвучило это: «Мы не можем ожидать, чтобы собака поняла квантовую механику, и может быть, что мы достигли предела того, что люди могут понять по поводу теории струн.

Может быть, где-то имеются высокоразвитые цивилизации, для которых мы являемся столь же разумными, как и собаки для нас, и может быть, что они достаточно хорошо постигли теорию струн, чтобы двигаться к лучшей теории...».[106] На самом деле струнные теоретики, кажется, не имеют проблем с верой в то, что теория струн должна быть верна, одновременно признавая, что у них нет идей, что она реально собой представляет. Другими словами, теория струн будет частью схемы, что бы за ней не последовало. Первое время, когда я слышал выражение этого взгляда, я думал, что это шутка, но четвертое повторение убедило меня, что говорящий серьезен. Даже Натан Зайберг, который является выдающимся теоретиком в Институте перспективных исследований, цитировался в недавнем интервью как сказавший («с улыбкой»): «Если имеется нечто (за пределами теории струн), мы назовем это теорией струн».[107]

Родственная характеристика является смыслом наименования и отсутствия уважения к тем, кто работает над альтернативными подходами к проблемам, на решение которых претендует теория струн. В самом деле, струнные теоретики обычно не интересуются тем, а часто игнорируют все, что не носит названия теория струн. В отличие от практики встреч по квантовой гравитации, главные конференции по теории струн никогда не приглашают дать статьи ученых, работающих над конкурирующими подходами. Это, конечно, служит только для поддержки претензий струнных теоретиков на то, что теория струн является единственным подходом, дающим успешные результаты по квантовой гравитации. Неуважение к альтернативным подходам временами граничит с презрением. На недавней конференции по теории струн редактор из издательства Кембриджского университета сообщил мне по секрету, что один струнный теоретик сказал ему, что он никогда не будет рассматривать публикации издательства, поскольку оно выпустило книгу по петлевой квантовой гравитации. Этот вид мышления не так редок, как должен был бы быть.

Струнные теоретики осведомлены о своей доминирующей позиции в физическом мире, и больше всего, кажется, чувствуют, что это заслуженно, – если теория сама себя не подтверждает, тот факт, что так много талантливых людей работает в ней, определенно должен подтверждать. Если вы поднимаете детальные вопросы по поводу одного из утверждений теории струн перед экспертом, вы рискуете быть рассмотренным, со слабым замешательством, в качестве кого-то, кто необъяснимо выбрал путь, который препятствует членству в клубе. Конечно, это не верно для многих открыто мыслящих струнных теоретиков, – но имеется своеобразное стягивание мускулов лица, которое я слишком часто видел, чтобы игнорировать, и это обычно происходит, когда молодой струнный теоретик внезапно осознает, что он или она разговаривает с кем-то, кто не разделяет всех установок клана.[108]

Другой признак теории струн в том, в отличие от других областей физики, что имеется четкое разделение между струнными теоретиками и не струнными теоретиками. Вы можете написать несколько статей по теории струн, но это не обязательно означает, что вы будете рассматриваться струнными теоретиками как один (или одна) из них. Сначала я находил это сбивающим с толку. Я следовал старой стратегии работы над разными подходами, чтобы попытаться научиться от каждого, чему я смог бы. Я также первоначально рассматривал большую часть того, что я делал, даже работу над квантовой гравитацией, как обращение к важной открытой проблеме в теории струн, которая была в том, как сделать ее формулировку независимой от фона. В итоге некоторые друзья объяснили мне, что, чтобы рассматриваться как часть сообщества струнной теории – и поэтому иметь все надежды оставить в ней след, – вы должны работать не просто над теорией струн, но над особыми проблемами, которыми струнные теоретики ранее занимались. Я не думаю, что это пришло в голову моим друзьям, что делая так, можно подорвать мои взгляды или посягнуть на мою академическую свободу.

Я имею широкий круг интересов, и я всегда хожу на конференции в областях науки за пределами моих собственных. Но только на конференциях по теории струн ко мне подходят люди и спрашивают: «Что вы здесь делаете?» Если я объясняю, что я работал в теории струн и хотел бы увидеть, что делали другие люди, они могут сказать, вопросительно намощив брови: «Но разве вы не этот петлевой парень?» Ни один человек на конференциях по астрофизике, космологии, биофизике или постмодернизму никогда не спрашивал меня, что я там делаю. На одной конференции по теории струн ведущий струнный теоретик подсел ко мне, протянул свою руку и сказал: «Добро пожаловать домой!». Другой сказал: «Так приятно увидеть вас здесь! Мы о вас беспокоились».

В любой заданный год в теории струн имелось не более двух или трех областей, которые интенсивно исследовались. Они менялись от года к году, и мода может быть отслежена, если взглянуть на заголовки сообщений на главных годовых конференциях по теории струн. Часто, как минимум, две трети сообщений касались одного или двух направлений, которые не были сильно представлены двумя годами ранее и уже будут почти отсутствовать на конференции двумя годами позже. Молодые люди хорошо осведомлены, что успешная карьера требует следования двум или более из этих увлечений в быстром чередовании, только достаточно долго, чтобы получить хорошего постдока, а затем хорошее доцентство. Если вы поговорите об этом с лидерами теории струн, как я это делал время от времени, вы откроете, что они искренне уверены, что концентрация усилий большого сообщества очень ярких людей приводит к более быстрому прогрессу, чем поощрение коллег думать независимо и заниматься различными направлениями.

Этот монолитный и (как его назвал один из главных струнных теоретиков) «дисциплинированный» подход имел три заслуживающих сожаления следствия. Первое, проблемы, которые не могли быть решены за два или три года, отбрасывались, и часто к ним никогда не возвращались. Причина проста и жестока: молодые струнные теоретики, которые быстро не отказывались от своей тяжело завоеванной специализации в недолго главенствующей области и не переключались на новое направление, иногда оказывались вне академических позиций. Второе, область продолжает подпитываться идеями и исследовательскими программами нескольких людей, которые теперь полностью главенствуют. В прошлом десятилетии только два молодых струнных теоретика, Хуан Малдасена и Рафаэль Буссо, сделали открытия, которые изменили направление области. Это находится в контрасте со многими другими областями физики, где большинство новых идей и направлений возникает от двадцати- или тридцатилетних людей. Третье, струнная теория неэффективно использует таланты и труд большого числа людей в своем сообществе. Имеется более чем дублирование усилий, тогда как многие потенциально важные идеи не исследуются. Это сужение дороги очевидно для любого, кто сидит в университетских комитетах, которые выбирают постдоков. В таких областях как космология, теория квантовой информации или квантовая гравитация имеется столь же много предложений для исследований, сколько и кандидатов, и часты идеи, о которых никто прежде не слышал. В омуте теории струн вы имеете тенденцию снова и снова сталкиваться с одними и теми же двумя или тремя предложениями.

Конечно, молодые люди знают, что они делают. Я имел много лет опыта в таких комитетах, и я нашел, что, с несколькими исключениями, стандарты, используемые струнными теоретиками для оценки их претендентов отличаются от стандартов в других областях. Способность сделать математически

остроумную работу по проблемам, представляющим текущий интерес, насколько я могу судить, оценивается выше, чем изобретение оригинальных идей. Тому, кто публиковал статьи только с ведущими вышестоящими учеными и чьи исследовательские предложения показали минимум свидетельств независимых решений или оригинальности, вероятно, не будет предложена позиция в ведущем центре по квантовой гравитации, но это кажется самой безошибочной дорогой к постдоку в ведущих центрах по теории струн. Вид соискателя, который возбуждает меня, – некто со статьями одного автора, описывающими удивительные прозрения или рискованные новые идеи, – оставляет моих друзей из струнной теории равнодушными.

В других сообществах, в которых я проводил время, таких как квантовая гравитация и космология, имеется многообразие взглядов по поводу открытых проблем. Если вы поговорите с пятью различными экспертами, молодыми или старыми, вы получите пять различных оценок того, что в предмете главное. Исключая недавние аргументы о ландшафте и антропном принципе, струнные теоретики придерживались необыкновенно однородных взглядов. Были слышны одинаковые вещи, иногда в одинаковых словах, от различных людей.

Я знаю несколько молодых струнных теоретиков, которые возражают против такой характеристики. Они настойчиво утверждают, что внутри сообщества имеется широкий диапазон взглядов, – диапазон, о котором сторонние наблюдатели просто не осведомлены. Это хорошая новость, но совсем другое люди говорят приватно своим друзьям. На самом деле, если ширина диапазона взглядов выражается частным образом скорее, чем публично, это указывает, что имеется иерархия, контролирующая обсуждения – и исследовательские программы работ.

Предумышленное сужение исследовательских программ работ лидерами теории струн прискорбно не только в принципе, но также и потому, что это почти определенно приводит к замедлению прогресса. Мы знаем это из-за большого числа идей, которые стали важны для области через много лет после того, как они были впервые предложены. Например, открытие того, что теория струн представляет собой гигантскую коллекцию теорий, было впервые опубликовано Эндрю Строминджером в 1986, но широко обсуждаться струнными теоретиками оно стало только после 2003, вслед за работой Ренаты Каллош и ее коллег из Стэнфорда.[109] Вот недавняя цитата из Вольфганга Лерхе, хорошо известного струнного теоретика из ЦЕРНа:

"Ну, что я нахожу возмутительным, это что эти идеи оказались забытыми с середины 80х; в одной статье по 4d струнным конструкциям была сделана грубая оценка минимального числа струнных вакуумов – порядка 10^{1500}; этот труд был проигнорирован (поскольку он не вписывался в философию того времени) теми же самыми людьми, которые сегодня пере- «изобрели» ландшафт, который появился в этом контексте в журналах и даже, кажется, написаны книги о нем. ... Вся дискуссия могла бы (и, фактически, должна была бы) иметь место в 1986/87. Главная вещь, что изменилось с тех пор в умах определенных людей, а что мы сегодня видим есть Стэнфордская пропагандистская машина, работающая на полную катушку." [110]

Мое собственное предположение, что теория струн должна рассматриваться как ландшафт теорий, было впервые опубликовано в 1992 и также было проигнорировано.[111] Это не изолированный пример. Две одиннадцатимерные суперсимметричные теории были изобретены перед первой суперструнной революцией в 1984, но игнорировались вплоть до их рассмотрения заново во второй революции, более чем десятилетием позже. Это были одиннадцатимерная супергравитация и одиннадцатимерные супермембраны. Между 1984 и 1995 малое число теоретиков работали в этих теориях, но они были вытолкнуты сообществом теории струн на обочину. Я могу вспомнить несколько саркастических ссылок американских струнных теоретиков на тех «европейских супергравитационных фанатиков». После 1995 эти теории было предложено объединить вместе с теорией струн в М-теорию, и те, кто работал над ними, были приглашены назад в струнное сообщество. Очевидно, прогресс мог бы быть быстрее, если бы эти идеи не были так долго исключены из рассмотрения.

Имеются несколько идей, которые могут помочь теории струн решить ее ключевые проблемы, но они широко не изучаются. Одной из них является старая идея, что множество систем, именуемых

октонионами, являются ключом к глубокому пониманию взаимоотношения между суперсимметрией и высшими измерениями. Другой является требование, которое я уже подчеркивал, что фундаментальная формулировка теории струн или М-теории, до сих пор не установленной, должна быть независимой от фона. Во время кулуарной дискуссии по «Следующей суперструнной революции» на струнной конференции 2005 года Стивен Шенкер, директор Стэнфордского института теоретической физики, сделал наблюдение, что это, вероятно, пришло из темы вне теории струн. Если это осознано лидерами всего направления, почему они не поощряют молодых людей исследовать более широкий круг тем?

Сужение исследовательских программ, кажется, привело к огромному вниманию струнного сообщества к взглядам нескольких индивидуальностей. Струнные теоретики – единственные ученые, с кем я когда-либо встречался, которые обычно хотят знать, что думают вышестоящие люди в данной области, такие как Эдвард Виттен, прежде чем выразить свои собственные взгляды. Конечно, Виттен мыслит четко и глубоко, но суть в том, что это плохо для любой области, если взгляды любой одной личности принимаются слишком авторитарно. Нет ученого, даже уровня Ньютона или Эйнштена, который не ошибался бы в солидном числе проблем, по поводу которых он имел непоколебимые взгляды. Много раз в обсужении после сообщения на конференции или во время неформального общения, если возникало вызывающее спор разногласие, кто-нибудь неизменно спрашивал: «Ладно, а что думает Эд?» Это использовалось, чтобы довести меня до отчаяния, и временами я вынужден был это показать: «Послушайте, когда я захочу узнать, что думает Эд, я спрошу его. Я спрашивают вас, что *вы* думаете, поскольку я интересуюсь вашим мнением».

Некоммутативная геометрия является примером области, которая игнорировалась струнными теоретиками до тех пор, пока ей не воспользовался Виттен. Ален Конне, ее изобретатель, рассказал следующую историю:

"Я прибыл в Чикаго в 1996 и сделал сообщение в Департаменте физики. Там был хорошо известный физик, и он покинул помещение до того, как сообщение закончилось. Я не встречался с этим физиком снова до той поры, пока примерно два года спустя я давал такое же сообщение на Дираковском форуме в Резерфордовской лаборатории вблизи Оксфорда. Тот же самый физик был внимателен, в это время выглядел очень открытым и убежденным. Когда он позже делал свое сообщение, он упомянул мое сообщение совершенно позитивно. Это изумило меня, поскольку это было то же самое сообщение, и я не забыл его предыдущей реакции. Так что, когда на пути назад в Оксфорд я сидел рядом с ним в автобусе, я спросил его: «Как это может быть, что Вы слушали то же самое сообщение в Чикаго и ушли раньше его окончания, а сейчас оно вам на самом деле понравилось?» Парень был не начинающий – в районе сорока. Его ответ был: «Виттена видели читающим Вашу книгу в библиотеке Принстона!»."[112]

Необходимо сказать, что такое отношение ослабело, возможно в ответ на текущие волнения вокруг ландшафта. До последнего года я почти никогда не сталкивался с выражением сомнения от струнного теоретика. Теперь я иногда слышу от молодых людей, что в струнной теории «кризис». "Мы потеряли наших лидеров," – мог бы сказать один из них, – "До этого всегда было ясно, что являлось горячим направлением, над которым люди должны были работать. Теперь нет реального руководства," – или (друг другу, нервно), – «Это правда, что Виттен больше не делает теорию струн?»

Другая грань теории струн, которую многие находят беспокоящей, есть то, что может быть описано только как мессианские тенденции некоторых ее деятелей, особенно некоторых молодых деятелей. Для них теория струн стала религией. Те из нас, кто публикует статьи, задающие вопросы по поводу результатов или утверждений теории струн, регулярно получают электронные письма, самая умеренная форма брани в которых есть «Вы смеетесь?» или «Это шутка?». Дискуссии с «оппонентами» теории струн в изобилии имеются на страничках Интернета и в чатах, где, даже принимая во внимание развязную природу таких мест, интеллигентность и профессиональная компетентность не-струнных теоретиков ставится под вопрос в необыкновенно неприятных терминах. Тяжело не прийти к заключению, что, по меньшей мере, некоторые струнные теоретики начали рассматривать себя как участников крестового похода, а не как ученых.

С этой самодовольной манерой держаться связана тенденция прочитывать доказательства самым оптимистичным из возможных способом. Мои коллеги в квантовой гравитации выбирают реалистичный, часто пессимистичный взгляд на варианты решения открытых проблем. Среди теоретиков по петлевой квантовой гравитации я кажусь великим оптимистом. Но мой оптимизм бледнеет по сравнению с оптимизмом большинства струнных теоретиков. Это особенно верно, когда он доходит до больших вопросов, не имеющих ответа. Как обсуждалось, «струнный» взгляд на вещи основан на существующих издавна предположениях, в которых имеется широкая уверенность у струнных теоретиков, но которые никогда не были доказаны. Некоторые струнные теоретики верят им в любом случае. Оптимизм хорош в значительной степени, но не тогда, когда он приводит к бесповоротному неправильному представлению. К сожалению, картина, представляемая обычно широкой публике в книгах, статьях и телевизионных шоу – точно также, как и для аудитории, состоящей из ученых, – существенно отличается от того, на что указывает прямое чтение опубликованных результатов. Например, в обзоре книги Леонарда Сасскайнда *Космический ландшафт* (2005) в специализированном журнале для физиков обозреватель, обращая внимание на существование множества струнных теорий, установил:

«Эта проблема излечивается М-теорией, единственной всеохватывающей теорией, к которой относятся пять суперструнных теорий через требование 11 пространственно-временных измерений и включение высокоразмерных протяженных объектов, именуемых бранами. Среди достижений М-теории есть первое микроскопическое объяснение для энтропии черных дыр, впервые предсказанное в 1970е Хокингом с использованием макроскопических аргументов. ... Проблема с М-теорией в том, что, хотя ее уравнения могут быть однозначны, она имеет миллиарды и миллиарды различных решений.» [113]

Самое выдающееся преувеличение здесь то, что подразумевается, что М-теория существует как точная теория, а не предполагаемая, и что она имеет определенные уравнения, ни то ни другое не верно. Претензии на объяснение энтропии черных дыр (как отмечалось в главе 9) преувеличены, поскольку результаты теории струн работают только для специальных и нетипичных черных дыр.

Вы можете также найти такое искажение на WEB-страницах, предназначенных для введения в теорию струн для публики, как следующее:

«Имеется даже мода, описывающая гравитон, частицу, переносящую силу гравитации, что является важной причиной, почему теория струн привлекает такое большое внимание. Суть в том, что мы можем придать смысл взаимодействию двух гравитонов в теории струн таким образом, которым мы не смогли бы это сделать в квантовой теории поля. Тут нет бесконечностей! А гравитация не есть что-то, что мы добавляем руками. Она должна существовать в теории струн. Так что первым великим достижением теории струн была выдача последовательной теории квантовой гравитации.» [114]

Те, кто отвечает за эту отдельную WEB-страницу, знают, что никто не доказал, что там «нет бесконечностей». Но они кажутся достаточно уверенными в истинности предположения, чтобы представить его как факт. Далее они также поднимают проблему пяти различных суперструнных теорий:

"И только тогда было осознано, что эти пять теорий струн на самом деле являются островами на одной и той же планете, а не на разных! Таким образом, имеется основополагающая теория, только различными аспектами которой и являются все струнные теории. Она была названа М-теорией. М может означать Мать всех теорий или Тайна (Mystery), поскольку планета, которую мы называем М-теорией еще почти совершенно не исследована. Это четко устанавливает, что «имеется основополагающая теория», даже если последняя фраза признает, что М-теория «еще почти совершенно не исследована». Представитель публики должен будет заключить отсюда, что имеется теория, называемая М-теория, с обычными признаками теории, которые заключаются в формулировании в терминах точных принципов и представлении точных уравнений." [115]

Многие обзорные статьи и сообщения имеют одинаковые неопределенности и неточные утверждения по поводу результатов. К сожалению, имеется гораздо больше неразберихи по поводу того, что на самом деле было достигнуто теорией струн, в русле тенденции преувеличивать результаты и минимизировать

трудности. Когда я спросил экспертов, я был шокирован, обнаружив, что многие струнные теоретики не в состоянии дать корректные и детальные ответы на вопросы о статусе ключевых предположений, таких как пертурбативная конечность, S-дуальность, предположение Малдасены или M-теория.

Я понимаю, что это сильное обвинение, чтобы предъявить его, так что позвольте мне проиллюстрировать его на примере. Одно из основных утверждений, сделанных о теории струн, заключается в том, что она конечная теория. Это означает, что ответы, которые она дает на все физически осмысленные вопросы, содержат конечные числа. Ясно, что любая жизнеспособная теория должна обеспечивать конечные ответы на вопросы о вероятностях, или конечные предсказания для масс или энергий некоторых частиц или для величин некоторых сил. Однако предложенные квантовые теории фундаментальных сил часто не способны так действовать. На самом деле огромное число различных теорий сил, согласующихся с принципами относительности, все, за исключением малого числа, дают бесконечные ответы на такие виды вопросов. Это особенно верно для квантовых теорий гравитации. Многие когда-то многообещающие подходы были отброшены, поскольку они не могли давать конечные ответы. Немногие исключения включают теорию струн и петлевую квантовую гравитацию.

Как я обсуждал в главе 12, утверждение, что теория струн дает конечные ответы, выражено в определенной аппроксимационной схеме, именуемой струнная теория возмущений. Эта технология дает бесконечный набор приближений к движениям и взаимодействиям струн в заданной конфигурации. Мы говорим о первом приближении, втором приближении, семнадцатом приближении, стомиллионном приближении и так далее до бесконечности. Чтобы обеспечить теории конечность в такой схеме, необходимо доказать, что каждый отдельный член из бесконечного числа членов конечен. Это тяжело сделать, но не невозможно. Это было сделано, например, для квантовой теории электромагнетизма, или КЭД, в конце 1940х и в 1950х. Это был триумф Ричарда Фенмана, Фримена Дайсона и их поколения. Конечность стандартной модели физики частиц была доказана в 1971 Герардом т'Хоофтом.

Большое возбуждение в 1984-85 было частично вследствие того, что была доказана конечность пяти исходных теорий суперструн в первом приближении. Несколькими годами позже была опубликована статья весьма авторитетного теоретика Стэнли Мандельштама, где считалась доказанной конечность всех из бесконечного числа членов.[116]

С течением времени отклики на статью Мандельштама были смешанные. На самом деле имеется интуитивный аргумент, – в который верят многие струнные теоретики, – сильно наводящий на мысль, что если теория вообще существует, она будет давать конечные ответы. В то же время, некоторые математики, которых я знал как экспертов по сложным техническим проблемам, отвергали то, что утверждение было полностью доказано.

Я не слышал много о проблеме конечности много лет. Она просто растворилась в основании, тогда как вся область перешла к другим проблемам. Время от времени могли появляться статьи в Интернете, обращающиеся к этой проблеме, но я не уделял им много внимания. На самом деле, я вообще не помню сомнений в конечности теории вплоть до недавнего времени. Большинство разработок, которые я отслеживал в последние двадцать лет, и значительное количество моих собственных трудов в этой области основывались на предположении, что теория струн конечна. Я слышал много сообщений струнных теоретиков за эти годы, которые начинались с утверждения, что теория дала «конечную квантовую теорию гравитации», прежде чем идти заниматься текущими проблемами. Было написано много книг и сделано много сообщений для публики, утверждающих, что теория струн есть осмысленная квантовая теория гравитации, и явно или неявно утверждалось, что теория конечна. Поскольку я был занят моей собственной работой, я верил, что конечность теории струн доказана (или почти доказана вплоть до выполнения некоторых технических деталей, о которых могут беспокоиться только математики), и это было главной причиной продолжения моего интереса к ней.

В 2002 меня попросили написать и представить обзор всей области квантовой гравитации на конференцию, организованную в честь Джона Уилера, одного из основателей этой области. Я решил, что лучшим способом обзора по теме будет выписать список всех главных результатов, установленных до сегодняшнего

дня различными подходами. Я надеялся сделать объективное сравнение того, насколько хорошо каждый подход проявил себя в движении по направлению к цели теории квантовой гравитации. Я написал черновик статьи и, естественно, одним из результатов в моем списке была конечность теории суперструн.

Чтобы закончить статью, я, конечно, должен был найти подходящие ссылки на статьи, где был продемонстрирован каждый из результатов списка. Для большинства из них это не вызвало проблем, но я столкнулся с неприятностью в моем поиске правильной цитаты для доказательства конечности теории струн. Рассмотрев различные источники, я нашел ссылки только на оригинальную статью Мандельштама – ту самую, о которой я говорили с математиками, что она не полна. Я нашел несколько других статей по проблеме, но ни одна из них не утверждала конечного результата. Тогда я начал спрашивать известных мне струнных теоретиков, лично и по электронной почте, о статусе конечности и где я мог бы найти статью, содержащую доказательство. Я расспросил дюжину или около того струнных теоретиков, молодых и старых. Почти все, кто ответил, сообщили мне, что результат верен. Большинство не имели цитаты для доказательства, а те, кто имели, дали мне статью Мандельштама. В разочаровании я обратился к обзорным статьям – эти статьи пишутся для обзора главных результатов по теме. Из более чем пятидесяти обзорных статей, к которым я обратился за консультацией, большинство или говорили или подразумевали, что теория струн конечна.[117] Для цитирования я нашел только более ранние обзорные статьи или статью Мандельштама. Я нашел одну обзорную статью русского физика, объясняющую, что результат не доказан.[118] Но было тяжело поверить, что он был прав, а все обзоры хорошо известных людей, большинство из которых я знал и восхищался ими, были не правы.

Наконец, я спросил моего коллегу по Пограничному институту Роберта Майерса. Он сообщил мне со своей обычной освежающей прямотой, что он не знает, была ли конечность полностью доказана, но он полагает, что некто по имени Эрик Д'Хокер может знать. Я навестил его, и в конце концов нашел, что Д'Хокер и Фонг только в 2001 преуспели в доказательстве конечности второго порядка приближения (см. главу 12). До того момента в течение семнадцати лет с 1984 не было достигнуто существенного прогресса. (Как я отмечал в главе 12, через четыре года после статьи Д'Хокера и Фонга достигнут некоторый прогресс, главным образом, стараниями Натана Берковица. Но его доказательство было связано с дополнительными недоказанными предположениями, так что, хотя это был шаг вперед, это еще не было полное доказательство конечности.) Так что факт в том, что известна конечность только первых трех из бесконечного числа членов приближения. За их пределами, является ли теория струн конечной или бесконечной было (и остается) просто не известным.

Когда я описал эту ситуацию в моей обзорной статье, она была встречена недоверием. Я получил несколько электронных писем, не все из которых были вежливы, утверждавших, что я ошибся, что теория конечна, и что Мандельштам доказал это. Я получил аналогичные впечатления, поговорив со струнными теоретиками; некоторые из них были шокированы, услышав, что доказательство конечности никогда не было завершено. Но их шок был ничто по сравнению с шоком тех физиков и математиков, с кем я поговорил, которые не были струнными теоретиками и которые верили, что теория струн является конечной, поскольку им сообщили, что это так. Для всех нас представление о конечности теории струн много сделало для нашего признания ее важности. Никто из нас не мог вспомнить, чтобы он когда-либо слышал, что струнный теоретик указывал на эту проблему как на нерешенную.

Я также почувствовал нечто необычное при представлении статьи, которая претендовала на детальную оценку доказательств поддержки различных предположений теории струн. Определенно, я думал, это было нечто, чем должен периодически заниматься один из лидеров области. Этот вид критической обзорной статьи, подчеркивающей ключевые нерешенные проблемы, является общим в квантовой гравитации, космологии и, я подозреваю, в большинстве областей науки. Поскольку это не делалось ни одним из лидеров теории струн, это осталось сделать кому-нибудь вроде меня, как бы «инсайдеру», который, чтобы принять такую ответственность, имеет технические знания, но никаких социологических обязательств. И я это сделал из-за моих собственных интересов в теории струн, в которой я одно время почти исключительно работал. Тем не менее, некоторые струнные теоретики расценили обзор как враждебный акт.

Карло Ровелли из Центра теоретической физики в Марселе является моим хорошим другом, который

работает в квантовой гравитации. Он имел такие же ощущения, когда он включил утверждение, что конечность теории струн никогда не была доказана, в диалог, который он написал, инсценировав дебаты между различными подходами к квантовой гравитации. Он получил так много электронных писем, декларировавших, что Мандельштам доказал конечность теории, что он решил написать самому Мандельштаму и спросить его точку зрения. Мандельштам уже ушел в отставку, но быстро откликнулся. Он объяснил, что он доказал то, что где-либо в теории не возникает определенный вид бесконечного члена. Но он сказал нам, что он в самом деле не доказал, что сама теория конечна, поскольку могут появляться другие виды бесконечных членов.[119] До настоящего момента ни один из таких членов не наблюдался когда-либо ни в одном проделанном вычислении, но никто не доказал, что они не могли бы появиться.

Ни один из струнных теоретиков, с кем я обсуждал эту проблему, не решил, узнав, что конечность теории не доказана, остановить работу над теорией струн. Я также сталкивался с хорошо известными струнными теоретиками, которые настаивали, что они доказали конечность теории десятилетия назад и не опубликовали результаты только вследствие некоторых технических проблем, которые остались нерешенными.

Но когда и если проблема конечности урегулирована, мы должны будем спросить, как произошло, что так много членов исследовательской программы были не осведомлены о статусе одного из ключевых результатов в их области? Не должно ли это иметь отношение к тому, что между 1984 и 2001 многие струнные теоретики говорили и писали о конечности теории, как если бы это был факт? Почему многие струнные теоретики чувствовали себя комфортабельно, обращаясь к сторонним слушателям, точно так же, как к инсайдерам, с использованием языка, который подразумевал, что теория полностью конечна и последовательна?

Конечность в теории струн не единственный пример предположения, уверенность в котором широко распространена, но которое до сих пор не доказано. Как мы обсуждали, в литературе имеется несколько версий предположения Малдасены, и они имеют очень отличающиеся следствия. Верно то, что самое сильное из этих предположений далеко не доказано, хотя некоторая слабая версия, определенно, хорошо поддержана. Но это не то, как струнные теоретики рассматривают вопрос. В недавнем обзоре предположения Малдасены Гэри Горовиц и Джозеф Полчински сравнили его с хорошо известным нерешенным предположением в математике, гипотезой Римана*:

---

* Гипотеза Римана утверждает, что все нетривиальные нули так называемой дзета-функции Римана имеют действительную часть 1/2. Чрезвычайно важна для теории чисел; многие утверждения о распределении простых чисел среди натуральных доказаны в предположении верности гипотезы Римана. Гипотеза сформулирована в 1859 году (!), была восьмой в списке 23 проблем Гильберта в 1900 году и сейчас является одной из семи «проблем тысячелетия», объявленных Институтом математики Клея (Кембридж, Массачусетс) в 2000 году. – *(прим. перев.)*

«В целом мы видим убедительные причины поместить [предположение Малдасены о дуальности] в категорию верных, но не доказанных. В самом деле, мы рассматриваем его почти на том же основании, как и такое математическое предположение, как гипотеза Римана. Оба предположения обеспечивают неожиданные связи между кажущимися различными структурами ... и каждое сопротивляется как доказательству, так и опровержению, несмотря на сконцентрированное внимание.» [120]

Я никогда не слышал, чтобы математик ссылался на результат, как на «верный, но не доказанный», но, кроме того, изумляет в этом утверждении, что авторы, два очень умных человека, игнорируют очевидную разницу между двумя случаями, которые они обсуждают. Мы знаем, что обе структуры, связанные гипотезой Римана, математически существуют; что под вопросом только предполагаемые отношения между ними. Но мы не знаем, существуют ли реально как математические структуры теория струн или суперсимметричная калибровочная теория; на самом деле *их существование является частью того, что находится под вопросом*. Что эта цитата делает ясным, так это то, что эти авторы основываются на предположении, что теория струн является хорошо определенной математической структурой, – несмотря

на широкое согласие о том, что, даже если она верна, мы не имеем идеи, что это за структура. Если вы не делаете это недоказанное предположение, тогда ваша оценка подтверждения самой сильной версии предположения Малдасены должна разойтись с их оценкой.

Когда речь идет о защите их уверенности в этих недоказанных предположениях, струнные теоретики часто отмечают, что нечто располагает «общей уверенностью» в сообществе струнной теории, или что «нет здравомыслящей личности, которая бы сомневалась, что это верно». Они, кажется, чувствуют, что апелляция к консенсусу внутри их сообщества эквивалентна рациональному аргументу. Вот типичный пример из блога хорошо известного струнного теоретика:

«*Каждый, кто не проспал последние 6 лет, знает, что* квантовая гравитация в асимптотически анти- де Ситтеровом пространстве имеет унитарную временную эволюцию. ... С большим накоплением подтверждений для AdS/CFT, *я сомневаюсь, что имеется много остающихся отказников, кто сомневается, что* вышесказанное утверждение имеет место не только в полуклассическом пределе, который рассматривал Хокинг, но и в полной непертурбативной теории.» [121] (*Курсив мой*.)

Нехорошее чувство признавать необходимость быть одним из отказников, но детальное изучение доказательств заставляет меня быть им.

Это бесцеремонное отношение к точной поддержке ключевых предположений является контрпродуктивным по нескольким причинам. Первое, в комбинации с тенденциями, описанными ранее, это означает, что почти никто не работает над этими важными открытыми проблемами – делая более вероятным, что они останутся нерешенными. Это также приводит к коррозии этики и методов науки, поскольку большое сообщество умных людей готово поверить в ключевые предположения без потребности увидеть их доказанными.

Более того, когда открываются великие результаты, они часто преувеличиваются. Некоторые не струнные теоретики спрашивали меня, почему я работаю над чем-то другим, когда струнная теория полностью объяснила энтропию черных дыр. Хотя я глубоко восхищен работой Строминджера, Вафы и других по экстремальным черным дырам (см. главу 9), я должен снова и снова повторять, что точные результаты не распространились на черные дыры в целом, на что есть серьезные причины.

Аналогично, утверждение, что гигантское число струнных теорий существует с положительной космологической константой (много обсуждаемый «ландшафт») далеко не безоговорочно. Хотя некоторые ведущие струнные теоретики готовы на основе этих слабых результатов сделать великие объявления по поводу успеха теории струн и будущих перспектив.

Вполне может быть, что постоянное преувеличение дает теории струн преимущество перед ее конкурентами. Если вы являетесь главой департамента или должностным лицом субсидирующей организации, разве вы более вероятно не будете финансировать или предлагать работу ученому, который работает на программу, указывающую на решение больших проблем, по сравнению с ученым, который мог бы только утверждать, что он или она имеет свидетельства, что может существовать теория, – до настоящего момента не сформулированная, – которая имеет потенциал решать проблемы?

Позвольте мне суммировать, как мы можем видеть, куда это нас завело. Дискуссия приводит к семи необычным аспектам сообщества теории струн:

1. *Потрясающая самоуверенность*, приводящая к ощущению обладания правом и принадлежности к элитному сообществу экспертов.

2. *Необычно монолитное сообщество* с сильным ощущением консенсуса, подкрепляемого доказательствами или нет, и необычной однородностью взглядов по открытым вопросам. Эти взгляды кажутся связанными с существованием иерархической структуры, в которой идеи нескольких лидеров

диктуют точку зрения, стратегию и направление развития области.

3. В некоторых случаях *ощущение отождествления себя с группой*, похожего на отождествление по религиозному вероисповеданию или политической платформе.

4. Сильное ощущение *границы между группой и другими экспертами*.

5. *Безразличие и незаинтересованность* в идеях, мнениях и работах экспертов, которые не являются частью группы, и преимущество для общения только с другими членами сообщества.

6. Склонность *интерпретировать свидетельства оптимистичным образом*, верить в преувеличенные или некорректные формулировки результатов и игнорировать возможность, что теория может быть не правильной. Это связано с тенденцией *верить, что результаты верны, поскольку в них имеется «широкая уверенность»*, даже если никто не проверил (или даже не видел) самого доказательства.

7. Отсутствие способности понимания пределов, до которых исследовательская программа должна содержать риск.

Конечно, не все струнные теоретики могут быть описаны таким образом, но немногие наблюдатели как внутри, так и вне сообщества теории струн будут не согласны с некоторыми или со всеми из этих позиций, характеризующих указанное сообщество.

Я хочу пояснить, что я не критикую поведение отдельных индивидуумов. Многие струнные теоретики в личном плане являются широко мыслящими и самокритичными, и, если их спросить, они скажут, что они сожалеют о таких характеристиках их сообщества.

Я должен также пояснить, что я столь же много ошибался, как и мои коллеги в теории струн. Многие годы я верил, что базовые предположения, такие как конечность, были доказаны. В значительной степени поэтому я вложил годы в работу в теории струн. Затронуто намного больше, чем только моя собственная работа; среди сообщества людей, которые трудятся в квантовой гравитации, я был сильнейшим защитником того, что теорию струн надо принимать всерьез. Однако я не выбрал время для проверки литературы, так как я тоже был готов позволить лидерам сообщества теории струн заботиться о моих критических размышлениях за меня. И в течение лет, когда я работал над теорией струн, я весьма заботился о том, что думают лидеры сообщества по поводу моей работы. Почти как юноша, я хотел быть признанным теми, кто был наиболее влиятельным в моем маленьком кругу. Если я на самом деле не принял их совет и не посвятил мою жизнь теории, это только потому, что я имел твердую черту характера, что обычно приносит успех в таких ситуациях. Для меня не является проблемой «нас» против «их» или борьба между двумя сообществами за доминирование. Это очень личные проблемы, с которыми я спорил внутренне, пока я был ученым.

Так что я сильно симпатизирую положению струнных теоретиков, которые хотят как быть хорошими учеными, так и иметь одобрение могущественных людей в своей области. Я понимаю, как трудно мыслить четко и независимо, когда признание в вашем сообществе требует верить в сложный набор идей, которые вы не знаете, как доказать себе. Это ловушка, и мне потребовались годы, чтобы придумать мой путь из нее.

Все поддерживают мою убежденность, что мы, физики-теоретики, находимся в неприятностях. Если вы спросите многих струнных теоретиков, почему ученые, работая над альтернативами к струнной теории, никогда не приглашаются на конференции по струнной теории, они согласятся с вами, что такие люди должны быть приглашены, они будут сетовать о текущем состоянии дел, но они будут настаивать, что нет ничего, что они могли бы сделать по этому поводу. Если вы спросите их, почему группы теории струн никогда не берут на работу молодых людей заниматься альтернативами в качестве постдоков или на профессорско-преподавательские позиции, или не приглашают их как гостей, они согласятся с вами, что сделать это было бы хорошей вещью, и будут сокрушаться над фактом, что это не делается. Ситуация одна

из тех, в которых имеются большие проблемы, с которыми многие согласны, но никто не чувствует за них ответственность.

Я сильно верю в моих друзей из теории струн. Я верю, что как индивидуальности они почти все более непредвзяты, самокритичны и менее догматичны, чем они являются *в массе*.

Как сообщество может действовать таким способом, который не совпадает с доброй волей и добрыми чувствами его индивидуальных членов?

Оказывается, что социологи не имеют проблем в понимании этого явления. Оно поражает сообщества высоко образованных экспертов, которые по выбору или из-за обстоятельств общаются только среди самих себя. Оно изучалось в контексте информационных агентств, правительственных структур, делающих политику, и крупных корпораций. Поскольку последствия временами были трагическими, это явление описано в литературе под названием *групповое мышление*.

Психолог из Йельского университета Ирвин Джэнис, который выдумал термин в 1970е, определяет групповое мышление как "способ мышления, в который люди вовлекаются, когда они глубоко содержатся в сплоченной, замкнутой на себя группе, где стремления членов к единодушию доминируют над мотивацией к реалистически оцениваемым альтернативным способам действия."[122] В соответствии с этим определением групповое мышление возникает только тогда, когда велика сплоченность. Это требует, чтобы члены группы разделяли сильное «общее ощущение» солидарности и очень хотели сохранить взаимоотношения внутри группы любой ценой. Когда коллеги действуют в режиме группового мышления, они автоматически применяют тест «сохранения групповой гармонии» к каждому решению, которое перед ними возникает.[123]

Джэнис изучал неудачи решений, принятых группами экспертов, таких как Залив Свиней*. Термин с тех пор применялся ко многим другим примерам, включая неудачу NASA предотвратить катастрофу *Челленджера*, неудачу Запада предугадать коллапс Советского Союза, неудачу американских автомобильных компаний предугадать спрос на небольшие автомобили, и совсем недавнее – возможно, самое пагубное, – стремление администрации Буша к войне на основании ложной уверенности в том, что Ирак имел оружие массового поражения.

---

* Речь идет о неудачной попытке вторжения вооруженных кубинских эмигрантов в юго-западную Кубу в 1961, спланированного и профинансированного Соединенными Штатами в попытке свергнуть правительство Фиделя Кастро. Акция ускорила порчу американо-кубинских отношений, которые еще более ухудшились в следующем году за счет «кубинского ракетного кризиса». – *(прим. перев.)*

Вот описание группового мышления, извлеченное из WEB-сайта Университета штата Орегон, посвященного общению:

Участники группового мышления видят себя частью замкнутой группы, работающей против внешней группы, противостоящей их целям. Вы можете сказать, подвержена ли группа групповому мышлению, если она:

1. переоценивает свою неуязвимость или высокие моральные установки,

2. коллективно дает рационалистическое объяснение решениям, которые она принимает,

3. демонизирует или стереотипно рассматривает внешние группы и их лидеров,

4. имеет культуру однородности, когда индивидуум подвергает цензуре себя и других так, что фасад группового единодушия сохраняется, и

5. содержит членов, которые берут на себя обязательства ограждать лидера группы путем утаивания от лидера информации от них или от других членов группы.[124]

Это не совпадает один в один с моими характеристиками культуры теории струн, но это достаточно близко, чтобы обеспокоиться.

Конечно, струнные теоретики не будут испытывать никаких проблем с ответом на эту критику. Они могут сослаться на многие исторические примеры, показывающие, что прогресс науки зависит от установления тесного консенсуса среди сообщества экспертов. Взгляды сторонних наблюдателей должны игнорироваться, поскольку сторонние наблюдатели не достаточно квалифицированы в инструментарии профессии, чтобы оценивать доказательства и выносить решения. Отсюда следует, что научное сообщество должно иметь механизмы для установления и усиления консенсуса. Что может показаться подобным групповому мышлению для стороннего наблюдателя, на самом деле есть рациональность, проявляемая в соответствии со строго обязательными правилами.

Они могут также возразить обвинению, что они допускают, что консенсус их исследовательского сообщества заменяет критическое мышление индивидуальностей. Согласно одному известному социологу науки, с которым я это обсуждал, тот факт, что ключевые предположения пользуются верой без доказательства, не является необычным.[125] Ни один из ученых не сможет прямо подтвердить более, чем малую часть экспериментальных результатов, вычислений и доказательств, которые формируют основу для их уверенности по поводу их тематики; немногие имеют нужную подготовку, а в современной науке никто не имеет времени. Таким образом, когда вы становитесь членом научного сообщества, вы должны верить, что ваши коллеги говорят правду по поводу результатов в их областях экспертизы. Это может привести к предположению, которое признано как факт, но это случается так же часто в исследовательских программах, которые, в конечном счете, успешны, как и в программах, которые рухнут. Современная наука просто не может делаться без сообщества людей, которые верят тому, что им говорят соратники. Таким образом, хотя эпизоды, подобные указанному, вызывают сожаление и должны исправляться после обнаружения, они сами по себе не являются указанием на обреченность исследовательской программы или на патологическую социологию.

Наконец, вышестоящие струнные теоретики могут заявить, что они достойны своих верительных грамот, и с ними приходит правильное направление исследований, которое они видят подходящим. Как-никак, практика науки базируется на интуитивных предчувствиях, а это их предчувствие. Может ли кто-нибудь растрачивать свое время, работая над чем-то, во что он не верит? И должны ли они давать лучший шанс для успеха и приглашать на работу людей, которые работают над теориями, иными, чем те, в которые верят они?

Но как можно ответить на такую защиту? Если наука основывается на консенсусе среди сообщества экспертов, тогда то, что вы имеете в теории струн, есть сообщество экспертов, которые находятся в необыкновенном согласии по поводу конечной корректности теории, которую они изучают. Имеется ли какое-нибудь рациональное основание продолжать настаивать на своем – любым путем организовать разумное и полезное несогласие? Нам нужно сделать намного больше, чем крутиться вокруг терминов вроде «групповое мышление». Мы должны иметь теорию того, что есть наука и как она работает, такую, которая ясно продемонстрировала бы, почему для науки плохо, когда отдельное сообщество приходит к доминированию в области изучения до того, как его теория прошла обычные проверки доказательства. Это задача, к которой мы теперь переходим.

17. Что есть наука?

Чтобы обратить негативные тенденции в физике, мы, прежде всего, должны понять, что есть наука, – что двигает ее вперед и что удерживает ее сзади. И чтобы сделать это, мы должны определить науку как нечто, являющееся более чем суммой того, что делают ученые. Цель этой главы – предложить такое определение.

Когда я поступил в аспирантуру в Гарвард в 1976, я был наивным студентом из небольшого колледжа. Я благоговел перед Эйнштейном, Бором, Гейзенбергом и Шредингером и тем, как они изменили физику силой своего радикального мышления. Я мечтал, как это делают молодые люди, быть одним из них. И вот я нахожусь в центре физики частиц, окруженный лидерами этой области – людьми вроде Сидни Колмэна, Шелдона Глэшоу и Стивена Вайнберга. Эти люди невероятно умны, но они совсем не похожи на моих героев. На лекциях я никогда не слышал от них разговора о природе пространства и времени или о проблемах в основаниях квантовой механики. Я никогда не встречал студентов с этими интересами.

Это привело меня к персональному кризису. Я определенно был не так скроен, как студенты из великих университетов, но я, будучи студентом, выполнял исследования, которые большинство моих однокашников не имели, и я знал, что я быстро учусь. Так что я был уверен, что я мог бы делать работу. Но я также имел очень специфические идеи о том, каким должен быть великий теоретик. Великие физики-теоретики, с которыми я терся плечами в Гарварде, скорее, отличались от этого. Атмосфера была не философской; она была жесткой и агрессивной, доминировали нахальные, самоуверенные и самонадеянные люди, и в некоторых случаях оскорбительные к тем людям, кто не соглашался с ними.

В это время я подружился с молодым философом науки по имени Амелия Рэчел-Кон. Через нее я познакомился с людьми, которые, подобно мне, интересовались глубокими философскими и основополагающими проблемами физики. Но это только ухудшило дело. Они были приятнее, чем физики-теоретики, но они казались счастливыми, просто анализируя точные логические проблемы в основаниях СТО или обычной квантовой физики. Мне не хватало терпения на такие разговоры; я хотел *изобретать* теории, а не критиковать их, и я был уверен, что – так же не склонные к размышлениям, какими казались создатели стандартной модели, – они знали вещи, которые мне необходимо было знать, если я хотел чего-нибудь достичь.

Как только я начал всерьез думать, чтобы их покинуть, Амелия дала мне книгу философа Пауля Фейерабенда. Она называлась *Против метода* и она заговорила со мной – но то, что она должна была мне сказать, было не очень ободряющим. Это был удар по моей наивности и погружению в себя.

Книга Фейерабенда сказала мне следующее: *Послушай, дитя, прекрати мечтания! Наука не есть посиделки философов на облаках. Это человеческая деятельность, такая же сложная и проблематичная, как и любая другая. Для науки не имеется простых методов, и не имеется простых критериев того, кто есть хороший ученый. Хорошая наука, как бы то ни было, срабатывает в отдельный момент истории на продвижение вперед нашего знания. И не надоедай мне с вопросами, как определить прогресс, – определяй его любым способом, как нравится, и это все будет верно*.

Из Фейерабенда я узнал, что прогресс иногда требует глубоких философских размышлений, но чаще всего нет. Главным образом, они поддерживаются приспособленческими людьми, которые срезают углы, преувеличивают то, что они знают и чего достигли. Галилей был один из них; многие из его аргументов были неверны, и его оппоненты – хорошо образованные, философски мыслящие иезуитские астрономы того времени – легко пробивали бреши в его рассуждениях. Тем не менее, он был прав, а они ошибались.

Еще я узнал из Фейерабенда, что никакие априорные аргументы не могут нам сказать, что будет работать во всех обстоятельствах. Что работает на продвижение науки вперед в один момент, будет неверным в другой. И я изучил еще одну вещь из истории Галилея: вы должны бороться за то, во что вы верите.

Послание Фейерабенда было не слишком своевременным предупреждением. Если я хотел делать хорошую науку, я должен был понять, что люди, с которыми я был достаточно счастлив обучаться, на самом деле были великими учеными дня. Подобно всем великим ученым, они преуспели, поскольку их идеи были правильными и они за них боролись. Если ваши идеи правильны и вы за них боретесь, вы чего-нибудь достигнете. Не растрачивайте время на ощущение сожаления о самом себе или на состояние ностальгии по поводу Эйнштейна и Бора. Никто иной, кроме вас, не может развить ваши идеи, и никто иной, кроме вас, не может за них бороться.

Мне пришлось долго ходить и принимать решение, чтобы определиться в науке. Я вскоре нашел, что я мог бы проводить реальные исследования по применению методов, используемых в физике частиц, к проблеме квантовой гравитации. Если это и означало не принимать на время во внимание основополагающие проблемы, тем не менее, это было чудесно, быть в состоянии придумать новую формулировку и провести в ее рамках некоторые вычисления.

Чтобы поблагодарить его за сохранение моей карьеры, я послал Фейерабенду копию моих тезисов на доктора философии. В ответ он прислал мне свою новую книгу, *Наука в свободном обществе* (1979) с замечанием, приглашающим меня повидаться с ним, если я когда-нибудь буду в Беркли. Несколькими месяцами позже мне случилось быть в Калифорнии на конференции по физике частиц и я попытался выследить его, но это было действительно задачей. Он не соблюдал офисных часов в университете, а на самом деле не имел офиса. Секретарь философского департамента улыбнулся, когда я спросил о нем, и посоветовал мне поискать его дома. Тут он был в телефонной книге на Миллер Авеню в Беркли Хиллз. Я мобилизовал мое мужество, позвонил и вежливо спросил профессора Пауля Фейерабенда. Кто бы ни был на другом конце телефонной линии, он раскричался: «*Профессор* Пауль Фейерабенд! Это другой Пауль Фейерабенд. Вы можете найти его в университете», – и повесил трубку. Так что я вклинился в один из его классов, и нашел его готовым поговорить попозже, если только коротко. Но за несколько минут, которые он уделил мне, он предложил неоценимый совет. «Да, академический мир испортился, и нет нчего, что бы вы могли сделать с этим. Но не беспокойтесь об этом. Просто делайте то, что вы хотите. Если вы знаете, что вы хотите делать, и защищаете это, никто не будет прикладывать какой-либо энергии, чтобы остановить вас.»

Шестью месяцами позже он написал мне вторую заметку, которая нашла меня в Санта Барбаре, где я только что принял позицию постдока в Институте теоретической физики. Он упомянул, что он разговаривал с талантливым студентом-физиком, который, подобно мне, имел философские интересы. Не мог бы я встретиться с ним и посоветовать ему, как действовать? Что я на самом деле ожидал, так это другого шанса поговорить с Фейерабендом, так что я снова прибыл в Беркли и встретился с ними двумя на ступеньках философского здания (настолько близко, насколько он, вероятно, всегда контактировал со соими коллегами). Фейерабенд угостил нас ланчем в Chez Panisse*, затем подвез нас до своего дома (который, как оказалось, находился на Миллер Авеню в Беркли Хиллс), так что студент и я смогли поговорить, пока он смотрел свою любимую мыльную оперу. По пути я разделил заднее сидение небольшого спортивного автомобиля Фейерабенда с надувным плотом, который он держал здесь на случай 8-балльного землетрясения, если оно произойдет, пока он будет находиться на мосту через Залив Сан-Франциско.

---

* Ресторан в Беркли, Калифорния, известный как место зарождения *калифорнийской кухни. – (прим. перев.)*

Первым вопросом, который поднял Фейерабенд, была перенормировка, метод обращения с бесконечностями в квантовой теории поля. Я был удивлен, обнаружив, что он довольно хорошо разбирается в современной физике. Он не был против науки, как должен был бы быть по намекам

некоторых из моих профессоров в Гарварде. Было ясно, что он любит физику, и он был лучше знаком с техническими тонкостями, чем большинство философов, которых я знал. Его репутация как врага науки возникла, очевидно, потому, что он рассматривал вопрос, почему наука работает, как не имеющий ответа. Потому ли, что наука имеет метод? Так действует и знахарь.

Возможно, разница, рискнул я предположить, в том, что наука использует математику. Но так действует и астрология, ответил он, и он мог бы объяснить детали различных вычислительных систем, используемых астрологами, если мы ему позволим. Никто из нас не знал, что сказать, когда он утверждал, что Иоганн Кеплер, один из величайших физиков, которые когда-либо жили, сделал несколько вкладов в техническое усовершенствование астрологии, а Ньютон потратил больше времени на алхимию, чем на физику. Мы думаем, что мы лучшие ученые, чем Кеплер или Ньютон?

Фейерабенд был убежден, что наука является человеческой деятельностью, осуществляемой предприимчивыми людьми, которые следуют общей логике или методу, и, что бы они ни делали, все начинает увеличивать знание (как бы вы его не определяли). Так что его главный вопрос заключался в следующем: как работает наука и почему ее работа так хороша? Даже если он возразил всем моим собственным объяснениям, я чувствовал, что он неистово занимался этим вопросом не потому, что он был против науки, а потому, что он заботился о ней.

В течение дня он рассказал нам свою историю. Он был одаренным в физике тинейджером в Вене, но его занятия были прерваны, когда он был призван на фронт во Вторую мировую войну. Он был ранен на русском фронте, и затем закончил в Берлине, где нашел работу после войны в качестве актера. Со временем он устал от театрального мира и вернулся к изучению физики в Вене. Он вступил в философский клуб, где открыл, что он мог бы победить на любой стороне философских дебатов, просто используя умения, которые он освоил в актерской профессии. Это вызвало у него вопрос, а имеет ли академическая наука какое-либо рациональное основание. Однажды студентам удалось пригласить Людвига Витгенштейна прийти в их клуб. Фейерабенд был настолько впечатлен, что решил переключиться на философию. Он поговорил с Витгенштейном, который пригласил его приехать в Кембридж для совместных с ним исследований. Но к тому моменту, когда Фейерабенд попал в Англию, Витгенштейн умер, так что кто-то предложил ему поговорить с Карлом Поппером, другим эмигрантом из Вены, который преподавал в Лондонской школе экономики. Так он попал в Лондон и начал свою жизнь в философии с написания статей, нападающих на труды Поппера.

После нескольких лет ему была предложена преподавательская работа. Он спросил друга, как ему возможно было бы преподавать, понимая, как мало он знает. Друг сказал ему выписать все, что, как он думает, он знает. Это заполнило один клочок бумаги. Тогда друг сказал ему сделать первую запись предметом первой лекции, вторую запись предметом второй лекции и так далее. Так студент-физик, побывав солдатом, побывав актером, стал профессором философии.[126]

Фейерабенд отвез нас назад в университетский городок Беркли. Прежде чем покинуть нас, он дал нам последний совет. «Просто делайте то, что хотите делать, и не обращайте никакого внимания ни на что другое. В моей карьере я никогда не потратил и пяти минут, делая то, что я не хотел бы делать.»

И это более или менее то, что я и делал. До настоящего времени. Сегодня я чувствую, что мы должны говорить не просто о научных идеях, но так же и о научном процессе. Выбора нет. Мы отвечаем за то, что будут думать последующие поколения о том, почему мы были настолько менее успешны, чем наши учителя.

С момента моего визита к Фейерабенду, который умер в 1994 в возрасте семидесяти лет, я наставлял нескольких талантливых молодых людей в преодолении кризиса, очень похожего на мой собственный. Но я не могу сказать им то, что я сказал самому себе более молодому, – что доминирующий стиль был настолько поразительно успешен, что его нужно было уважать и к нему приспосабливаться. Теперь я должен согласиться с моими молодыми коллегами, что доминирующий стиль не имеет успеха.

Первое и самое главное, стиль занятий наукой, который я изучил в Гарварде, не приводит больше к прогрессу. Он был успешен при установлении стандартной модели, но потерел неудачу при необходимости выйти за ее пределы. После тридцати лет мы должны спросить, а не пережил ли этот стиль с течением времени свою полезность. Возможно, наступил момент, требующий более склонного к размышлениям, рискованного и философского стиля Эйнштейна и его друзей.

Проблема намного шире теории струн; она содержит оценки и позиции, взлелеянные физическим сообществом в целом. Просто обратимся к тому, что физическое сообщество структурировано таким образом, что большие исследовательские программы, которые агрессивно себя пропагандируют, имеют преимущества перед более мелкими программами, которые делают более осторожные утверждения. Следовательно, молодые академические ученые имеют лучшие шансы преуспеть, если они убедят более старых ученых в технически свежих решениях давно стоящих проблем, поставленных доминирующими исследовательскими программами. Делать противоположное – мыслить глубже и более независимо и пытаться сформулировать свои собственные идеи – это плохая стратегия для успеха.

Физика, таким образом, оказывается неспособной решить свои ключевые проблемы. Пора сменить курс – на поощрение небольших рискованных новых исследовательских программ и на препятствование укоренившимся подходам. Мы должны отдать преимущество эйнштейнам -- людям, которые думают сами и игнорируют установленные идеи могущественных вышестоящих ученых.

Но, чтобы убедить скептиков, мы должны ответить на вопрос Фейерабенда о том, как работает наука.

Здесь, кажется, возможны два конфликтующих взгляда на науку. Один рассматривает науку как поле деятельности бунтовщиков, индивидуалов, которые приходят к великим новым идеям и тяжело работают на протяжении жизни, чтобы доказать их правильность. Это миф о Галилее, и мы видим, как он изжил себя сегодня в попытках нескольких в высшей степени достойных восхищения ученых вроде математического физика Роджера Пенроуза, теоретика по сложным системам Стюарта Кауффмана и биолога Линна Маргулиса. Затем имеется взгляд на науку как на консервативное согласованное сообщество, которое допускает малые отклонения от ортодоксального мышления и канализирует творческую энергию на продолжение хорошо определенных исследовательских программ.

В некотором смысле оба взгляда верны. Наука требует как революционности, так и консерватизма. На первый взгляд, это кажется парадоксальным. Как в течение столетий может преуспевать предприятие, чтобы требовать сосуществования революционности и консерватизма? Кажется должен быть какой-то трюк, чтобы привести революционность и консерватизм в долгосрочное и неуютное соседство внутри сообщества и, до некоторой степени, внутри каждого индивидуума тоже. Но как это выполнить?

Наука есть демократия, в которой каждый ученый имеет голос, но это никак не похоже на правление большинства. Однако, хотя высоко ценится индивидуальное суждение, консенсус играет решающую роль. В самом деле, какую позицию я могу занять, когда большинство в моей профессии принимает исследовательскую программу, с которой я не могу согласиться, даже если согласие с ней было бы мне выгодно? Ответ в том, что демократия намного больше, чем правление большинства. Это система идеалов и этики, которая выше правления большинства.

Таким образом, если мы должны доказать, что наука больше, чем социология, больше, чем академическая политика, мы должны иметь понятие, что наука есть то, из чего она состоит, но больше, чем идея самоуправляемого сообщества человеческих существ. Чтобы доказать, что особая форма организации, особое поведение хороши или плохи для науки, мы должны иметь базис для вынесения оценочных суждений, которые проходят за пределами того, что популярно. Мы должны иметь основание для несогласия с большинством, не будучи отмеченными как эксцентричные оригиналы.

Позвольте мне начать, разбив вопрос Фейерабенда на несколько более простых вопросов. Мы можем сказать, что наука прогрессирует, когда ученые достигают консенсуса по вопросу. Каковы механизмы, управляющие тем, как это происходит? Перед тем, как достигнут консенсус, часто имеются разногласия.

Какова роль разногласий в подготовке пути для научного прогресса?

Чтобы ответить на эти вопросы, мы должны вернуться к взглядам более ранних философов. В 1920е и 1930е в Вене выросло философское движение, названное *логическим позитивизмом*. Логические позитивисты предполагали, что утверждения становятся знанием, когда они проверены (верифицированы) наблюдениями мира, и они утверждали, что научное знание является суммой таких проверенных (верифицированных) суждений. Наука прогрессирует, когда ученые делают утверждения, которые имеют проверяемое содержание, которое затем верифицируется. Их мотивом было избавление философии от метафизики, которая заполнила огромные тома утверждениями, не устанавливающими контакт с реальностью. В этом они частично преуспели, но их сдержанная характеристика науки была не последней. Имелось много проблем, одна из которых была в том, что не имелось нерушимой взаимосвязи между тем, что наблюдается, и тем, что определяется. Утверждения и предубеждения вползали в описания простейших наблюдений. Не практикуется, а, вероятно, даже и невозможно, разорвать то, что ученые говорят или пишут на мелкие атомы, каждый из которых соответствует наблюдению, очищенному от теоретизирования.

Когда верификационизм потерпел неудачу, философы предположили, что наука прогрессирует, поскольку ученые следуют методу, гарантирующему приход к истине. Предположения о научном методе были предложены такими философами, как Рудольф Карнап и Пауль Оппенхайм. Карл Поппер продвинул свое собственное предположение, которое заключалось в том, что наука прогрессирует, когда ученые предлагают фальсифицируемые теории – то есть они делают утверждения, которые могут быть опровергнуты экспериментом. Согласно Попперу, никогда нельзя доказать правильность теории, но если она выдержала многочисленные попытки доказать ее неправильность, мы можем начинать верить в нее – по меньшей мере, пока она окончательно не будет фальсифицирована.[127]

Фейерабенд начал свою работу в философии с атаки на эти идеи. Например, он показал, что фальсифицирование теории не такая простая вещь. Очень часть ученые сохраняют веру в теорию после того, как она оказалась фальсифицированной; они делают это через изменение интерпретации эксперимента. Или они высказывают сомнение в самих результатах. Иногда это приводит в тупик, поскольку теория на самом деле не верна. Но иногда удержание веры в теорию перед лицом очевидных экспериментальных опровержений оказывается правильной вещью. Как вы можете сказать, в какой ситуации вы находитесь? Фейерабенд доказывал, что не можете. Разные ученые принимают различные точки зрения и принимают свои шансы такими, какими они будут рождаться в разработках. Нет общего правила, когда нужно отбрасывать теорию, а когда сохранять ей жизнь.

Фейерабенд также полностью раскритиковал идею, что метод является ключом для прогресса науки, показав, что в критических ситуациях ученый будет делать прогресс, отбросив правила. Более того, он доказал – убедительно, на мой взгляд, – что наука может дойти до полной остановки, если всегда следовать правилам «метода». Историк науки Томас Кун предпринял другую атаку на понятие «научный метод», когда он доказал, что ученые следуют различным методам в разные моменты. Но он был менее радикален, чем Фейерабенд; он попытался изложить два метода, один соответствует «нормальной науке», а другой соответствует научным революциям.[128]

Другую критику идей Поппера предпринял венгерский философ Имре Лакатос, который доказывал, что имеется не так много асимметрии между фальсификацией и верификацией, как предполагал Поппер. Если вы видите одного красивого красного лебедя, невероятно, что вы обнародуете теорию, которая говорит, что все лебеди белые; вместо этого вы пойдете искать персону, которая его покрасила.[129]

Эти аргументы приводят нас к нескольким проблемам. Первая, что успех науки все еще требует объяснения; вторая (подчеркнутая Поппером), что становится невозможным отличить науку вроде физики и биологии от систем веры, – таких как марксизм, черная магия и разумное творение, – которые претендуют на научность.[130] Если не может быть сделано такое разграничение, то остается открытой дверь для жуткой разновидности релятивизма, в которой все претензии на истину и реальность имеют одинаковое основание.

Хотя я убежден, как и многие действующие физики, что мы не следуем одному методу, я также убежден, что мы должны ответить на вопрос Фейерабенда. Мы можем начать с обсуждения роли, которую наука играла в человеческой культуре.

Наука является одним из нескольких инструментов человеческой культуры, которые возникли в ответ на ситуацию, в которой мы, люди, находились с доисторических времен: мы, которые могут мечтать о бесконечном пространстве и времени, о бесконечно красивом и бесконечно хорошем, находимся встроенными в несколько миров: физический мир, социальный мир, воображаемый мир и духовный мир. Это условие человеческого существования, что мы долго стремились открыть умения, которые дадут нам власть над этими различными мирами. Эти умения сейчас называют наукой, политикой, искусством и религией. Сегодня, как и в наши ранние дни, они дают нам власть над нашими жизнями и формируют основу наших надежд.

Что бы кто ни говорил, никогда не было человеческого общества без науки, политики, искусства и религии. В пещерах, чьи стены украшены рисунками древних охотников, мы находим кости и камни с узорами, показывающими, что люди подсчитывали какие-то вещи группами по четырнадцать, двадцать восемь или двадцать девять. Археолог Александр Маршак, автор книги *Корни цивилизации*, интерпретирует это как наблюдения за фазами Луны.[131] Это также могли быть записи раннего метода контроля за рождаемостью. В любом случае они показывают, что двадцать тысяч лет назад человеческие существа использовали математику чтобы организовать и концептуально представить свои ощущения о природе.

Наука не была изобретена. Она эволюционировала во времени, когда люди открывали инструменты и традиции, которые работали, чтобы привести физический мир в сферу нашего понимания. Наука, таким образом, есть путь, который является следствием способа существования природы – и следствием способа нашего существования. Многие философы ошибочно искали объяснение, почему наука работает, которое было бы применимо к любому возможному миру. Но такая вещь не может быть. Метод, который работал бы в любой возможной вселенной, будет подобен креслу, которое было бы удобным для любого возможного животного: он годился бы одинаково плохо в большинстве случаев.

На самом деле можно доказать версию указанного утверждения. Предположим, что ученые подобны слепым исследователям, ищущим самый высокий пик в своей стране. Они не могут видеть, но они могут чувствовать обстановку вокруг себя, чтобы определить, какой путь ведет вверх, а какой вниз, и они имеют альтиметр со звуковым считыванием, чтобы определять, насколько высоко они находятся. Они не могут видеть, когда они находятся на вершине пика, но они будут знать это, поскольку только здесь все направления ведут вниз. Проблема в том, что может быть больше, чем один пик, и, если вы не можете видеть, тяжело быть уверенным, что вы карабкаетесь на самый высокий. Таким образом, не очевидно, есть ли стратегия, которой слепые исследователи могут следовать, чтобы найти самый высокий пик за наименьшее количество времени. Это проблема, которую математики изучали, но пока не была доказана ее невозможность. Теорема отсутствия бесплатного обеда, разработанная Дэвидом Уолпертом и Вильямом Макреди, устанавливает, что в любом возможном ландшафте не будет лучшей стратегии, чем просто двигаться вокруг хаотическим образом.[132] Чтобы сформировать стратегию, которая действует лучше, вы должны что-нибудь знать о вашем ландшафте. Вид стратегии, который хорошо работал бы в Непале, потерпит неудачу в Голландии.

Таким образом, не удивительно, что философы не смогли открыть общей стратегии, которая объяснила бы, как работает наука. А придуманные ими стратегии почти не имели сходства с тем, что ученые делают на самом деле. Успешные стратегии со временем были открыты, и они встроены в практики индивидуальных наук.

Раз уж мы это поняли, мы можем идентифицировать свойства природы, которые исследует наука. Самое важное то, что природа относительно стабильна. В физике и химии легко разработать эксперименты, чьи результаты повторяемы. Это не должно означать, например, что это в меньшей степени свойственно биологии или еще в меньшей степени психологии. Но в областях, где эксперименты повторяемы, полезно описывать природу в терминах законов. Таким образом, с самого начала профессионалы физики

интересовались открытием общих законов. При этом проблема не в том, имеются ли на самом деле фундаментальные законы; для того, как мы делаем науку, значение имеет то, есть ли регулярности, которые мы можем открыть и смоделировать, используя инструменты, которые мы можем сделать своими руками.

Нам случилось жить в мире, который открыт для нашего понимания, и это всегда было так. С самого начала нашей жизни как вида мы могли легко наблюдать регулярности в небе и в сезонах, в миграциях животных и в росте растений, и в наших собственных биологических циклах. Делая отметки на костях и камнях, мы научились, что мы можем удержать след этих регулярностей, соотноситься с ним и использовать это знание для собственной выгоды. Вплоть до сегодняшних экспериментов с гигантскими телескопами, мощными микроскопами и все б*о*льшими и б*о*льшими ускорителями мы делаем только то, что мы и всегда делали: используем находящуются под рукой технологию, чтобы открыть развертывающиеся перед нами структуры.

Но если наука работает потому, что мы живем в мире регулярностей, она работает особым способом, который является следствием некоторых особенностей в нашем собственном строении. В особенности, *мы мастера выводить заключения из неполной информации*. Мы постоянно наблюдаем мир, а затем делаем предсказания и выводим из них заключения. Это то, что делали охотники-собиратели, и это также то, что делают физики, работающие над частицами, и микробиологи. Мы никогда не имеем достаточно информации, чтобы полностью подтвердить заключения, которые мы выводим. Способность действовать на догадках и интуиции, а также действовать самоуверенно, когда имеющаяся у нас информация указывает на что-то, но не составляет доказательства, является существенным умением, которое делает некоторых хорошими бизнесменами, хорошими охотниками или фермерами, или хорошими учеными. Это значительная часть того, что делает человеческие существа столь преуспевающим видом.

Но эта способность устанавливает тяжелую цену, которая в том, что мы легко вводимся в заблуждение. Конечно, мы знаем, что мы легко одурачиваемся другими. Обман широко одобряется, поскольку он столь эффективен. Это, в конце концов, только потому, что мы созданы, чтобы приходить к заключениям из неполной информации, что мы так уязвимы для лжи. Нашей основной установкой должна быть одна из истин, что если нам требуется доказательство всего чего угодно, мы никогда ни во что не поверим. Мы бы тогда никогда не смогли бы сделать чего-либо – никогда не встать с кровати, никогда не жениться, не завести дружбу или союз. Без способности доверять мы были бы одинокими животными. Язык эффективен и полезен, поскольку б*о*льшую часть времени мы верим тому, что нам говорят другие люди.

Но что является одинаково важным и успокаивающим, это как часто мы заблуждаемся. И мы заблуждаемся не только индивидуально, но и *в массе*. Склонность группы человеческих существ быстро увериться в чем-то, что индивидуальный член группы будет позже рассматривать как очевидно ложное, является в полном смысле слова поразительной. Некоторые их худших трагедий последнего столетия произошли потому, что хорошо мыслящие люди попались на удочку легких решений, предложенных плохими лидерами. Но достижение консенсуса является частью того, кто мы есть, так как оно существенно, если группа охотников должна преуспеть или племя должно убежать от наступающей опасности.

Тогда, чтобы сообщество продолжало существовать, должны быть механизмы коррекции: старейшины, которые сдерживают импульсивность молодых, поскольку, если они обучились чему-нибудь за свои долгие жизни, так это сколь часто они были неправы; молодые, которые оспоривают верования, которые поддерживались как очевидные и священные на протяжении поколений, когда эти верования больше не годны. Человеческое общество прогрессирует, поскольку оно научилось требовать от своих членов как мятежности, так и почтительного отношения, и поскольку оно открыло социальные механизмы, которые со временем уравновесили эти два качества.

Я верю, что наука является одним из этих механизмов. Это способ обучения и поощрения открытия нового знания, но более всего другого это коллекция умений и практик, которые со временем показали свою эффективность в раскрытии ошибок. Это наш лучший инструмент в постоянной борьбе за преодоление нашей врожденной склонности самим впадать в заблуждение и вводить в заблуждение других.

Из этого короткого очерка мы можем видеть, что общего имеют наука и демократический процесс. Как научное сообщество, так сообщество в общем смысле нуждается в достижении заключений и в вынесении решений, основанных на неполной информации. В обоих случаях неполнота информации будет приводить к формированию группировок, которые придерживаются различных точек зрения. Общества, научные и другие, нуждаются в механизмах для разрешения споров и согласования разницы мнений. Такие механизмы требуют, чтобы были раскрыты ошибки и чтобы новым решениям неподатливых проблем было позволено заменить более старые. В человеческих обществах имеется много таких механизмов, некоторые из них содержат силу или принуждение. Самая основная идея демократии в том, что общество будет функционировать лучше, когда споры разрешаются мирно. Наука и демократия, в таком случае, разделяют общую и трагическую осведомленность о нашей склонности вводить себя в заблуждение, а также оптимистическую уверенность, что, как общество, мы можем использовать коррективы, которые со временем делают нас коллективно мудрее, чем любая индивидуальность.

Теперь, когда мы поместили науку в надлежащий контекст, мы можем обратиться к вопросу, почему она так хорошо работает. Я уверен, что ответ простой: *наука преуспевает, поскольку ученые составляют сообщество, которое определяется и сохраняется строгим соблюдением общей этики*. Это именно приверженность этике, а не приверженность какому-либо отдельному факту или теории, что, как я верю, сохраняется как фундаментальный регулятор внутри научного сообщества.

Имеются два принципа этой этики:

1. Если проблема может быть решена добросовестными людьми с применением рационального аргумента к публично доступному доказательству, тогда нужно рассмотреть, как ее решить таким образом.

2. Если, с другой стороны, рациональный аргумент, выведенный из публично доступных данных, не смог свести добросовестных людей к согласию по проблеме, тогда общество должно позволить и даже поощрить людей на извлечение из данных иных заключений.

Я уверен, что наука преуспевает, потому что ученые придерживаются этих двух принципов, даже если не полностью. Чтобы увидеть, верно ли это, посмотрим на некоторые из вещей, которые эти принципы требуют нас делать:

– Мы согласны спорить рационально и добросовестно, исходя из общедоступных данных, до какой бы степени общепризнанности ни подтверждались заключения.

– Каждый индивидуальный ученый свободен разработать его или ее собственные заключения из данных. Но от каждого ученого также требуется выставить для рассмотрения всего сообщества аргументы для указанных заключений. Эти аргументы должны быть рациональными и основываться на данных, доступных всем членам сообщества. Доказательство, метод, которым доказательство было получено, и логика аргументов, использованных при выводе заключений из доказательства, должны быть совместно используемыми и открытыми для проверки всеми членами сообщества.

– Способность ученых вывести надежные заключения из общедоступных данных основывается на совершенном владении инструментами и процедурами, разработанными за многие годы. Они преподавались, поскольку опыт показывает, что они часто приводят к надежным результатам. Каждый ученый, натренированный в таком умении, глубже осознает роль ошибок и собственных заблуждений.

– В то же время, каждый член научного сообщества понимает, что конечная цель заключается в установлении консенсуса. Консенсус может появиться быстро, или он может потребовать некоторого

времени. Окончательными судьями научного труда являются будущие члены сообщества во время, достаточно удаленное в будущее, чтобы они смогли лучше оценить объективность доказательства. Хотя научная программа может быть временно успешной в собирании сторонников, ни одна программа, утверждение или точка зрения не может быть успешной на долгом пути без того, чтобы она произвела достаточные доказательства, чтобы убедить скептиков.

– Членство в сообществе науки открыто для любого человеческого существа. Рассмотрение статуса, возраста, пола или любых других персональных характеристик не может играть роли при рассмотрении научных доказательств и аргументов и не может ограничивать доступ члена сообщества к возможности распространения доказательств, аргументов и информации. Вступление в сообщество, однако, базируется на двух критериях. Первый критерий это совершенное владение, по меньшей мере, одним умением в научной подобласти, чтобы обозначить, где вы можете независимо производить работу, расцениваемую другими членами как высококачественную. Второй критерий это лояльность и продолжающаяся приверженность общей этике.

– Хотя временами в заданной подобласти может возникать ортодоксальность, сообщество понимает, что противоположные мнения и исследовательские программы необходимы для сохранения здоровья сообщества.

Когда люди вступают в научное сообщество, они отказываются от определенных детских, но универсальных желаний: необходимости чувствовать, что они правы все время, или уверености, что они обладают абсолютной истиной. Взамен они получают членство в непрекращающемся предприятии, которое со временем достигнет того, что индивидуал никогда не достигнет один. Они также получают тренировку экспертов в умении и, в большинстве случаев, изучают намного больше, чем они когда-либо изучили бы самостоятельно. Затем, в обмен на их затраченный труд в применении этого умения, сообщество охраняет право членов на защиту любого взгляда или исследовательской программы, которые, как он или она чувствуют, поддерживаются данными, выработанными из их практики.

Я мог бы назвать этот вид сообщества, в котором членство определяется верностью кодексу этики и практическим умением, выработанным, чтобы понять этот кодекс, *этическим сообществом*. Наука, я бы предположил, является чистейшим примером такого сообщества.

Но охарактеризовать науку как этическое сообщество является недостаточным, поскольку некоторые этические сообщества существуют, чтобы сохранять старые знания вместо того, чтобы открывать новые истины. Религиозные сообщества во многих случаях удовлетворяют критерию, чтобы быть этическими сообществами. На самом деле наука в ее современной форме развилась из монастырских и теологических школ – этических сообществ, чьей целью было сохранение религиозных догм. Так что, чтобы наша характеристика науки имела смысл, мы должны добавить некоторый критерий, который аккуратно отличит физическое ведомство от монастыря.

Чтобы сделать это, я попытался бы ввести второе понятие, которое я называю *творческим сообществом*. Это сообщество, *чья этика и организация включают в себя уверенность в неизбежности прогресса и открытость в будущее*. Открытость оставляет место, творчески и институционально, для инноваций и неожиданностей. Тут не только имеется уверенность, что будущее будет лучше, имеется понимание, что мы не можем предсказать, как это лучшее будущее будет достигнуто.

Ни марксистская страна, ни фундаменталистская религиозная структура не является творческим сообществом. Они могут предвкушать лучшее будущее, но они уверены, что точно знают, как это будущее будет достигнуто. В словах, которые я часто слышал от моей бабушки-марксистки и друзей-марксистов, пока рос, они были уверены, что они правы, поскольку их «наука» учит их «точному анализу ситуации».

Творческое сообщество уверено, что будущее будет приносить неожиданности в форме новых открытий и новых кризисов, которые нужно будет преодолевать. Вместо того, чтобы устанавливать веру в их текущее

знание, его члены вкладывают их надежды и ожидания будущего в будущие поколения путем передачи им этических правил и способов мышления, индивидуальных и коллективных, что позволит им победить и извлечь преимущества из условий, которые находятся за пределами нынешних способностей воображения.

Хорошие ученые ожидают, что их студенты превзойдут их. Хотя академическая система дает успешному ученому много оснований для уверенности в его или ее собственной власти, любой хороший ученый знает, что в момент, когда вы поддаетесь уверенности, что вы знаете много больше, чем ваши лучшие студенты, вы перестаете быть ученым.

Научное сообщество, таким образом, является как этическим, так и творческим сообществом.

Что должно быть достаточно ясно из этого описания, что расхождение во мнениях существенно для прогресса науки. Мой первый принцип говорит, что когда мы пытаемся достичь консенсуса при помощи доказательств, мы должны действовать именно так. Но мой второй принцип говорит, что пока доказательство пытается достичь консенсуса, мы должны поощрять широкий разброс точек зрения. Это хорошо для науки – момент, который часто подчеркивал Фейерабенд, и, я уверен, правильно. Наука развивается быстрее, когда есть конкурирующие теории. Более старый, наивный взгляд заключается в том, что теории выдвигаются единовременно, а затем проверяются данными. Это оказывается не верным, если принять во внимание размеры, в которых теоретические идеи, которые мы имеем, влияют на то, какие эксперименты мы делаем и как мы их интерпретируем. Если одномоментно рассматривается только одна теория, мы, вероятно, попадем в интеллектуальную ловушку, созданную этой теорией. Единственный путь выбраться имеется, если различные теории соревнуются в объяснении одних и тех же данных.

Фейерабенд доказывал, что даже в случаях, когда имеется широко признанная теория, которая согласуется со всеми фактами, все равно необходимо придумывать конкурирующие теории, чтобы обеспечить прогресс науки. Это потому, что эксперименты, которые противоречат установленному взгляду, более вероятно будут предложены конкурирующей теорией и, возможно, о них даже не задумаются, если отсутствует конкурирующая теория. Так что конкурирующие теории дают начало экспериментальным аномалиям так же часто, как и неудачам.

Следовательно, настаивал Фейерабенд, ученые не должны быть никогда согласны, исключая то, что они к этому стремятся. Когда ученые приходят к согласию слишком рано, до того, как их к этому вынудят факты, наука находится в опасности. Мы должны тогда спросить, что повлияло на них, что они пришли к преждевременному заключению. Поскольку они только люди, ответом на это будут, вероятно, те же факторы, которые заставляют людей соглашаться по поводу всех сортов вещей, которые не зависят от доказательств, от религиозной веры до модных тенденций в массовой культуре.

Так что вопрос в следующем: хотим ли мы, чтобы ученые пришли к согласию, поскольку они хотят быть или выглядеть похожими на нечто блестящее в глазах других ученых, или поскольку каждый, кого они знают, мыслит одинаково, или поскольку они хотят быть в победившей команде? Большинство людей склоняются к согласию с другими людьми именно по таким мотивам. Нет причин, по которым ученые имели бы иммунитет против этого, оставаясь, как-никак, людьми.

Однако мы должны бороться с такими побуждениями, если мы хотим поддерживать жизнеспособность науки. Мы должны поощрять противоположности, которые приводят к несогласию настолько, насколько позволяют факты. Понимая, насколько люди нуждаются в том, чтобы выглядеть как часть, чтобы войти в часть, чтобы быть частью победившей команды, мы должны прояснить, что когда мы уступаем таким потребностям, мы губим науку.

Имеется и другая причина, по которой здоровье научного сообщества должно поощрять несогласие. Наука двигается вперед, когда мы пытаемся согласиться с чем-то неожиданным. Если мы думаем, что мы *знаем* ответ, мы будем пытаться встроить каждый результат в заранее представленную идею. Это расходится с тем, что поддерживает жизнеспособность науки, тормозит ее движение. В атмосфере, наполненной спорами между соперничающими взглядами, социологических сил недостаточно, чтобы привести людей к

согласию. Так что в тех редких случаях, когда мы приходим к консенсусу по какому-либо поводу, это происходит потому, что у нас нет выбора. Факты заставляют нас сделать это, даже если они нам не нравятся. Именно поэтому прогресс науки реален.

Имеется несколько очевидных возражений на эту характеристику науки. Первое, имеются явные нарушения членами сообщества этики, которую я только что описал. Ученые часто преувеличивают или преуменьшают факты. Возраст, статус, мода, давление равных – все это играет роль в работе научного сообщества. Некоторые исследовательские программы успешны в собирании последователей и ресурсов без всякой поддержки со стороны фактов, хотя другие исследовательские программы, которые, в конечном счете, приносят плоды, подавляются социологическими усилиями.

Но я должен сказать, что достаточно ученых в достаточной степени придерживаются этики, что продолжает делать прогресс в долгосрочной перспективе, несмотря на факт, что время и ресурсы растрачиваются в продвижении и защите ортодоксальных и модных идей, которые позже оказываются неправильными. Должна быть подчеркнута роль времени. Что бы ни могло происходить в краткосрочной перспективе, с течением десятилетий почти всегда собираются факты, которые приводят противоположные утверждения к консенсусу, вне зависимости от моды.

Другое возможное возражение в том, что данная мной характеристика логически неполна. Я не предложил никакого критерия для определения того, какие умения необходимы для мастера. Но, я думаю, это лучше сделать самим сообществам на протяжении многих поколений. Нет способа, которым Ньютон или Дарвин могли бы предсказать диапазон инструментов и процедур, которые используются сегодня.

Следование общей этике никогда не совершенно, так что всегда имеется место для усовершенствования практики науки. Это кажется особенно верным сегодня, когда мода стала играть слишком большую роль, по крайней мере, в физике. Вы знаете, что это происходит всякий раз, когда имеется яркий молодой недавний доктор философии, который говорит вам приватно, что они могли бы скорее делать X, но делают Y, поскольку это направление или методика поддерживается влиятельными старыми людьми, и они, таким образом, чувствуют необходимость делать Y, чтобы получить финансирование или работу. Конечно, в науке, как и в других областях, всегда есть немногие, кто выберет X, несмотря на очевидные свидетельства, что те, кто делает Y, будут лучше вознаграждены в краткосрочной перспективе. Среди них есть люди, которые будут, более вероятно, вести следующее поколение. Таким образом, прогресс науки может быть замедлен ортодоксальностью и модой, но пока имеется место для тех, кто делает X вместо Y, он не может остановиться полностью.

Все это говорит, что, подобно всему другому, что делают человеческие существа, успех в науке в большой степени двигается мужеством и характером. Хотя прогресс науки зависит от возможности достижения консенсуса в долгосрочной перспективе, решения, которые принимают индивидуальные ученые о том, что делать и как оценивать факты, всегда основываются на неполной информации. Наука прогрессирует, поскольку она строится на этическом понимании, что перед лицом неполной информации мы все равны. Никто не может с определенностью предсказать, приведет ли тот или иной подход к определенному прогрессу или к годам растраченного труда. Все, что мы можем сделать, это тренировать студентов в умениях, опыт использования которых показывает, как чаще всего подойти к надежным заключениям. После этого мы должны оставить их свободными следовать их собственной интуиции, и мы должны находить время слушать их, когда они вернутся назад. Пока сообщество непрерывно раскрывает благоприятные возможности для новых идей и точек зрения и придерживается этики, что в конце нам требуется консенсус, основанный на рациональных аргументах из фактов, доступных всем, наука в итоге будет преуспевать.

Задача формирования сообщества науки никогда не закончится. Всегда будет необходимо бороться с доминированием ортодоксальности, моды, возраста и статуса. Всегда будет соблазн выбрать легкий путь, чтобы записаться в команду, которая, кажется, побеждает, вместо того, чтобы снова попытаться понять проблему. В своей высшей форме научное сообщество охватывает преимущества наших лучших побуждений и желаний, одновременно защищая нас от нашего худшего. Сообщество работает, частично

используя самоуверенность и амбиции, которые мы в некоторой степени привносим в исследования. Ричард Фейнман смог выразить это лучше всего: *Наука есть организованный скептицизм в достоверности экспертного мнения*.[133]

18. Пророки и ремесленники

Возможно, имеется что-то неправильное в пути, которым мы идем, чтобы попытаться сделать революцию в физике. Я утверждал в главе 17, что наука является человеческим институтом, подверженным человеческим слабостям, – и хрупким, поскольку она зависит как от групповой этики, так и от индивидуальной этики. Она может быть разрушена, и я уверен, что сегодня дело идет к этому.

Сообщество часто находит, что оно ограничено в мышлении особым образом, следующим из того, как оно организовано. Важной организационной проблемой является: понимаем ли мы и отдаем ли должное правильному виду физики и правильному виду физика, чтобы решить находящуюся под рукой проблему? Ее познавательный двойник таков: задаем ли мы правильные вопросы?

Одна вещь, с которой кажется согласным всякий, кто заботится о фундаментальной физике, в том, что необходимы новые идеи. От самой скептической критики до самой энергичной защиты теории струн вы слышите одну и ту же вещь: мы потеряли что-то важное. Это ощущение необходимости чего-то нового привело организаторов годовой струнной конференции 2005 к предложению секции с названием «Следующая суперструнная революция». И, хотя в настоящее время среди практиков имеется больше уверенности в своих областях, каждый физик, кого я знаю, согласится, что, возможно, по меньшей мере, одна большая идея потеряна.

Как нам найти эту потерянную идею? Ясно, что кто-то или должен осознать неверное предположение, которое мы все сделали, или задать новый вопрос, так что это должна быть личность, в которой мы нуждаемся, чтобы обеспечить будущее фундаментальной физики. Организационная проблема при этом ясна: имеем ли мы систему, которая позволяет кому-то одаренному разыскать это неправильное предположение или задать этот правильный вопрос в сообществе людей, которое мы поддерживаем и (что не менее важно) слушаем? Принимаем ли мы творческих бунтарей с таким редким талантом, или мы исключаем их?

Ясно без обсуждения, что люди, которые могут хорошо задавать неподдельно новые, но существенные вопросы, редки, и что способность наблюдать за технической областью и видеть скрытые предположения или новые пути исследований является умением, совершенно отличным от повседневных умений, которые являются необходимым условием вхождения в физическое сообщество. Одна вещь быть ремесленником, высоко квалифицированным в практике одного умения. И совершенно другая вещь быть пророком.

Это различие не означает, что пророки не являются в высшей степени подготовленными учеными. Пророк должен знать предмет насквозь, быть в состоянии работать с профессиональным инструментарием и убедительно общаться на языке профессии. Хотя пророку нет необходимости быть самым технически сильным из физиков. История демонстрирует, что разновидность личности, которая становится пророком, временами заурядна, когда ее сравнивают с математически искусными учеными, которые выделяются в решении проблем. Лучшим примером является Эйнштейн, который, очевидно, не смог бы получить приличную работу как ученый, когда он был молод. Он был медлителен в обсуждении, легко путался; другие были намного лучше как математики. Сам Эйнштейн, говорят, заметил: «Не то, чтобы я был такой умный. Дело просто в том, что я дольше обращаю внимание на проблемы».[134] Нильс Бор был даже более экстремальным случаем. Мара Беллер, историк, которая детально изучала его работу, отмечает, что в его

исследовательской записной книжке не было ни единого расчета, а только словесные аргументы и картинки.[135] Луи де Бройль сделал изумительное предположение, что, если свет является как частицей, так и волной, возможно, что электрон и другие частицы также ведут себя как волны. Он предложил это в 1924 в тезисах на доктора философии, которые не впечатлили его экзаменаторов и потерпели бы неудачу, если бы не поддержка Эйнштейна. Насколько я знаю, он никогда больше не сделал в физике ничего столь же важного. Имеется только одна личность, о которой я могу думать одновременно как о провидце, так и о лучшем математике своего времени: Исаак Ньютон; на самом деле, почти все, что касается Ньютона, уникально и непостижимо.

Как отмечалось в предыдущей главе, Томас Кун ввел различие между «нормальной наукой» и научными революциями. Нормальная наука основывается на парадигме, которая является хорошо определенной практикой с фиксированной теорией и фиксированным массивом вопросов, экспериментальных методов и вычислительных методик. Научная революция происходит, когда рушится парадигма, то есть когда теория, на которой она основана, терпит неудачу в предсказании или объяснении результатов экспериментов.[136] Я не думаю, что наука всегда работает таким образом, но определенно имеются нормальные и революционные периоды, и наука действует в течение этих периодов различным образом. Суть в том, что в нормальной и революционной науке важны различные виды людей. В нормальные периоды вам нужны только люди, которые, независимо от степени их воображения (которая вполне может быть высокой), на самом деле хороши в работе с техническим инструментарием – давайте назовем их *мастерами-ремесленниками*. Во время революционных периодов вам нужны *пророки*, которые могут вглядеться прямо в темноту.

Мастера-ремесленники и пророки приходят в науку по разным причинам. Мастера-ремесленники приходят в науку, большей частью, потому, что они открыли в школе, что это для них хорошо. Они являются обычно лучшими студентами в своих математических и физических классах от начальной школы и на всем пути до аспирантуры, где они, наконец, встречают равных себе. Они всегда были в состоянии решить математические проблемы быстрее и более аккуратно, чем их одноклассники, так что решение проблем есть именно то, на основании чего они склонны оценивать других ученых.

Пророки совершенно другие. Они мечтатели. Они идут в науку потому, что у них есть вопросы о природе бытия, на которые школьные учебники не отвечают. Если они не становятся учеными, они могут быть артистами или писателями, или могут окончить богословскую школу. Однако стоит ожидать, что представители этих двух групп не понимают друг друга и не доверяют друг другу.

Общая неудовлетворенность пророков в том, что стандартное образование в физике игнорирует исторический и философский контекст, в котором развивается наука. Как указывал Эйнштейн в письме молодому физику, который противился его попыткам добавить философию в его курс физики:

«Я полностью согласен с Вами по поводу существенности и образовательной ценности методологии, равно как и истории и философии науки. Так много людей сегодня – даже профессиональных ученых – кажутся мне подобными тому, кто видит тысячи деревьев, но никогда не видит леса. Знание исторического и философского основания дает этот вид независимости от предубеждений его поколения, от которого страдают большинство ученых. Эта независимость, создаваемая философским прозрением, является – по моему мнению – знаком различия между простым мастеровым или специалистом и настоящим искателем истины.» [137]

Конечно, некоторые люди являются смесью того и другого. Аспирантуры не готовят никого, кто не был бы в высшей степени компетентен с технической стороны. Но большинство физиков-теоретиков, которых я знаю, попадают в ту или в другую группу. Как насчет меня? Я думаю о себе как о потенциальном пророке, который, к счастью, достаточно хорош в своих умениях, чтобы время от времени делать вклад в решение проблем.

Когда я впервые, будучи студентом, столкнулся с категориями Куна о революционной и нормальной науке, я был сбит с толку, поскольку не мог сказать, в каком периоде мы находились. Если я рассматривал группы

вопросов, которые оставались открытыми, мы явно прошли часть пути через революцию. Но если я рассматривал, как работали люди вокруг меня, мы с той же очевидностью делали нормальную науку. Имелась парадигма, которой была стандартная модель физики частиц и экспериментальная деятельность, которая эту модель подтверждала, и все это нормально прогрессировало.

Теперь я понимаю, что мое замешательство было свидетельством кризиса, который мной исследовался в настоящей книге. Мы на самом деле находимся в революционном периоде, но пытаемся выйти из него, используя неадекватные инструменты и организацию нормальной науки.

Итак, это моя основная гипотеза по поводу последних двадцати пяти лет физики. Не может быть сомнений, что мы находимся в революционном периоде. Мы капитально застряли, и нам нужны настоящие пророки, причем очень сильно. Но прошло много времени с момента, когда понадобились пророки. У нас было несколько монументальных провидцев в начале двадцатого столетия: Эйнштейн среди них, но также Бор, Шредингер, Гейзенберг и несколько других. Они не смогли завершить революцию, которую они начали, но они создали частично успешные теории – квантовую механику и ОТО, – чтобы мы их достраивали. Развитие этих теорий требовало много тяжелой технической работы, которая для нескольких поколений физиков была «нормальной наукой», в которой преобладали мастера-ремесленники. На самом деле переход от доминирования европейцев к доминированию американцев, который имел место в 1940е, был очень большим триумфом ремесленников над пророками. Как отмечалось, он свелся к полному изменению стиля теоретической физики от задумчивой основательной манеры Эйнштейна и равных ему людей к прагматической агрессивной манере, которую нам дала стандартная модель.

Когда я изучал физику в 1970е, было почти так, как если бы мы были научены смотреть свысока на людей, которые размышляли над основополагающими проблемами. Когда мы задавали вопросы о фундаментальных проблемах в квантовой теории, нам говорили, что их никто полностью не понимает, но это касалось тех, кто не составлял большой части науки. Работа заключалась в принятии квантовой механики как данности и применении ее к новым проблемам. Образ мышления был прагматическим; «Заткнись и вычисляй» было мантрой. Люди, которые не могли уйти от своих опасений по поводу смысла квантовой теории, рассматривались как неудачники, которые не могли делать работу.

Как тот, кто пришел в физику через чтение эйнштейновских философских мечтаний, я не мог бы принять такие рассуждения, но несовершеннолетие было простодушным, и я следовал им как можно лучше, насколько мог. Вы могли сделать карьеру, только работая в рамках квантовой теории как данной, не подвергая ее вопросам. Счастливые обстоятельства дали мне некоторое время в Институте перспективных исследований в Принстоне, но здесь не имелось памяти об эйнштейновском способе делать науку – только пустой бронзовый бюст, молчаливо вглядывающийся куда-то около библиотеки.

Но революция была не завершена. Стандартная модель физики частиц определено была триумфом прагматического стиля развития физики, но ее триумф, как теперь кажется, также отмечает и ее пределы. Стандартная модель и, вполне возможно, инфляция осуществляется, пока мы могли идти путем нормальной науки. С тех пор мы завязли, поскольку то, в чем мы нуждались, это вернуться к революционной разновидности науки. Еще раз, нам нужно несколько пророков. Проблема в том, что сегодня таких вокруг очень немного, так как наука очень долго делалась таким образом, который редко понимает и едва терпит их.

Между началом и последней четвертью двадцатого столетия наука – и академия в целом – стала намного более организованной и профессиональной. Это означает, что деятельность нормальной науки культивировалась как единственная модель хорошей науки. Даже если каждый может видеть, что необходима революция, наиболее влятельная часть нашего сообщества забыла, как ее делать.

Мы пытались сделать это с помощью структур и стилей исследований, более подходящих для нормальной науки. Парадоксальная ситуация теории струн – так много обещаний, так мало исполнения – это как раз то, что вы получаете, когда множество в высшей степени подготовленных мастеров-ремесленников пытаются делать работу пророков.

Я уверен, что некоторые струнные теоретики будут возражать против такой характеристики. Определенно, они работают над фундаментальными проблемами физики, и вся их работа нацелена на открытие новых законов. Почему струнные теоретики не являются пророками? Разве червоточины, высшие размерности и множественные вселенные не являются творческими идеями? Да, конечно, но суть не в этом. Вопрос таков: каков контекст и каковы идеи по этому поводу? Скрытые размерности и червоточины едва ли являются новинкой более чем через три четверти века после Калуцы и Кляйна. Не требуется много предвидения или смелости, чтобы думать об этих вещах, когда сотни других людей обдумывают те же мысли.

Другой способ взглянуть на нашу сегодняшнюю ситуацию в том, что пророки из-за своей страсти к ясности принуждаются к схватке с глубочайшими проблемами в основаниях физики. Последние включают основания квантовой механики и проблемы, связанные с пространством и временем. Много статей и книг было написано по проблемам обоснования квантовой механики за последние несколько десятилетий, но, насколько я знаю, ни одна из них не принадлежит ведущему струнному теоретику. Нет, насколько мне известно, ни одной статьи, написанной струнным теоретиком, которая пытается связать стоящие перед теорией струн проблемы с более старыми трудами физиков и философов о великих проблемах в основаниях пространства, времени и квантовой теории.

Лидеры фоново-независимых подходов к квантовой гравитации, наоборот, склонны быть людьми, чьи научные взгляды формировались размышлениями длиною в жизнь о глубоких основополагающих проблемах. Легко перечислить тех, чьи раздумья привели к статьям и даже книгам, обращенным к фундаментальным проблемам: Роджер Пенроуз, вероятно, лучше всех известен публике, но можно назвать многих других, включая Джона Баеза, Луиса Кране, Брюса деВитта, Фэй Даукер, Кристофера Исхама, Фотини Маркопоулоу, Карло Ровелли, Рафаэля Соркина и Герарда т'Хоофта.

Напротив, я не могу представить себе типичного струнного теоретика, который предложил оригинальную идею об основаниях квантовой теории или природе времени. Струнные теоретики склонны отмахиваться от этого обвинения ссылаясь на результат, что все эти вопросы решены. Время от времени они признают, что проблемы серьезны, но быстро сопровождают это допущение заявлением, что слишком рано пытаться решить их. Часто слышно, что мы должны просто продолжать развитие теории струн, поскольку, так как теория струн верна, она должна содержать необходимые решения.

Я ничего не имею против людей, которые занимаются наукой как ремеслом, чей труд основан на мастерстве технических приемов. Это то, что делает нормальную науку столь влиятельной. Но это фантазия представлять, что фундаментальные проблемы могут быть решены через решение технических проблем в рамках существующих теорий. Было бы прекрасно, если это бы имело место, – определенно, мы все могли бы меньше задумываться, а думать на самом деле тяжело, даже для тех, кто чувствует потребность делать это. Но глубокие, стойкие проблемы никогда не решаются случайно; они решаются только людьми, которые захвачены ими и намереваются решить их непосредственно. Эти люди пророки, и именно поэтому столь важно, чтобы академическая наука приглашала их, вместо того, чтобы исключать их.

Наука никогда не была организована дружелюбным для пророков образом; ситуация с трудоустройством Эйнштейна вряд ли единственный пример. Но сто лет назад академия была намного меньше и намного менее профессиональна, и хорошо подготовленные посторонние были не уникальны. Это было наследием девятнадцатого столетия, когда большинство делающих науку людей были энтузиастами-любителями, или достаточно богатыми, чтобы не нуждаться в работе, или достаточно убедительными, чтобы они смогли найти покровителей.

Прекрасно, вы можете сказать. Но кто такие пророки? Они по определению в высшей степени независимые и само-мотивированные индивидуальности, которые так преданы науке, что они будут делать ее, даже если они не смогут жить за ее счет. Таких должно быть несколько, даже если наша профессионализированная академия недружелюбна к ним. Кто они и что они ухитряются делать, чтобы решить великие проблемы?

Они скрыты прямо перед глазами. Они могут быть распознаны по их отказу от предположений, в которые верит большинство из остающихся нас. Позвольте мне представить вам некоторых из них.

Мне весьма трудно поверить, что СТО неверна; если это так, то имеется выделенное состояние покоя и как направление, так и скорость движения должны быть, в конечном счете, определимы. Но вокруг имеется несколько теоретиков, которые не имеют трудностей с этой концепцией. Тэд Джэкобсон является моим другом, с которым мы работали над статьей по квантовой механике петлевой квантовой гравитации. Вместе мы нашли первое точное решение ключевого уравнения, известного как уравнение Уилера-деВитта.[138] Но когда петлевая квантовая гравитация двинулась вперед, у Джэкобсона усилился пессимизм. Он не думал, что петлевая квантовая гравитация могла бы работать, а также он не думал, что она достаточно глубока. После обдумывания всего этого он начал задавать вопросы о самом принципе относительности и начал верить в возможность преимущественного состояния покоя. Он потратил годы, развивая эту идею. В главах 13 и 14 я отмечал, что если СТО неверна, эксперимент может вскоре нам об этом сказать. Джэкобсон и его студенты в Университете Мэрилэнда находятся среди лидеров по поиску экспериментального теста СТО.

Другим пророком, который оспорил всю схему относительности, является Жоао Магуэйджо (см. главу 14). У него не было выбора, поскольку он придумал и влюбился в идею, которая противоречит СТО, – что скорость света могла быть намного больше в ранней вселенной. Статьи, которые он об этом писал, объективно просто непротиворечивы – и они определенно не имеют смысла без предположения, что принцип относительности должен быть отброшен или, по меньшей мере, модифицирован.

Далее имеются необузданные парни из физики твердого тела – достигшие совершенства физики, которые сделали большие карьеры, объясняя реальные вещи по поводу поведения реальных веществ. Я упоминал Роберта Лафлина, который был удостоен Нобелевской премии в 1998 за его вклад в «открытие новой формы квантовой жидкости с возбуждениями, имеющими дробный заряд», Григория Воловика из Института теоретической физики имени Ландау в Москве, который объяснил поведение определенных разновидностей очень холодного жидкого гелия, и Ксао-Гань Вена. Эти люди являются мастерами-ремесленниками и пророками одновременно. Делая, возможно, лучшую и саму важную нормальную науку последних нескольких десятилетий, они решили приложить свои руки к глубоким проблемам квантовой гравитации, и они начали с идеи, что принцип относительности неверен, что он является просто приблизительным, эмерджентным феноменом. Другим таким пророком/ремесленником является Джеймс Бьёркен, физик, занимающийся частицами. То, что мы знаем, что протоны и нейтроны содержат кварки, является в большой степени следствием его прозрений.

Одним из великих пророков является Хольгер Беч Нильсен из Института Нильса Бора. Он был изобретателем теории струн, и он имеет на своем счету много других ключевых открытий. Но на долгие годы он изолировался от генерального направления физики, защищая то, что он назвал *хаотической динамикой*. Он уверен, что самое полезное предположение, которое мы можем сделать в отношении фундаментальных законов, это что они являются хаотическими. Все, о чем мы думаем как о внутренне правильном, вроде относительности и принципов квантовой механики, он рассматривает как второстепенные факты, которые появляются из фундаментальной теории, настолько лежащей за пределами наших представлений, что мы можем также считать, что ее законы хаотичны. Его моделями являются законы термодинамики, которые использовались как основанные на принципах, но сегодня понимаются как наиболее вероятный способ, которым будут вести себя большие количества атомов, находящихся в хаотическом движении. Это может и не быть верным, но Нильсен удивительно далеко продвинулся в своей анти-унификационной программе.

Имеется очень короткий список струнных теоретиков, которые делали постоянные вклады в науку на уровне тех, которые завещаны указанными джентльменами. Как же струнные теоретики – или, в этом же смысле, петлевые теоретики – отвечают на настойчивые предостережения этих достигших совершенства физиков, что, возможно, мы все сделали ошибочное предположение? Мы их игнорируем. Да, на самом деле, вылезая вон из кожи. По правде говоря, мы смеемся над ними за их спинами, а иногда чуть только они покинут помещение. Занятие физикой уровня Нобелевской премии – или даже выигрыш самой премии – очевидно, не защищает вас, когда вы подвергаете сомнению общепринятые предположения, такие как СТО и ОТО. Я был шокирован, когда Лафлин сказал мне, что на него давит его департамент и финансирующее агентство, чтобы он занимался нормальной наукой в области, в которой он работал,

вместо того, чтобы тратить время на его новые идеи о пространстве, времени и гравитации. Если такой личности после всех ее свершений, включая Нобелевскую премию, нельзя доверить охотиться за своими глубочайшими идеями, что же тогда означает академическая свобода?

К счастью для физики, мы скоро узнаем, верна СТО или нет. Большинство моих друзей ожидает, что экспериментальные наблюдения проявят эти величайшие человеческие глупости. Я надеюсь, что борцы с предрассудками ошибаются и что СТО пройдет этот тест. Но я не могу избавиться от опасений, что, возможно, именно мы ошибаемся, а они правы.

Так много по вопросам к относительности. Что, если квантовая теория неверна? Это чувствительное, уязвимое место всего проекта квантовой гравитации. Если квантовая теория не верна, тогда попытки объединить ее с гравитацией будут гигантской тратой времени. Кто-нибудь думает, что это так?

Да, и один из них Герард т'Хоофт. В качестве аспиранта в Университете Утрехта, т'Хоофт доказал вместе с более старым соратником, что квантовые теории Янга-Миллса были последовательными, открытие, которое сделало возможной всю стандартную модель, и он вполне заслужил Нобелевскую премию за эти достижения. Это только одно из его многих фундаментальных открытий по поводу стандартной модели. Но в последнее десятилетие он стал одним из самых смелых мыслителей над фундаментальными проблемами. Его главная идея названа *голографическим принципом*. Как он его формулирует, не существует пространства. Все, что происходит в регионе, который мы используем для размышлений как пространство, может быть представлено как имеющее место на поверхности, окружающей данное пространство. Более того, описание мира, который существует на этой границе не является квантовой теорией, а является детерминистической теорией, которая, как он уверен, заменит квантовую.

Как раз перед тем, как т'Хоофт сформулировал свой принцип, сходная идея была предложена Луисом Кране в контексте фоново-независимых подходов к квантовой гравитации. Он предположил, что правильный способ применения квантовой теории ко вселенной – не пытаться вставить всю вселенную в одну квантовую систему. Это пытались сделать Стивен Хокинг, Джеймс Хэртл и другие, и столкнулись с тяжелыми проблемами. Кране вместо этого предположил, что квантовая механика не является статическим описанием системы, но записью информации, которую одна подсистема вселенной может иметь возле другой посредством их взаимодействия. Далее он предположил, что имеется квантово-механическое описание, связанное с каждым способом разделения вселенной на две части. Квантовые состояния живут не в одной части или в другой, а на границе между ними.[139]

Радикальное предположение Кране с тех пор выросло в класс подходов к квантовой теории, которые называются *относительными квантовыми теориями*, поскольку они основаны на идее, что квантовая механика является описанием взаимоотношений между подсистемами вселенной. Эта идея была развита Карло Ровелли, который показал, что она превосходно согласуется с тем, как мы обычно делаем квантовую теорию. В контексте квантовой гравитации это приводит к новому подходу к квантовой космологии, созданному Фотини Макропоулоу и ее сотрудниками. Маркопоулоу подчеркнула, что описание обмена информацией между различными подсистемами является тем же, что и описание причинной структуры, которая ограничивает, какие системы могут влиять друг на друга. Таким образом, она нашла, что вселенная может описываться как квантовый компьютер с динамически генерируемой логикой.[140] Идея, что вселенная является разновидностью квантового компьютера также продвигалась Сетом Ллойдом из Массачусетского технологического института, одного из мечтателей из области квантовых вычислений.[141] С двух сторон их соответствующих дисциплин Маркопоулоу и Ллойд возглавили движение, которое использует идеи теории квантовой информации для изменения концепции вселенной, приводя к пониманию того, как элементарные частицы могут возникать из квантового пространства-времени.

Идея Герарда т'Хоофта о мире, представленном на его границе, должна напомнить вам о предположении Малдасены. На самом деле идеи т'Хоофта отчасти вдохновили Хуана Малдасену, и некоторые думают, что голографический принцип окажется одним из базовых принципов теории струн. Одно это могло бы легко сделать его одним из лидеров сообщества теории струн, если бы он заинтересовался такой ролью. Но в

1980е т'Хоофт начал идти своим собственным путем. Он сделал это, когда он был в зените своей карьеры и в то время, когда никто не был сильнее технически. Однако в момент, когда он отклонился от генерального направления, он стал высмеиваться своими приятелями-физиками, занимающимися частицами. Он не казался озабоченным или даже обращающим на это внимание, но, я уверен, это уязвляло. Тем не менее, он почти во всем сомневался и изобретал свой собственный путь в фундаментальной физике. Его основная уверенность, развиваемая на протяжении десятилетий, заключается в том, что квантовая теория неверна.

Нет более искренней и чистой личности, чем т'Хоофт. Одна из вещей, за которую мы в области квантовой гравитации его любим, заключается в том, что он так часто там. Он приходит на многие наши встречи, и вы никогда не видите его в кулуарах, занимающегося политикой вместе с другими знаменитыми посетителями. Вместо этого он приходит на каждую секцию, а это нечто, что делают только молодые студенты. Он прибывает первым каждое утро, безупречно одетый в костюм-тройку (остальные из нас обычно в джинсах и футболках), садится в первый ряд и весь день слушает сообщения каждого отдельного студента и постдока. Он никогда не комментирует, может даже задремать на минуту или две, но уважение, которое он оказывает своим присутствием каждому из его коллег, производит глубокое впечатление. Когда его очередь выступать, он встает и скромно представляет свои идеи или результаты. Он знает, что он на одинокой дороге, и я не удивлюсь, если его это обижает. Как может личность отказаться от мантии лидерства, вполне заслуженной, только потому, что он не может найти смысла в квантовой механике? Представьте, что это говорит о характере некоторых.

Далее имеется Роджер Пенроуз. Проще говоря, нет никого, кто бы внес б*о*льший вклад в наше понимание и использование ОТО, за исключением самого Эйнштейна, чем Роджер Пенроуз. Он является одним из четырех или пяти самых талантливых и глубоко оригинальных мыслителей, с кем я встречался в любой области. Он делал великую математику и великую физику. Подобно т'Хоофту, много его трудов в последние двадцать лет мотивированы его уверенностью, что квантовая механика неверна. И, подобно т'Хоофту, он имеет взгляды на то, что ее должно заменить.

Пенроуз доказывал в течение лет, что включение гравитации в квантовую теорию делает эту теорию нелинейной. Это приводит к разрешению проблемы измерения, в которой квантово-гравитационные эффекты заставляют квантовое состояние коллапсировать динамически. Предложения Пенроуза хорошо описаны в его книгах, хотя они до сегодняшнего дня не реализованы в детальной теории. Тем не менее, он и другие смогли использовать их, чтобы делать предсказания для выполнимых экспериментов, некоторые из которых в настоящее время проводятся.

Немногие из нас принимают аргументацию Пенроуза всерьез; и даже еще меньшее число убеждено в их обоснованности. Но большинство струнных теоретиков – и, определенно, все струнные теоретики генерального направления – не показывают признаков того, что они вообще о них слышали. Если даже большинство уважаемых провидцев не принимаются всерьез, как только они начинают подвергать сомнению базовые предположения, вы можете представить, насколько хорошо люди обходятся с теми, кто является пророком, но не был достаточно удачлив, чтобы сделать сначала значительные вклады.[142]

Если некоторые из лучших живущих физиков-теоретиков чувствуют необходимость сомневаться в основных предположениях относительности и квантовой теории, должны быть другие, которые пришли к этой позиции с самого начала. В самом деле, имеются люди, которые весьма рано в своих занятиях начали думать, что квантовая теория должна быть неверной. Они изучили ее, и они довели до конца ее доказательства и вычисления, точно так же, как и любой другой. Но они ей не поверили. Что происходит с такими?

Грубо имеются два вида таких людей: искренние и неискренние. Я являюсь одним из тех, кто никогда не находил способа поверить в квантовую механику, но я один из неискренних. То есть я рано понял в процессе моего образования, что я не смогу иметь достойную карьеру как академический физик-теоретик, если я сосредоточусь на попытках придать смысл квантовой механике. Так что я решил делать то, что генеральное направление могло бы понять и оценить достаточно хорошо, так что я смог совершить нормальную карьеру.

К счастью, я нашел способ исследовать мои сомнения по поводу оснований, работая в такой соответствующей генеральному направлению области как квантовая гравитация. Поскольку я, во-первых, не верил в квантовую механику, я был вполне уверен, что эти попытки приведут к неудаче, но я надеялся, что понимание неудачи могло бы обеспечить путеводную нить к тому, что должно заменить квантовую теорию. Несколькими годами ранее я смог бы быть немного счастлив в карьере, основанной на квантовой гравитации, как на чем-то, основанном на беспокойстве по поводу возможной неправильности квантовой механики. Однако, легкая благоприятная возможность открылась, когда я был аспирантом, и заключалась она в атаке на проблему квантовой гравитации с использованием недавних методов, разработанных для изучения стандартной модели. Так что я смог претендовать на вид физика нормальной науки и тренироваться как физик, занимающийся частицами. Затем я собрал то, что изучил, и применил это к квантовой гравитации. Поскольку я был среди первых, кто испробовал этот подход, и поскольку я использовал инструменты, которые были понятны лидерам генерального направления, это сделало возможным успешную, если не звездную, карьеру.

Но я никогда не смог бы полностью подавить инстинктивное желание исследовать основания моей темы. В 1982 я написал статью, озаглавленную «К взаимосвязи между квантовыми и тепловыми флуктуациями», которая, когда я смотрю на нее сегодня, кажется для меня невероятной по своей смелости.[143] Я задал новый вопрос по поводу того, как пространство, время и кванты подходят друг к другу – вопрос, который открыл целый новый путь поиска решения проблемы. Даже сегодня, после написания множества важных статей, я думаю, что это была моей лучшей. Всякий раз, когда я иногда встречаю студента, который вчитывается в основания предмета, или некоего одиночку, который десятилетиями отшельничает, они говорят «О, вы тот Смолин! Я никогда не проводил связи. Я думал, он должен был умереть или оставить физику». Теперь, наконец, вместе с моими коллегами по Пограничному институту я окончательно вернулся к работе над основаниями квантовой механики.

А как насчет искренних людей, которые не поверили в базовые предположения, вроде относительности и квантовой теории, и не имели достаточно покладистый характер, чтобы подавить свои склонности? Они особой породы, и каждый имеет историю для рассказа.

Джулиан Барбур известен многим, кто следит за наукой, как автор книги *Конец времени*, в которой он доказывает, что время является иллюзией.[144] Это необычный физик, который с момента получения докторской степени в 1968 в Университете Кёльна никогда не имел академической работы. Но он в высшей степени влиятелен среди небольшой группы людей, которые всерьез думают о квантовой гравитации, которых именно он научил, что означает делать фоново-независимую теорию.

Как рассказывает об этом Барбур, по пути вверх через аспирантуру его захватил взгляд, что время может быть иллюзией. Это привело его к исследованию корней нашего понимания времени, содержащихся в ОТО. Он понял, что он не сможет сделать обычную академическую карьеру, если будет беспокоиться о природе времени. Он также понял, что если он начнет работать над этой проблемой, он должен будет сконцентрироваться на ней полностью, не отвлекаясь на бремя нормальной карьеры в физике. Так что он купил старый фермерский дом в небольшом поселке в получасе от Оксфорда, перевез туда свою новую жену и сел думать о времени. Прошло десять лет или около того, прежде чем он смог сообщить что-нибудь обратно своим коллегам. В течение этого периода он и его жена нажили четверых детей, и часть времени он зарабатывал переводами, чтобы поддержать их. Переводы занимали у него не более двадцати часов в неделю, оставляя ему столько же времени для размышлений, сколько большинство академических ученых имеют после обязанностей по преподаванию, а администрация принимает к учету.

Чтобы овладеть смыслом времени в ОТО, Барбур глубоко вчитался в тему, проследив ее путь через историю физики и философии. Наконец, он смог изобрести новый вид теории, в которой пространство и время есть ни что иное, как система взаимосвязей. Его статьи по этой теме медленно начали замечаться, и в итоге он стал уважаемым членом сообщества квантовой гравитации. Его переинтерпретация ОТО Эйнштейна как относительной теории сегодня является способом, которым мы в нашей области понимаем ОТО.

Это далеко не все, что Барбур сделал, но этого достаточно, чтобы показать, насколько карьера успешного пророка отличается от карьеры обычного академического ученого. Такая личность не следует моде – фактически, вероятно, даже не следует области, достаточно известной, чтобы имелась мода. Подобные люди не управляются ничем, за исключением убеждений, приобретенных ранее, которые любой другой не сочтет за нечто важное. Их подход более энциклопедический, в котором, чтобы ясно думать, они прочитывают всю историю вопроса, который ими завладел. Их труд чрезвычайно сфокусирован, а еще им требуется длительное время, чтобы получить что-нибудь. В продвижении академической карьеры тут не имеется какого бы то ни было выхода. Джулиан Барбур, когда он был готов, изменил науку больше, чем большинство академических ученых, но в возрасте, когда большинство академических физиков вступают в должности, ему абсолютно нечего было показать из своей работы.

Карьера Барбура похожа на карьеры других пророков, вроде Чарльза Дарвина, который также удалился в английскую сельскую местность, чтобы найти помещение для раздумий над овладевшей им идеей. Эйнштейн потратил десять лет, размышляя над идеями, которые стали СТО, а затем потратил следующие десять, изобретая ОТО. Так что время и свобода мыслей – это все, что необходимо пророкам, чтобы найти неисследованное предположение. Остальное они сделают сами.

Другой такой личностью является Дэвид Финкельштейн, заслуженный профессор Института технологии Джорджии, который потратил всю свою жизнь на поиск логики природы. Он занимался физикой отличным от всех других способом. Трудом его жизни был поиск понимания, как он изложил, когда мы впервые встретились: «Как у божьей силы возникла мысль привести мир к существованию». Он никогда ничего не делал кроме этого, и в каждый момент нашей встречи он имел новые прозрения на этот счет. По пути возникло несколько побочных результатов. Он был первой личностью, которая поняла, что такое горизонт событий черной дыры.[145] Он был первый, кто открыл важные свойства физики твердого тела, называемые топологическими законами сохранения, и он также был первый в изучении различных математических структур – квантовых групп, например. Его жизнь служит примером диапазона вкладов, которые пророк может сделать во время следования своей собственной дорогой к истине. Несмотря на то, что Финкельштейн сделал академическую карьеру, может ли кто-нибудь, подобный ему, – кто-нибудь, кто прислушивается только к внутреннему голосу и игнорирует почти все остальное, – получить профессорство в наши дни в большом университете? Помечтайте.

Имеется другая история, более похожая на историю Барбура. Антони Валентини начал со студенческой степени в Кембридже, как и Барбур. Затем он несколько лет путешествовал по Европе, пока, наконец, не осел в Триесте, чтобы обучаться у Денниса Сиамы, который в Кембридже руководил обучением или подготовкой диссертаций Стивена Хокинга, Роджера Пенроуза, Мартина Риса, Джорджа Эллиса и некоторых других релятивистов и космологов. Позже в своей карьере Сиама переместился в Триест и основал астрофизическую группу в новом итальянском институте, названном SISSA (Scuola Internationale Superiore di Studi Avanzati – Высшая международная школа прогрессивных исследований). Валентини был одним из последних студентов Сиамы, и он не работал в астрофизике, вместо этого он занялся работой над квантовой теорией, основываясь на сильном ощущении, что она не имеет смысла. Он изучил старую идею, впервые разработанную Луи де Бройлем в 1920х, именуемую *теория скрытых переменных*, в соответствии с которой имеется единственная реальность, скрытая за уравнениями квантовой теории. Идея скрытых переменных десятилетиями подавлялась, – несмотря на поддержку Эйнштейна, Шредингера и других, – частично вследствие ложного доказательства, опубликованного Джоном фон Нейманом в 1932, что такие теории не могут существовать. Ошибка была, наконец, вскрыта в начале 1950х квантовым теоретиком Дэвидом Бомом, который затем пересмотрел теорию де Бройля. Валентини сделал новую и очень важную модификацию теории скрытых переменных, первое усовершенствование теории за десятилетия. Большинство его статей на эту тему были отвергнуты физическими журналами, но их содержание сегодня широко признано среди специалистов, которые работают над основаниями квантовой механики.

Сиама сделал все, что мог, чтобы поощрить и помочь Валентини, но не было академических позиций, доступных как в Италии, так и в англо-говорящем мире для того, чья работа была сосредоточена на фундаментальных проблемах. Сиама посоветовал Валентини, что если ему не удается опубликовать свой растущий объем результатов в журналах, он должен написать книгу о них. Не имея должности, Валентини

переехал в Рим, где, наконец, закрепился в качестве постдока в Университете Рима. Когда это прошло, он остался в Риме еще на шесть лет, влюбившись в город и одну из его обитательниц, поддерживая себя частными уроками и, тем временем, развивая свою теорию и занося результаты в свою книгу.[146]

Хотя многие ведущие физики признают в частном порядке опасения по поводу квантовой механики, их публичная позиция такова, что ее проблемы были решены в 1920е. Научной оценки более поздних работ по ее основаниям не существует, но я знаю, что со времен, по меньшей мере, 1950х ведущие журналы только очень выборочно публикуют статьи на эту тему, одновременно некоторые журналы установили политику исключения таких статей. Субсидирующие организации и главные правительственные фонды обычно не поддерживают эту работу,[147] департаменты университетов склонны не предлагать работу людям, которые занимаются этой темой.

Это общее упрямство частично является результатом перехода от революционной науки к нормальной науке в 1940е. Как и в политической революции, мятежи подавляются, если революция консолидирует свои достижения. В ранние годы было несколько соперничающих взглядов и идеологий по поводу интерпретации квантовой теории. К 1940м одна идеология победила. Из уважения к лидерству Нильса Бора она была названа *Копенгагенской интерпретацией*. Бор и его последователи приняли участие в прекращении дебатов, и я был бы не удивлен, узнав, что они использовали рычаги академической политики, чтобы сделать это; с учетом их участия в изобретении ядерного оружия они определенно имели хорошие шансы на успех. Но даже те, кто не заботился об идеологии, а хотел только приблизить ход нормальной науки, имели мотивы, чтобы придушить дебаты по этой теме. Квантовая теория достигла великих успехов с практической и экспериментальной стороны, и те, кто выковал эти успехи, не захотели озаботиться ноющими сомнениями тех, кто продолжал беспокоиться, что имеются глубокие проблемы с тем, как теория была сформулирована и интерпретирована. Пора было идти дальше.

У тех, кто упорно продолжал сомневаться, было несколько выборов. Некоторые переквалифицировались в философов и стали публиковать длинные ученые рассуждения в философских журналах. Они создали небольшую субкультуру, которая, по меньшей мере, поддерживает дебаты в живых. Немногие, кто имел математический талант, получили работу в математических департаментах, где они публикуют формальные строгие труды по альтернативам к общепринятой формулировке квантовой механики. Другие – кое-кто из лучших людей в указанной области – нашли профессорство в небольших колледжах, где вам не было необходимости получать исследовательские гранты. Некоторые другие сделали физические карьеры, основываясь на работе в других областях, и время от времени работали над квантовой механикой в качестве некоторой разновидности хобби.

Одним их таких «хоббитов» был Джон Стюарт Белл, который открыл в начале 1960х ключевую теорему по поводу теорий со скрытыми переменными. Он построил свою карьеру на хорошей работе в физике частиц, но сегодня, через несколько лет после его смерти ясно, что его самым важным вкладом была его работа по квантовой теории. Белл временами цитируется как говоривший, что необходимо было делать нормальную науку и только 10 процентов своего времени тратить на озабоченность по поводу квантовой теории. Когда появилось это изречение, мой коллега по Пограничному институту Люсьен Харди попытался порассуждать на тему, насколько больший вклад в науку мог бы внести Белл, если бы он больше времени уделял той области, где он оказал наибольшее влияние, – за исключением того, что тогда он, вероятно, совсем не имел бы работы.

Не удивительно, что в течение этого периода в основаниях квантовой механики был сделан минимальный прогресс. И как могло быть иначе? Конечно, часто находились достаточные основания, чтобы не приглашать на работу, не финансировать или не публиковать тех немногих людей, кто делал прогресс.

Теперь мы знаем, насколько не правы были скептики. Около двадцати лет назад Ричард Фейнман и некоторые другие поняли, что мы могли бы сделать новый вид компьютеров с существенным использованием квантовых явлений. Предложение почти совершенно не исследовалось до более детального плана квантового компьютера, которое было сделано в 1985 Дэвидом Дойчем, в настоящее время работающим в Центре квантовых вычислений в Оксфорде.[148] Нет более основательного

мыслителя, чем Дойч; он был мотивирован на изобретение квантовых компьютеров своей тревогой по поводу фундаментальных проблем как в математике, так и в квантовой теории. Истинно оригинальным и ясным мыслителем он выступил в своей провокационной книге *Ткань реальности*,[149] в которой он детально обдумал свои много-мировые теории. Я не согласен со многим из того, что он пишет, но я люблю эту книгу.

В 1994 Петер Шор из Массачусетского технологического института, который тогда был ученым по компьютерам в Лаборатории Белла, нашел замечательный результат, что достаточно большой квантовый компьютер мог бы быть в состоянии взломать любой существующий шифр [150]. С тех пор в область квантовых вычислений полился поток денег, поскольку правительства не хотели быть последними, чтобы их шифры взломали. Эти деньги поддержали новое поколение молодых, очень умных ученых – физиков, компьютерщиков и математиков. Он создали новую область на стыке физики и компьютерной науки, важная часть из которой содержит переосмысление оснований квантовой механики. Неожиданно квантовые вычисления стали горячей областью с большим количеством новых идей и результатов. Некоторые из этих результатов имеют отношение к основаниям, и многое могло бы быть открыто в любой момент с 1930х. Это ясный пример того, как подавление области исследований академической политикой задерживает прогресс на десятилетия.

В 1999 после семи лет изоляции в Риме Антони Валентини вернулся назад в родительский дом в Лондоне. Его семья эмигрировала из небольшой деревни в Аббруззо; они приобрели маленький магазин и были готовы поддержать его в его работе, пока это возможно. Я встретился с ним в этот год, когда я был приглашенным профессором в Империал колледже, и после обсуждения с Кристофером Исхамом, возглавляющим здесь теорию групп, мы решили предложить ему постдока и привести его обратно в науку. Мы смогли сделать это, поскольку я имел неожиданную и щедрую поддержку от донора, который оказался озабоченным основаниями квантовой механики. Я чувствовал, что поддержка Валентини как поддержка одного из немногих людей, которая обеспечивает, что он мог бы сделать вклад в новые и важные результаты в данной области, приведет к тому, что деньги будут хорошо использованы. Если бы я поддерживался только средствами от Национального научного фонда, я не смог бы сделать это. Как ни щедр был Национальный научный фонд по отношению ко мне в моей работе по квантовой гравитации, разделение гранта с постдоком, работающим над основаниями квантовой теории, могло бы испортить шансы финансирования в будущем.

Сейчас Валентини присоединился к нам в Пограничном институте. Он все еще работает над своей книгой по скрытым переменным, но, тем временем, он стал ведущей фигурой в области оснований квантовой теории, приглашенным спикером на многих конференциях по этой теме. Сейчас он публикуется регулярно, и его самая недавняя работа касается нового смелого плана тестирования квантовой механики с помощью наблюдения рентгеновских лучей, которые возникают вблизи черных дыр.[151] Подобно Джулиану Барбуру, годы его изоляции позволили ему заняться научным самообразованием, и сейчас нет более проницательного или компетентного критика во всей области квантовой теории.

Вспомним, почему Барбур и Валентини не смогли бы ничего совершить, если бы они пытались получить обычную академическую карьеру. В течение этапа, когда обычно становятся доцентами или адъюнкт-профессорами*, тяжело работая, чтобы опубликоваться и получить достаточную известность, чтобы выиграть приглашения и исследовательские гранты, необходимые для получения должности, они ничего не публиковали. Но они совершили великое дело. Они думали, причем более глубоким и сфокусированным образом, чем это может делать доцент, над единственной упрямой основополагающей проблемой. Когда они проявились, грубо через десять лет, каждый имел проработанную, оригинальную и сложившуюся точку зрения, которая и привела к тому, что они быстро стали влиятельными. Авторитет, заработанный за счет прошедших лет концентрированного изучения и обдумывания, и представленный в виде

---

* Основным отличием полного (full) профессора от адъюнкт- (associate) профессора в американской академической практике является то, что у первого есть штатная должность, бессрочный контракт (tenure), а у второго этот контракт временный. – *(прим. перев.)*

кое-чего нового и важного, сделал их необходимыми для людей, которые заботятся об этих проблемах.

Для пророков необходимость быть в одиночестве в течение продолжительного периода в начале карьеры и часто в последующие периоды является важной. Александр Гротендик называется некоторыми самым влиятельным и провидческим из ныне живущих математиков. Он имел самую необычную карьеру. Некоторые из его главных вкладов, которые были плодотворны, никогда не публиковались, но рассылались почтой – в форме писем на сотнях страниц длиной, которые посылались друзьям, а затем передавались из рук в руки среди небольших кружков людей, которые смогли бы прочитать их. Его родители были беженцами от политических репрессий и войны; он вырос в лагере беженцев после Второй мировой войны. Он возник в математическом мире Парижа как будто из ниоткуда. После короткой, но экстраординарно важной карьеры он почти совершенно отошел от научной жизни в 1970е, по крайней мере, частично, поскольку он отвергал военное финансирование для математики. Он совсем исчез в 1991, и хотя молва говорит, что он живет как отшельник в Пиринеях, его местонахождение все еще не определено. Ясно, он представляет собой экстремальный случай. Но вы должны были бы видеть выражение восхищения, удивления и, возможно, даже смятения на лицах некоторых очень хороших математиков всякий раз, когда возникало его имя. Вот как он описывает некоторые из своих ощущений:

"В те критические годы я научился, как быть одному. [Но даже] эта формулировка на самом деле не ухватывает вкладываемого мной смысла. Я не учился в любом буквальном смысле быть одному по простой причине, что это знание никогда не забывалось во время моего детства. Это основная способность всех из нас со дня нашего рождения. Однако эти три года работы в изоляции [1945-1948], когда я полагался на мои собственные ресурсы, следуя руководящим указаниям, которые я себе спонтанно придумал, привили мне высокую степень убежденности, все еще скромно продолжающейся, в моей способности делать математику, которая не обязана никакому консенсусу или моде, которая принимается как закон. ... Этим я намерен сказать: добиваться моим собственным путем вещей, которые я хотел изучить, вместо того, чтобы полагаться на понятие консенсуса, публичного или подразумеваемого, который происходит от более или менее широкого клана, членом которого я себя считаю, или который по любой другой причине накладывает утверждения, которые принимаются как авторитетные. Этот молчаливый консенсус сообщал мне как в лицее, так и в университете, что не нужно беспокоиться, заботясь о том, что на самом деле подразумевается, когда используется термин, подобный «объему», который «явно самоочевиден», «общеизвестен», «не проблематичен» и т.д. ... В самом этом действии «выхода за пределы» есть нечто, что вместо обеспечения консенсуса означает отказ стоять в жестком круге, который очертили другие вокруг тебя, – в этом одиночном акте есть то, что ты находишь правильным творчеством. Все другие вещи следуют как должное.

С тех пор в мире математики, который приветствует меня, я получил шанс встретиться с некоторым количеством людей, как среди более старших, так и среди более молодых в моей общей возрастной группе, которые были намного более выдающимися, намного более «одаренными», чем был я. Я восторгался легкостью, с которой они, будто играя, улавливали новые идеи, жонглировали ими, как если бы они были привычны с колыбели, – в то время как я сам чувствовал себя неловким, даже туповатым, мучительно взбираясь на крутой путь, подобно глупому быку, стоящему перед аморфной горой вещей, которые я изучил (так я был убежден), вещей, сущность которых я себя чувствовал неспособным понять или проследить до конца. На самом деле ко мне мало относится то, что определяет тип яркого студента, который побеждает в престижных соревнованиях или осваивает, почти с помощью ловкости рук, большинство неприступных тем.

Фактически, большинство из тех приятелей, которых я оцениваю как более выдающихся, чем я, двигались в направлении, чтобы стать знаменитыми математиками. Однако с точки зрения тридцати или тридцатипятилетнего возраста я могу констатировать, что их вклад в математику нашего времени не был очень глубоким. Они все имеют сделанные вещи, часто превосходные вещи в рамках того, что уже было установлено до них и что они не имели склонности нарушать. Не зная этого, они остались узниками тех невидимых и деспотических кругов, которые ограничивают вселенную определенной средой данной эпохи. Чтобы разбить это границы, они должны были бы открыть в себе заново ту способность, которая дана им с

рождения, как это было со мной: способность быть одному." [152]

Является штампом вопрос о том, мог бы молодой Эйнштейн получить сегодня приглашение на работу в университете. Ответ, очевидно: нет; он не получил приглашение на работу даже тогда. Сегодня мы намного более профессионализированы, и приглашение на работу основывается на обязательном соревновании среди людей, в высшей степени подготовленных в узком техническом мастерстве. Но из некоторых других, о ком я упомянул, каждый не смог получить работу. Если мы имеем вклад этих людей, это происходит вследствие их великодушия – или, может быть, их настойчивости – в продолжении работы без поддержки академического мира, обычно предоставляемой ученым.

На первый взгляд, это могло бы показаться легко исправимым. Имеется не очень много таких людей, и их не трудно распознать. Немногие ученые думают о фундаментальных проблемах, и даже еще меньше имеют идеи по их поводу. Мой друг Стюарт Кауффман, директор Института сложных биосистем и информатики в университете Калгари, как-то раз сказал мне, что не трудно различить людей со смелыми идеями – они почти всегда уже имеют, по меньшей мере, несколько таких идей. Если у них нет никаких идей к окончанию аспирантуры или несколькими годами позже, этого, вероятно, не произойдет никогда. Так как вам отличить пророков, которые имеют хорошие идеи, от других, которые пытаются, но еще не имеют? Это достаточно легко. Просто спросите более старых пророков. В Пограничном институте у нас нет проблем в выявлении немногих молодых, которые достойны внимания.

Но раз уж эти люди идентифицированы, с ними нужно иметь дело отличным образом от тех, кто делает нормальную науку. Большинство из них не интересуется тем, кто более талантлив или кто быстрее решает проблемы, представленные генеральным направлением нормальной науки. И если они пытаются соревноваться, учитывая, насколько жесткие соревнования, они могут потерпеть неудачу. Если они и соревнуются с кем-нибудь, так это с последним поколением революционеров, которые говорят с ними со страниц старых книг и статей, которые никто другой никогда не читает. Имеется очень мало внешнего, которое их ведет; они сфокусированы на противоречиях и проблемах науки, которые большинство ученых предпочитают игнорировать. Если вы ждете пять лет или даже десять, они не выглядят хорошо подходящими к обычным критериям. Вы можете не паниковать, но вы должны оставить их в покое. В конце концов, подобно Барбуру и Валентини, они проявятся с чем-то, что достойно ожидания.

Так как таких людей немного, должно быть не трудно выделить для них место в академии. В самом деле, вы могли бы подумать, что многие институты, колледжи и университеты должны были бы быть счастливы иметь таких людей. Поскольку они ясно мыслят об основаниях своих предметов, они часто являются хорошими, даже харизматическими преподавателями. Ничто так не воодушевляет студентов, как пророк в состоянии вдохновения. Поскольку они не соперничают, они являются хорошими советниками и наставниками. Наконец, разве главное дело колледжей и университетов не заключается в обучении?

Конечно, имеется реальный риск. Некоторые из них не откроют ничего. Я говорю в терминах вклада реального времени жизни в науку. Но тогда большинство академических ученых, хотя они и преуспели с точки зрения карьеры, – получают гранты, публикуют массу статей, посещают множество конференций и так далее – делают вклад только в разрастание науки. По меньшей мере, половина наших коллег в теоретической физике не смогли сделать однозначного или по-настоящему устойчивого вклада. Имеется разница между хорошей карьерой и важной карьерой. Если бы они делали в своей жизни что-то другое, наука двигалась бы почти так же. Так что это риск в любом случае.

Природа и цена различных видов риска являются проблемами, которые бизнесмены понимают лучше, чем академические администраторы. Намного легче получить полезное и правдивое общение по этому поводу с бизнесменами, чем с академиками. Я однажды спросил успешного венчурного капиталиста, как его компания решает, насколько велик риск, чтобы принять его. Он сказал, что если более 10 процентов компаний, которые он профинансировал, делают деньги, он знает, что он не принял достаточного риска. Что понимают эти люди, и живут в соответствии с этим, это что вы получаете в целом максимальный

возврат, который обеспечивает максимальный темп технологического прогресса, когда 90 процентов новых компаний терпят неудачу.

Я выражаю пожелание, что я мог бы честно поговорить по поводу риска с Национальным научным фондом. Поскольку я уверен, что 90 процентов грантов, которые они выдают в мою область деятельности, пропадают впустую, когда это измеряется в соответствии с реальным стандартом: приводят ли эти гранты к прогрессу в науке, который бы не произошел, если бы финансируемая персона не работала в этой области?

Как знает каждый хороший бизнесмен, имеется различие между стратегиями с низким риском/низкой отдачей и с высоким риском/высокой отдачей, возникающая из того факта, что вы составляете планы с различными целями в уме. Когда вы хотите вложиться в авиаперевозки, или в автобусную систему или в производство мыла, вы хотите первого. Когда вы хотите развивать новые технологии, вы не можете преуспеть без второго.

Что я мог бы предложить университетским администраторам, это подумать в этих терминах. Они устанавливают критерии приглашения на работу, продвижения и назначения на должности, как если бы существовали только нормальные ученые. Нет ничего проще, чем просто немного изменить критерии, чтобы признать, что имеются и другие типы ученых с другими типами талантов. Вы хотите революции в науке? Делайте то, что делают бизнесмены, когда они хотят технологической революции: просто слегка измените правила. Пропустите несколько революционеров. Сделайте иерархию немного более плоской, чтобы дать молодым людям больше простора и свободы. Создайте некоторые благоприятные возможности для людей с высоким риском/высокой отдачей, чтобы сбалансировать гигантские инвестиции, которые вы делаете в низкорисковую, [экстенсивно] увеличивающуюся науку. Технологические компании и инвестиционные банки используют эту стратегию. Почему не попытаться сделать это в академии? В качестве отдачи будет открытие того, как работает вселенная.

19. Как на самом деле работает наука

Идея изменения способа, которым наука делается в университетах, вне сомнения, будет привлекательна для некоторых, хотя и ужаснет других. Но, вероятно, нет опасности, что это произойдет. Чтобы объяснить, почему, нам нужно проинспектировать темные узкие места академической жизни. Поскольку, как говорят нам социологи, это не только касается мудрости, это касается власти: кто ее имеет и как она используется.

Имеются определенные свойства исследовательских университетов, которые препятствуют изменениям. Первым является *смотр равных*, система, в которой решения по поводу ученых принимаются другими учеными. Точно подобно системе постоянных должностей, смотр равных имеет преимущества, которые объясняют, почему имеется общая уверенность, что он важен для хорошей науки. Но имеется цена, и мы должны быть осведомлены о ней.

Я уверен, что усредненная личность понятия не имеет, сколько времени академики тратят на принятие решений по поводу приглашения на работу других академиков. Я тратил грубо пять часов в неделю в комитетах, обсуждая карьеры других людей или составляя письма, которые должны быть прочитаны такими комитетами. Я занимался этим некоторое время. Это является значительной частью работы профессора, и многие известные мне профессора тратили на это больше времени, чем я. Одна вещь несомненна: если вы не сбиваете с толку очевидной демонстрацией безответственности или не оказываетесь слишком непредсказуемым или слишком ненадежным, чем дольше вы являетесь ученым, тем больше времени вы будете тратить, вмешиваясь в карьеры других ученых. Дело не просто в том, что у вас будет больше и больше студентов, постдоков и сотрудников, для которых нужно писать письма; вы также

будете вовлечены в принятие решений о приглашении на работу в других университетах и институтах.

Изучал ли когда-либо кто-нибудь в администрации, сколько стоит нам эта система? На самом ли деле она необходима? Не могли бы мы тратить меньше времени на это и иметь больше времени на науку и преподавание? Я получил только первое знакомство с системой, и она приводит в уныние. Ни один департамент или институт при желании не может пригласить на работу никого без консультаций с сетью выездных и совещательных комитетов, укомплектованных более старыми влиятельными учеными из других институтов. Здесь также имеются группы специалистов, установленных фондирующими организациями в Соединенных Штатах, Канаде, Европе и по всему земному шару. Далее имеются все неформальные контакты, телефонные звонки и переговоры, в которых вас просят откровенно и конфиденциально оценить списки кандидатов. После определенного момента успешный ученый мог бы легко потратить все его или ее время на политику того, кто где получил работу.

Это и называется смотром равных. Это забавное название, поскольку оно поразительно отличается от понятия жюри равных присяжных, которое означает, что вы судитесь людьми, почти такими же как вы сами, которые, вероятно, честны и объективны. Имеются реальные наказания – тюрьма – для тех присяжных, кто утаивает предвзятость.

В академическом мире за некоторыми исключениями оценивающие вас люди старше вас и более влиятельны. Это верно на всем пути вверх по лестнице с первого курса вашего колледжа до ваших заявлений на получение грантов, когда вы профессор. Я не хочу дискредитировать тяжелую работу, которая делается столь многими при обслуживании смотра равных. Большинство делает ее честно. Но со смотром равных связаны большие проблемы, и они важны для состояния физики сегодня.

Неумышленным побочным продуктом смотра равных является то, что он легко может стать для более старых ученых механизмом навязывания направления более молодым ученым. Это настолько очевидно, что я удивлен тем, как редко это обсуждается. Система настроена так, что мы, более старые ученые, можем вознаградить тех, кого мы расценим подходящими для хорошей карьеры, и покарать тех, кого мы оценим как неподходящих, через высылку из научного сообщества. Это могло быть прекрасно, если бы существовали ясные стандарты и ясная методология обеспечения нашей объективности, но, по меньшей мере, в той части академии, где я работал, нет ни того, ни другого.

Как мы детально обсуждали, различные типы ученых делают вклад в теоретическую физику, и все они имеют различные сильные стороны и слабости. Однако имеется весьма малое признание этого; напротив, мы говорим просто о тех, кто «хорош», и тех, кто «не хорош» – то есть смотр равных основывается на упрощающем и, очевидно, неправильном предположении, что ученые могут быть ранжированы как на лестнице.

Когда я читал мою первую группу рекомендательных писем в качестве нового доцента в Йейле в 1984, я не мог в это поверить. Хотя хорошее письмо может передать много информации и даже попытаться отметить некоторые тонкости, много внимания уделялось заключительному параграфу, который обычно предлагал сравнительное ранжирование кандидатов: «X лучше, чем A, B и C, но не столь хорош, как E, F, G и H». Я прочитал до настоящего времени тысячи рекомендательных писем, и, по меньшей мере, половина содержит некоторую версию этого высказывания. В ранние годы было несколько случаев, когда я был персоной A, B или C. Я вспоминаю согласие, что кандидат X на самом деле был лучше, чем был я, – и, фактически, многие из таких X-ов очень хорошо продвинулись вперед. Но я не был бы удивлен, если бы исследование показало, что такие ранжирования в среднем являются скверными предсказаниями подлинного успеха в науке. Если мы в самом деле заинтересованы в том, чтобы сделать хорошие приглашения на работу, мы должны были бы проводить такие исследования. Определенно, нет и немногих случаев, когда высоко ранжированный постдок или доцент не достиг бы большего и не получил бы должность.

Что делает эту практику даже еще более проблематичной, так это то, что не имеется санкций за предвзятость. Профессор бесстыдно напишет письма, тенденциозные в отношении его или ее собственных

студентов или в пользу людей, которые следуют его или ее отдельной исследовательсвой программе, или даже в пользу людей одной с ним или с ней национальности. Мы можем заметить эти на самом деле вопиющие случаи (и посмеяться над ними), но никто не думает о них как о необычных. Это просто часть системы.

Есть базовое правило для предсказания типа молодого ученого, которого старшие ученые будут рекомендовать. Напоминает ли молодой ученый их самих? Если вы видите более молодую версию себя в X, тогда X на самом деле должен быть хорош. Я знаю, я сам виноват в таком, потому и говорю так откровенно. Если вы хотите пригласить на работу больше таких людей, как я, я замечательно распознаю их. Если вы хотите провести тонкие различия между людьми, сильно от меня отличающимися, которые хороши в вещах, в которых я не столь хорош или которые я не ценю, не доверяйте моему суждению.[153]

Даже для тех из нас, кто старается быть честным, нет правил или подготовки к тому, как быть объективным. Я никогда не дал бы никакого совета по поводу того, как писать или интерпретировать рекомендательные письма, а также я никогда не видел руководства по тому, как распознать признаки предубеждения или стереотипного подхода в вашем собственном или в других взглядах. Я состоял во многих комитетах по приглашениям на работу, назначениям на должности или продвижениям, но меня никогда не инструктировали, как инструктируют присяжных, о том, как лучше рассмотреть свидетельства.

Однажды на званом обеде я спросил людей из других областей работы, не готовились ли они к подобным вещам. Каждый, кто не имел отношения к академии, но кто отвечал за приглашение на работу или надзор за другими людьми, получили несколько дней тренировок в распознавании и борьбе с признаками нечестности или предубеждения, в снижении эффектов иерархии и в поощрении разнообразия и независимости мнений. Они знали все по поводу «учета всех голосов в вашей организации» или получения «всестороннего взгляда на кандидатов на работу» путем поиска оценок от людей, которыми руководили кандидаты, а также от людей, которые руководили кандидатами. Если юристы, банкиры, телевизионные продюсеры и редакторы новостных изданий полагают необходимым управление тем, как принимаются разумные и честные персональные решения, почему мы, академические ученые, полагаем, что мы можем делать это автоматически?

На самом деле все даже хуже. За фасадом формальных рекомендательных писем имеется сеть конфиденциального, неформального общения экспертов: «Что вы думаете об этом и этом? Кого, как вы думаете, мы должны пригласить на работу?»

Эти общения откровенны. Забрала подняты. И это не совсем плохо. Многие люди пытаются ответить на вызов и быть полезными, но средний уровень объективности шокирующе низок. И особенно, здесь не имеется цены, которую нужно заплатить за использовение системы в пользу ваших друзей или студентов ваших друзей. Для определенных экспертов является нормальным проталкивать их собственных студентов и постдоков, необоснованно превознося их по сравнению с другими, особенно студентами конкурентов.

Даже в этих откровенных обменах [мнениями] вы редко слышите на самом деле отрицательные комментарии. Когда люди не имеют сообщить ничего хорошего, они часто просто говорят: «Давайте двигаться дальше. Я, пожалуй, не имею комментариев» или что-то умеренное вроде «Я не впечатлен». Но имеются времена, когда простое упоминание имени вызывает «Абсолютно нет!» или «Ни в коем случае» или «Вы смеетесь?» или определенное «Через мой труп!» По моему опыту в каждом таком случае кандидат попадает в одну или, чаще, в две из следующих трех категорий: Он (1) женщина, (2) не белый и/или (3) кто-то придумал его или ее исследовательскую программу, вместо того, чтобы следовать генеральному направлению. Конечно, имеются и женщины и не белые, которые не вызывают возражений. Но, еще раз по моему опыту, это случаи, где кандидаты строго соответствуют установленной исследовательской программе.

Между физиками имеются горячие споры о том, почему в физике немного женщин или черных по сравнению с другими областями, столь же многообещающими, такими как математика или астрономия. Я уверен, что ответ простой: вульгарное предубеждение. Любой, кто, как я, десятилетиями участвовал в

комитетах по приглашению на работу и не увидел неприкрытого предубеждения в их действиях, или слепой или нечестный. Имеются правила и этика конфиденциальности, которые не дают мне привести примеры, но имеется несколько детальных исследований, которые рассказывают ту же историю.[154]

Возможно, нужно ожидать, что предубеждение свирепствует в этой области. Сколько ведущих физиков-теоретиков были однажды сомневающимися, маленькими, прыщавыми мальчиками, которые получили свою возможность стать лучше крепких парней (на которых обращали внимание девочки) в единственном месте, где смогли бы, – в математическом классе? Я был одним из них, по меньшей мере, пока не понял то, что знали все крепкие парни, – что все это касается самоуверенности. Но я все еще вспоминаю ощущения зубрилы по поводу моих способностей в алгебре, и могу сообщить, что, по крайней мере, для меня, идентификация математического мастерства с мужественностью зашла очень глубоко. Но тогда почему женщины имеют меньше трудностей в приглашении на работу как чистые математики, чем как физики? Потому, что в математике яснее, когда вы сделали что-то хорошее. Теорема или доказана или не доказана, в то время как рассуждения, которые идут по поводу ранжирования теоретических физиков, намного более расплывчаты, что дает больше места для предубеждений. Например, не всегда легко отличить хорошего теоретика от того, кто просто напорист. Заметим, что хотя всегда имеется много талантливых женщин-музыкантов, число женщин, приглашенных на работу оркестрами, существенно возрастало, когда кандидаты начинают прослушиваться из-за экрана.

Именно поэтому имеются позитивные действия*. По всему моему опыту я никогда не видел женщины или афро-американца, приглашенного на работу через программу позитивных действий, которые бы сильно этого не заслуживали – то есть, которые бы уже не были, бесспорно, лучшими кандидатами. Когда комитеты по приглашению на работу не будут больше составляться только из белых людей и мы прекратим слышать выражения открытых предубеждений, тогда мы сможем смягчить позитивные действия. В существующем положении, люди, которые сильно отличаются, – которые по той или иной причине создают влиятельным старым физикам мужского пола дискомфорт, – приглашаться на работу не будут. Имеются позитивные действия для людей, которые, очевидно, отличны, подобно женщинам или черным. Но как насчет людей, которые просто *думают* иначе – кто отвергает подходы генерального направления в пользу своих собственных идей? Для них тоже должны быть позитивные действия?

---

* То есть специальные меры, принимаемые для борьбы с дискриминацией такого рода. – *(прим. перев.)*

Большинство из нас принимает участие в смотре равных с лучшими намерениями выбирать этично и объективно. И когда все остальные таковы, выбирается наиболее достойный кандидат. То есть, когда вы получаете для сравнения белых людей одного возраста и подготовки, которые все участвуют в одной исследовательской программе, система будет в целом отбирать тех, кто более талантлив и более напряженно работает. Но проблема в том, что вы должны очень много просеять, прежде чем вы достигнете точки, когда исходные позиции равны. До этой точки процесс политический. Это главный механизм, с помощью которого более старые и влиятельные ученые оказывают давление на более молодых ученых.

Это способствует процессу навязывания консенсуса, в котором более старые ученые обеспечивают, что более молодые ученые последуют их направлениям. Имеются некоторые простые пути, с помощью которых оказывается это давление. Например, от кандидата на место в профессорско-преподавательском составе требуют письма от очень большого числа людей, которые более влиятельны, чем кандидат. Одно не столь положительное письмо обычно убивает назначение на должность. Когда я впервые столкнулся с этим избытком рекомендательных писем, я был озадачен. Определенно, вы могли бы получить хорошее представление о кандидате из трех или четырех писем. Почему высоко престижные университеты часто требуют десять или пятнадцать?

Одна причина в том, что цель не только пригласить на работу хороших ученых. Комитеты по приглашению на работу, председатели собраний и деканы часто имеют в уме другую цель, которая заключается в повышении (или, в счастливых случаях, сохранении) статуса департамента. Для этого я имею в виду нечто

более весомое, чем обещания молодых ученых, для измерений статуса, даваемого численным ранжированем. Это делается внешними оценщиками, которые объединяют свои представления с многими другими, вроде общего грантового финансирования и количества цитирований. Председатели департаментов и деканы должны иметь отношение к этому, поскольку эти вещи имеют жесткие финансовые последствия, касающиеся их собственных карьер как администраторов. Это, прежде всего, важно для приглашения на работу людей, которые, вероятно, выиграют щедрую грантовую поддержку. Это немедленно дает предпочтение участникам больших установленных исследовательских программ перед инициаторами новых программ. Запрашивая много писем, вы можете измерить, насколько хорошо потенциал приглашаемых уже воспринят старшими учеными, которые имеют значение. Цель, таким образом, не пригласить на работу ученых, которые вероятнее всего сделают хорошую науку, а пригласить ученых, приобретение которых оптимизирует статус департамента в короткой перспективе. Поэтому комитеты по приглашению на работу не мучаются по поводу долгосрочных проблем, вроде тех, что кандидаты должны, вероятнее всего, иметь оригинальные идеи, которые будут иметь значение на сроке лет двадцать. Вместо этого, они хотят знать, что десять или пятнадцать старших ученых думают, что кандидат является членом их сообщества с высоким статусом.

Но чтобы добыть такое большое число положительных писем, вы должны быть частью большой исследовательской программы. Если вы находитесь в маленькой программе с меньшим, чем десять, числом старших людей, чей статус позволяет оценить вас, вы можете долго просить оценки у людей, которые не согласны с тем, что вы делаете, или чья программа находится в конкуренции с вашей. Так что безопасность только в количестве. Не удивительно, что большие исследовательские программы доминируют!

Нет сомнений, что эта система благоприятствует теории струн и создает больше трудностей для людей, которые заняты в альтернативных исследовательских программах. Как отмечалось в недавней статье в *Нью-Йорк Таймс*, «Ученые должны еще разработать больше, чем фрагменты того, что, как они считают, будет, в конце концов, полной теорией. Тем не менее, струнные теоретики уже собрали прибыль, которая обычно идет экспериментально успешным победителям, включая федеральные гранты, престижные премии и должности в профессорско-преподавательском составе». Дэвид Гросс, в настоящее время директор Института теоретической физики Кавли в Калифорнийском университете в Санта Барбаре, цитировался в той же самой статье так: "В настоящее время, если вы отчаянный молодой струнный теоретик, вы добились успеха."[155]

Моя цель здесь не критиковать теорию струн; струнные теоретики просто ведут себя так, как вели бы себя члены любой доминирующей исследовательской программы. Проблема в том, что мы имеем в академии систему принятия решений, которая слишком уязвима по отношению к попаданию под контроль агрессивно продвигаемой исследовательской программы независимо от ее результатов. Та же система однажды работала против струнных теоретиков. Как отметил журналист Гэри Таубес,

"В 1985, 4 августа я сидел в итальянском винном магазине в ЦЕРНе и пил пиво с Альваро де Руджулой. ... Де Руджула предсказал, что 90 процентов теоретиков будут работать над суперструнами и связью с суперсимметрией, поскольку это модно. Когда он намекнул, что это не здоровое состояние, я спросил его, над чем бы он предпочел работать.

Вместо того, чтобы ответить прямо, он уклонился. "Необходимо помнить," – сказал мне Де Руджула, – «что два человека, наиболее ответственных за развитие суперстурн, а именно Грин и Шварц, потратили от десяти до пятнадцати лет, систематически работая над тем, что не было модным. Фактически, они высмеивались людьми за их упрямую приверженность этому. Так что когда люди приходят и пытаются убедить вас, что надо работать над самой модной темой, уместно вспомнить, что великие шаги всегда делаются теми, кто не работает над самой модной темой.»." [156]

Как-то раз я обсудил ситуацию с председателем департамента в крупном университете, который пожаловался, что он был не в состоянии убедить своих коллег пригласить на работу Джона Шварца в начале 1980х. "Они соглашались, что он был невероятно умным теоретиком," – сказал мой собеседник, – «но я не смог убедить их, поскольку они говорили, что он слишком увлечен и, вероятно, никогда не будет

работать ни над чем, кроме теории струн. Сегодня я не могу убедить моих коллег пригласить на работу кого-нибудь, кто *не является* струнным теоретиком».

Я также вспоминаю обсуждение этих проблем с Абрахамом Паисом, физиком, занимавшимся частицами, и биографом Бора и Эйнштейна. Мы иногда использовали для встреч обеденное время в университете Рокфеллера в Нью-Йорке, где он был профессором, а я одно время имел офис. Паис сказал мне: «Вы ничего не можете сделать. В мои дни тоже все они были ублюдками!»

Я думаю, Паис был далеко от цели. Речь не идет о людях, речь идет о том, как мы структурировали академическое принятие решений. Речь идет об обеспечении того, чтобы типы ученых, необходимых для продвижения науки, имели необходимые благоприятные возможности.

Эта система имеет и другое решающее следствие для кризиса в физике: люди с впечатляющей технической подготовкой и отсутствием идей выбирают людей с идеями, подобными их собственным, частично потому, что просто нет способа ранжировать молодых людей, которые думают самостоятельно. Система выбрана не просто, чтобы делать нормальную науку, *а чтобы обеспечить, что нормальная наука является тем, что она есть*. Это стало для меня ясно, когда я обратился с просьбой о моей первой работе после аспирантуры. Как-то раз, когда мы ждали результатов нашего ходатайства, ко мне подошел друг, выглядевший очень озабоченным. Старший коллега попросил его сказать мне, что я вряд ли получу какую-нибудь работу, поскольку невозможно сравнить меня с другими людьми. Если я хочу делать карьеру, я должен прекратить работу над моими собственными идеями и заняться тем, что делают другие, поскольку только тогда станет возможным ранжировать меня по отношению к равным мне.

Я не помню, что я подумал об этом или почему это не свело меня с ума от беспокойства. Я должен был подождать на два месяца дольше, чем любой другой, чтобы получить предложение на работу, и это было не весело. Я уже подумывал, что я такое мог бы делать, чтобы содержать себя, и что не отнимало бы слишком много времени от моих исследований. Но затем мне повезло. Институт теоретической физики в Санта Барбаре только открылся, и он имел программу по квантовой гравитации. Так что моя карьера не оборвалась.

Но только теперь я понимаю, что на самом деле произошло. Никто сознательно не предпринимал неэтичных действий. Мой друг и его наставник имели в виду мои лучшие интересы, как они их понимали. Но произошло то, как мог бы описать социолог, что произошло. Более старший коллега, который передал моему коллеге сообщение, начинал новую исследовательскую программу, которая требовала напряженных вычислений. Эта программа требовала способных, быстрых молодых теоретиков. Я говорил, что если бы я стал работать над его программой, он мог бы мне дать в дар карьеру. Это простейшая и старейшая из торговых сделок мира: работник получает шанс продолжать существование в обмен на свою работу.

Имеется много способов предложить такую сделку, чтобы принявшие ее получили вознаграждение, а мятежники – те, кто предпочитает свои собственные идеи идеям своих предшественников, – были наказаны. Мой друг Карло Ровелли ждал работы в Риме. Он воспользовался знакомством с одним профессором, который отнесся очень дружески и объяснил Карло все о впечатляющей исследовательской программе, которой занимался он и его группа. Карло поблагодарил его за информативное обсуждение и обратился к описанию перед профессором своей собственной исследовательской программы. Беседа была вскоре прервана, и Карло никогда не получил ожидаемого предложения на работу. Я объяснил ему, что произошло. Он был, как и все мы однажды, достаточно наивен, чтобы подумать, что люди отдают должное имеющим хорошие идеи, кроме их собственных идей.

Фактически, чтобы Карло получил предложение на работу в Университете Рима, ему пришлось стать ведущим ученым Европы в своей области. Только тогда – раз уж он сделал существенную карьеру где-то в другом месте, только после того, как сотни людей во всем мире начали работать над его идеями, – ведущие профессора Рима оказались готовы прислушаться к идеям, которые он разработал как новый доктор философии, чтобы принести к ним.

Вы можете удивится, как же Карло получил работу в первый раз. Я вам скажу. В то время, в конце 1980х, в области ОТО доминировали несколько старых людей, которые были студентами студентов Эйнштейна, и они строго придерживались взгляда, что молодые люди с лучшими и самыми независимыми идеями должны поощряться. Это привело к тому, что было названо релятивистским сообществом, которое имело исследовательские группы примерно в дюжине университетов США. Как направление они вряд ли доминировали, но они контролировали небольшое число позиций, возможно, одно новое профессорско-преподавательское место в два или три года. Карло был постдоком в Риме, но вследствие некоторых бюрократических проблем эта работа так и не стала официальной и никогда ему не оплачивалась. Каждый месяц ему говорили, что после еще одной встречи или еще одной работы для статьи он сможет получить чек. После полутора лет такого бытия он позвонил своим друзьям в Соединенных Штатах и сказал, что, хотя он не хотел бы покидать Италию, он сыт по горло. Не имеется ли подходящей работы в США? Так случилось, что один из релятивистских центров искал доцента, и когда они услышали, что он может быть использован, они перетащили его по воздуху и быстро оформили назначение, в сущности, за неделю. Стоит отметить, что никто в этом центре не работал в квантовой гравитации, – они предложили Карло работу вследствие того, что он подтвердил наличие у него оригинальных и важных идей в этой области.

Могло бы это произойти сегодня? Невероятно, поскольку сейчас даже в области относительности доминируют большие исследовательские программы с точной повесткой дня, установленной старшими учеными. Они должны заниматься экспериментальной астрономией гравитационных волн и надеждами (все еще надеждами после многих лет) провести компьютерные расчеты, чтобы предсказать, что должны увидеть указанные эксперименты. На сегодняшний день молодой специалист в области ОТО или квантовой гравитации, который не работает, в основном, над этими проблемами, вряд ли будет приглашен на работу где бы то ни было в Соединенных Штатах.

Не имеет значения, в какой области, вкус успеха – часто это все, что нужно, чтобы первоначальные мятежники перешли в консервативные хранители своих исследовательских программ. Я не раз тесно соприкасался с людьми в моей собственной области квантовой гравитации, чтобы поддержать предложение работы кому-нибудь из-за пределов области, кто предложил новые идеи, вместо предложения работы технически яркому кандидату, который работает над узкими проблемами, которые продвигают существующие исследования.

На самом деле тут имеются две проблемы, и важно разделять их. Одна заключается в доминировании решений, принимаемых старшими учеными, которые часто используют свою власть, чтобы поддержать исследовательские программы, которые они придумали, когда они были молодыми и одаренными богатым воображением. Вторая заключается в типе ученого, в котором заинтересованы университеты и могут предложить ему работу. Будут ли они предлагать работу людям, которые делают работу, которую каждый в отдельной области может понять и оценить? Или они смогут предложить работу людям, которые придумали свое собственное направление, которое, вероятно, трудно для понимания?

Это связано с проблемой риска. Хорошие ученые стремятся делать выводы из двух видов откликов от судей. Нормальные, низкорисковые ученые в целом получают однородные отклики; каждый по их поводу чувствует одно и то же. Высокорисковые ученые и провидцы имеют тенденцию провоцировать сильно поляризованные реакции. Имеются некоторые люди, которые верят в них глубже и сильнее общаются с ними. Другие в высшей степени критичны.

Те же самые вещи происходят, когда студенты оценивают своих преподавателей. Имеется определенный тип хорошего преподавателя, которого студенты не воспринимают нейтрально. Некоторые его или ее любят и скажут: «Это лучший преподаватель, которого я когда-либо имел; поэтому я пришел в колледж». Но другие будут злы и возмущены, и совсем не будут сдерживаться в оценочной анкете. Если вы усредните оценки, – сведя данные к одному числу, как это часто делается при принятии решения о продвижении профессоров или при оценке шансов назначения на должность, – вы потеряете этот ключевой факт.

С течением лет я замечал, что поляризованное распределение откликов о кандидате является сильным предсказанием его будущего успеха и влиятельности как ученого. Если некоторые люди думают, что X

является будущим науки, а другие думают, что X является бедствием, это может означать, что X настоящая вещь, некто, кто агрессивно проталкивает его или ее собственные идеи и имеет талант и настойчивость поддерживать их. Окружающая среда, которая принимает носителей риска, будет рада таким людям, но не расположенная к риску среда будет их избегать.

На сегодняшний день, если рассматривать университеты США, основной факт таков, что людям с поляризованным набором рекомендаций чаще всего не будет предложена работа. Хотя я наблюдал это только в моей области, это может быть верно в целом. Рассмотрим следующих ученых, каждый из которых широко признан за смелость и оригинальность их вкладов в наше понимание эволюции: Пер Бак, Стюарт Кауффман, Линн Маргулис, Майя Пачжуски, Роберт Трайверс. Два из них физики, которые изучали математические модели естественного отбора, остальные являются ведущими эволюционными теоретиками. Ни один не сделал свою карьеру в самых элитных университетах. Когда я был моложе, меня удивляло, почему так. С течением времени я понял, что они были слишком интеллектуально независимы. Их характеристики были слишком двойственны: если многие восхищались ими, имелись также влиятельные академики, которые были настроены к ним скептически. И в самом деле, часто случается, что типы людей, которые являются источниками идей, не свободны от недостатков, когда их оценивают по критериям, которые нормальные ученые используют для суждения о мастерстве. Они могут быть слишком смелы. Они могут быть неряшливы в отношении деталей и невыразительны в техническом отношении. Эти критические замечания часто применяются к оригинальным мыслителям, чья любознательность и независимость приводит их в области, в которых они не натренированы. Не имеет значения, насколько оригинальны и успешны их прозрения, их работа технически невыразительна для специалистов в данной области.

Верно также, что некоторые из этих творческих и оригинальных ученых таковы, что с ними нелегко иметь дело. Они могут быть раздражительны. Они выражаются слишком прямо, когда они не согласны с вами, и у них нет хороших манер, что для тех, кто с ними сталкивается, легко может быть более важным, чем то, что они правы. Зная некоторых таких «трудных» людей, я полагаю, что они рассержены по тем же причинам, по которым временами сердится очень умная женщина в науке: они все время терпят, ощущая себя крайними.

Эти виды проблем, определенно влияли на карьеру Пера Бака, который трагически умер от рака несколько лет назад в возрасте пятьдесят четыре года. Он имел редкое качество писать статьи в нескольких областях за пределами его специальности, от экономики до космологии и биологии. Это должно было сделать его ценным приобретением по требованиям лучших университетов, но на деле имелось противоположное, поскольку он не стеснялся отмечать, что его способ подхода к проблемам приводит к прозрениям, которые эксперты пропустили. Он мог бы сделать намного лучшую карьеру, если бы он применил свои творческие способности только в одной области, но тогда бы он не был Пером Баком.

Вы можете удивиться, почему все умные люди, которые стали руководителями департаментов и деканами, не понимают все это и не используют свое знание в пользу своих университетов. Конечно, некоторые понимают и используют, и они приглашают на работу таких людей. Большинство рабочих мест, которые были открыты за последние десятилетия в не струнных подходах к квантовой гравитации в Соединенных Штатах, появились благодаря тому, что председатель имел редкую благоприятную возможность предложить работу в области, которая еще не представлена в его университете.

Освобожденный от обычной политики департамента, он проделал расчет затрат/прибылей, который убедил его, что предлагая работу в неподдерживаемой области, он сможет незамедлительно получить группу высокого уровня, которая сможет повысить статус его департамента.

На самом деле проблемы, о которых мы говорим, влияют на всю науку, и несколько влиятельных старших ученых в других областях выражали свое согласие с этим. Брюс Альбертс является биологом и последним президентом Национальной академии наук, наиболее престижной и влиятельной организации ученых в Соединенных Штатах. В своем президентском послании, адресованном Национальной академии в апреле 2003, он отметил:

"Мы разработали стимулирующую систему для молодых ученых, которая слишком сильно избегает рисков. Во многих случаях мы являемся нашими собственными худшими врагами. Исследовательские группы, которые мы устанавливаем, чтобы рассмотреть запросы на грантовое фондирование, составлены из равных личностей, которые заявляют, что они восхищаются принятыми наукой рисками, но которые в целом инвестируют в безопасную науку, когда распределяют ресурсы. Эффект подавления для инноваций гигантский, поскольку наши исследовательские университеты ищут доцентов, которые могут быть гарантией грантового фондирования, когда они выберут новые профессорско-преподавательские места. Это помогает понять, почему так много из наших лучших молодых людей заняты «а я тоже» наукой."

Далее он перешел к описанию тренда, в котором в течение десяти лет, начиная с 1991, двигались пропорции идущего на исследователей фондирования Национального института здоровья: фондирование исследователей, которые составляли менее чем тридцать пять процентов, более чем уполовинилось, тогда как фондирование тех, которые составляли более пятидесяти пяти процентов, возросло более чем на 50 процентов. Он оплакал результат, поскольку он заключался в существенном снижении интеллектуальной независимости молодых исследователей:

"Многие из моих коллег и я были удостоены нашего первого независимого фондирования, когда нам было менее тридцати лет. Мы не имели предварительных результатов, поскольку мы пытались сделать что-то совершенно новое. [Теперь] почти никто не находит возможным начинать независимую научную карьеру до достижения возраста тридцать пять. Более того, если в 1991 доля одной трети главных исследователей с фондированием Национального института здоровья была около четверти, к 2002 эта доля упала до одной шестой. Даже самые талантливые из наших молодых людей, кажется, подвергаются нескольким годам отказа в заявлениях на гранты, прежде чем они, наконец, приобретут достаточно «предварительных данных», чтобы гарантировать обозревателям, что они, вероятно, достигли своих установленных целей."

Почему, если проблема столь очевидна, что беспокоит большинство известных лидеров американской науки, ничего по ее поводу не делается? Это озадачивает меня долгое время. Теперь я понимаю, что соревнование за получение и удержание академических позиций описывает больше, чем добродетели [соискателей]. Система пытается выбрать лучших, самых продуктивных людей, и до некоторой степени делает это. Но имеются другие задачи повестки дня, и было бы наивным игнорировать их. В равной степени важным является то, что эти решения касаются установления и упрочения консенсуса внутри каждой области.

Приглашение на работу означает не только исполнение этого консенсуса. Все, что я говорил о приглашении на работу, верно и для групп экспертов, которые оценивают заявления на гранты. Это также рассматривается для оценивания назначений на должности. Эти вещи связаны, поскольку вы не можете получить назначение на должность в науке в исследовательском университете США, если у вы не преуспели в получении грантов, и вы не можете получить приглашение на работу, если не имеется вероятности, что вы получите гранты.

Так случилось, что за несколько месяцев до того, как я это впервые понял, меня попросили написать заметку по другой теме для *Новостей высшего образования*, который является профессиональным журналом для университетских администраторов [США]. Я написал редакторам и предложил вместо заметки по поводу угроз академической свободе исходить из доминирования популярных исследовательских программ. Они были готовы посмотреть это, но они отвергли это, как только прочитали мой черновик. Я был возмущен: они подавляли несогласных! Так что я написал им необычное (для меня) нелюбезное электронное письмо, задав вопросы по поводу их решения. Они немедленно ответили, сообщив мне, что проблема была не в том, что заметка была радикальна – почти оппозиционна. Все в ней было хорошо известно и полностью открыто в социальных науках и у гуманитариев. Они прислали мне кучу статей, которые они опубликовали в последние годы по поводу властных отношений при принятии академических решений. Я прочитал их и быстро понял, что просто был ученым, который оказался несведущим в этих проблемах.

Очевидно, имеются хорошие причины получить постоянную должность. В ограниченных пределах это

защищает ученых, которые оригинальны и независимы, от увольнения и замены молодыми карьеристами, следующими последнему интеллектуальному увлечению. Но мы платим тяжелую цену за систему назначений на должности: *слишком много гарантий сохранения рабочего места, слишком много власти и слишком мало ответственности для более старых людей. Слишком мало гарантий сохранения рабочего места, слишком мало власти и слишком много ответственности для молодых людей в начале их творческих, принимающих риски лет*.

Хотя постоянная должность защищает людей, которые интеллектуально независимы, она их не производит. Я слышал, как многие коллеги говорили, что они работают над тем, что модно, чтобы получить постоянную должность, после чего они будут делать то, что они на самом деле хотят. Но не кажется возможным в любое время повернуть на этот путь. Я знаю только один случай, когда это произошло. В других случаях кажется, что если эти люди не имели достаточно мужества и независимости, чтобы работать над тем, что они хотят, когда они беспокоились по поводу постоянной должности, они не наберут неожиданно бесстрашия и независимости, когда будут рассчитывать, какое решение может принять смотр группы экспертов по поводу их грантов. Это не помогает иметь систему, которая защищает интеллектуальную независимость профессоров на постоянной должности, если та же самая система делает невероятным, что люди с указанной независимостью когда-либо получат постоянную должность.

Фактически, профессора с постоянной должностью, которые теряют грантовое фондирование вследствие переключения на более рисковую область могут быстро оказаться на горячей сковороде. Они не могут быть уволены, но на них может быть оказано давление в виде угрозы тяжелого преподавания и усечения жалования, чтобы они или вернулись к низкорисковой, хорошо фондируемой работе, или приняли раннюю отставку.

Вот что недавно сказал Айседор Зингер, талантливый профессор математики в Массачусетском технологическом институте, по поводу состояния его дисциплины:

«Я наблюдаю тенденцию к ранней специализации, двигаемую экономическими соображениями. Вы должны рано показать перспективы получения хороших рекомендательных писем, чтобы получить хорошую первую работу. Вы не можете позволить себе распыляться, пока вы не устроились и не получили защищенную позицию. Реалии жизни вызывают сужение перспектив, что не свойственно математике. Мы можем противостоять слишком большой специализации через новые ресурсы, что могло бы дать молодым людям больше свободы, чем они ранее имели, свободы исследовать математику более широко или исследовать связи с другими предметами, подобно биологии наших дней, где имеется много того, что должно быть открыто.

Когда я был молодым, рынок труда был хорош. Было важно находиться в крупном университете, но вы все еще могли процветать и в маленьком. Я мучаюсь по поводу насильственного действия сегодняшнего рынка труда. Молодые математики должны иметь свободу выбора, которую имели мы, когда были молодыми.» [157]

Французский математик Ален Конне настроен так же критически:

"Постоянное давление [в системе Соединенных Штатов] на результат уменьшает «единицу времени» здесь для самых молодых людей. Начинающие имеют небольшой шанс, кроме как найти консультанта, [который] хорошо устроен в социологическом смысле (так, чтобы на последнем этапе он или она был в состоянии написать подходящие рекомендательные письма и получить позицию для студента) и затем писать техническую диссертацию, показывающую, что они имеют хорошую мускулатуру, и все это при ограниченном количестве времени, что не допускает их к изучению материалов, которые требуют несколько лет тяжелой работы. Нам, конечно, очень сильно нужны хорошие техники, но это только часть того, что генерирует прогресс в исследованиях. ... С моей точки зрения действующая в США система на самом деле препятствует людям, которые в полном смысле слова являются оригинальными мыслителями, которые часто идут с медленным развитием на техническом уровне. Кроме того, способ получения молодыми людьми их позиции на рынке создает «феодализм», а именно несколько хорошо устроенных

областей в ключевых университетах, которые самовоспроизводятся, не оставляя места новым областям. ... В результате имеется очень немного тем, которым придается особое значение и которые сохраняют производство студентов, и, конечно, это не создает благоприятных условий для появления новых областей." [158]

В последние десятилетия мир бизнеса научился тому, что иерархия слишком дорога, и склоняется к тому, чтобы дать молодым людям больше власти и возможностей. Сейчас имеются молодые банкиры, инженеры по программному обеспечению и даже те, кто, не достигнув своего тридцатилетия, ведут большие проекты. Как и каждый иногда, вы столкнетесь со счастливым академическим ученым в той же ситуации, но это редко. Многие ученые разменивают свои тридцать пять лет, прежде чем они освобождаются от вынужденного несовершеннолетия постдокторской позиции.

Лидеры высокотехнологических компаний знают, что если вы хотите пригласить на работу лучших молодых инженеров, вы должны иметь молодых менеджеров. То же самое имеет место и для других творческих областей, таких как музыкальный бизнес. Я уверен, что некоторые джазовые музыканты и старые парни от рок'н'ролла хорошо разбираются в хип-хопе и техно, но музыкальная индустрия не доверит шестидесятилетним бывшим звездам выбор того, какие молодые музыканты получат подпись на контрактах на запись. Инновации в музыке происходят столь бурным, лихорадочным темпом потому, что молодые музыканты быстро могут найти пути связи и аудиенции с другими музыкантами в клубах и на радио, для чего не требуется запрашивать разрешения состоявшихся артистов с их собственными программами.

Интересно отметить, что квантово-механическая революция была сделана, в сущности, лишенным поддержки поколением ученых. Многие из участников этого поколения погибли в бойне Первой мировой войны. Тогда вокруг просто не было большого количества старших ученых, чтобы сказать им, что они сумасшедшие. Чтобы выжить аспирантам и постдокам сегодня, они должны делать вещи, которые могут понять люди, близкие к отставке [по возрасту]. Делать науку таким образом все равно, что ехать на аварийном тормозе.

Наука требует баланса между мятежом и послушанием, так что всегда будут споры между радикалами и консерваторами. Но в сегодняшнем академическом мире баланса нет. Больше, чем когда-либо в истории науки, карты р*о*зданы против революционеров. Таких людей просто не выносят в исследовательских университетах. Тогда не удивительно, что даже тогда, когда наука явно взывает об этом, мы не можем, видимо, завершить революцию.

20. Что мы можем сделать для науки

Я попытался в этой книге объяснить, почему список пяти больших проблем физики в точности тот же самый, каким он был тридцать лет назад. Чтобы рассказать эту историю, я сфокусировался на теории струн, но я хочу еще раз повторить, что моей целью не была ее демонизация. Теория струн является мощной, хорошо мотивированной идеей, и она заслуживает б*о*льшей части трудов, которые были ей посвящены. Если она на сегодняшний день потерпела неудачу, то принципиальной причиной явилось то, что ее внутренние пороки тесно связанны с ее силой – и, конечно, история не закончена, поскольку теория струн вполне может оказаться частью истины. Настоящий вопрос не в том, почему мы потратили так много энергии на теорию струн, а в том, почему мы и близко не потратили достаточно энергии на альтернативные подходы.

Когда я стоял перед выбором, работать ли над основаниями квантовой механики и навредить моей карьере

или работать над вещами, связанными с физикой частиц, решение выбрать первое имело под собой больше научные аргументы, чем экономические. Было очевидно, что в предыдущие десятилетия намного б*о*льший прогресс был сделан в физике частиц, чем в канализационной сети оснований квантовой теории. Сегодня новые аспиранты находятся в совершенно иной ситуации. Заповеди изменились. Предыдущие десятилетия показали мало прогресса в теории частиц, но много в области оснований, подгоняемые работой в области квантовых вычислений.

Теперь стало ясно, что мы не можем разрешить пять больших проблем без того, чтобы тяжело не задуматься над основаниями нашего понимания пространства, времени и квантов. Мы также не можем преуспеть, если мы трактуем десятилетнего возраста исследовательские программы, такие как теория струн или петлевая квантовая гравитация, как если бы они были установленными парадигмами. Мы нуждаемся в молодых ученых с их смелостью, воображением и концептуальной глубиной, чтобы выковать новые направления. Как мы можем распознать и поддержать таких людей, вместо того, чтобы мешать им, как мы делаем сегодня?

Я должен еще раз подчеркнуть, что я не верю, что любые индивидуальные физики виноваты в стагнации, которая овладела теоретической физикой. Многие из струнных теоретиков, которых я знаю, очень хорошие ученые. Он проделали очень хорошую работу. Я не спорю, что они должны были бы сделать лучше, но поразительно только то, что большое число лучших среди нас оказались не в состоянии достичь успеха, склонившись к тому, что сначала казалось такой хорошей идеей.

С чем мы имеем дело, это социологические явления в мире академической науки. Я думаю, что этика науки в некоторой степени искажена видами группового мышления, исследованными в главе 16, но не только сообществом струнной теории. С одной стороны, задача академического сообщества больше, чем устанавливать правила. В суде хороший законник сделает все в рамках закона, чтобы повысить шансы своих клиентов. Мы должны ожидать, что лидеры научной области аналогично будут делать все в рамках неписанных правил академии, чтобы развить свои исследовательские программы. Если в результате мы имеем непродуманный захват области агрессивно продвигаемым набором идей, которые достигли своего доминирования, пообещав больше, чем достигнуто, это не может быть поставлено в вину только их лидерам, которые просто делают свою работу, основываясь на их понимании того, как работает наука. Это может и должно быть поставлено в вину всем нам, академическим ученым, которые коллективно вырабатывают правила и оценивают заявления наших коллег.

Возможно, больше всего вопросов к тому, насколько все мы в нашей области проверяем каждый результат, прежде чем принять его как установленный факт. Мы можем оставлять и оставляем это экспертам в отдельных подобластях. Но в нашей ответственности, по меньшей мере, удерживать линию утверждений и доказательств. В той же степени, как и любой из моих коллег, я виноват в принятии широко принятых убеждений по поводу теории струн, несмотря на то, что они не поддержаны в научной литературе.

Тогда правильный вопрос звучит так: что произошло с традиционными ограничениями научной этики? Как мы видели, имеется проблема со структурой академической науки, которая проявляется в таких обычаях, как смотр равных и система постоянных должностей. Это частично отвечает за доминирование теории струн, но в равной степени виновато смешивание нормальной науки с революционной наукой. Теория струн началась как попытка сделать революционную науку, однако она трактуется как одна из исследовательских программ в рамках нормальной науки.

Несколькими главами ранее я предположил, что имеется два вида теоретических физиков, мастера-ремесленники, которые двигают нормальную науку, и провидцы, пророки, которые могут видеть сквозь не подтвержденные, но повсеместно принятые предположения и задавать новые вопросы. Должно быть достаточно ясно к настоящему времени, что, чтобы сделать в науке революцию, нам нужно больше последних. Но, как мы видели, эти люди маргинализуются, если вообще не исключаются из академии, и они больше не рассматриваются, если когда-нибудь и были, как часть генерального направления теоретической физики. Если нашему поколению теоретиков не удалось сделать революцию, это потому, что мы организовали академию таким образом, что мы имеем немного революционеров, и большинство из нас

не слышит тех немногих, которые у нас есть.

Я пришел к заключению, что мы должны сделать две вещи. Мы должны осознать и начать борьбу с симптомами группового мышления, и мы должны открыть двери для широкого спектра независимых мыслителей, убедившись, что м*е*ста для специфических характеров достаточно, чтобы сделать революцию. Великие дела покоятся на том, как мы рассматриваем следующее поколение. Чтобы сохранить здоровье науки, молодые ученые должны быть приглашены на работу и продвинуты на основании только их способностей, творчества и независимости, безотносительно к тому, внесли ли они вклад в теорию струн или любую другую установленную исследовательскую программу. Людям, которые придумывают и развивают свои собственные исследовательские программы, должен быть даже отдан приоритет, чтобы они могли иметь интеллектуальную свободу работать над подходом, который они оценили как самый многообещающий. Управление наукой всегда заключается в совершении выбора. Чтобы предотвратить излишние инвестиции в спекулятивные направления, которые могут оказаться в тупике, физические департаменты должны обеспечивать, чтобы соперничающие исследовательские программы и разные точки зрения по поводу нерешенных проблем были представлены в их профессорско-преподавательском составе – не только потому, что большую часть времени мы не можем предсказать, чьи взгляды окажутся правильными, но и потому, что дружеское соперничество между умными людьми, работающими в тесной близости, часто является источником новых идей и направлений.

Открыто критическое и непредвзятое отношение должно поощряться. Люди должны наказываться за поверхностную работу, которая игнорирует тяжелые проблемы, и награждаться за атаку на долго стоящие открытые гипотезы, даже если прогресс займет много лет. Должно быть предоставлено больше места для людей, которые глубоко и тщательно думают над фундаментальными проблемами, возникшими из попыток объединения нашего понимания пространства и времени с квантовой теорией.

Многие из социологических проблем, которые мы обсуждали, должны рассматриваться вместе со склонностью ученых – на самом деле, всех человеческих существ – формировать кланы. Для борьбы с этими клановыми тенденциями струнные теоретики могли бы стереть границы между струнной теорией и другими подходами. Они могли бы прекратить разделение теоретиков на категории по принципу того, демонстрируют они лояльность к тому или иному предположению или нет. Люди, которые работают над альтернативами к струнной теории или которые критичны к струнной теории, должны приглашаться для разговора на конференции по теории струн для общей пользы. Исследовательские группы должны разыскивать постдоков, студентов и приглашенных, которые занимаются конкурирующими подходами. Студенты также должны поощряться на изучение и работу над конкурирующими подходами к нерешенным проблемам, чтобы они были подготовлены для самостоятельного выбора самых многообещающих направлений, когда их карьера будет развиваться.

Нам, физикам, необходимо противостоять стоящему перед нами кризису. Научная теория, которая не делает предсказаний и, следовательно, не является предметом эксперимента, никогда не потерпит неудачу, но такая теория никогда и не преуспеет, пока наука состоит в собирании знаний из рациональных аргументов, родившихся с помощью доказательств. Это требует честной оценки мудрости следования исследовательской программе, которая не смогла после десятилетий найти оснований или в экспериментальных результатах или в точной математической формулировке. Струнным теоретикам нужно встать перед возможностью, что они могут оказаться неправыми, а другие правыми.

Наконец, имеется много шагов, которые поддерживающие науку организации могут предпринять, чтобы сохранить здоровье науки. Финансирующие органы и фонды должны давать возможность ученым на каждом уровне исследований и развития жизнеспособных предположений решать глубокие и трудные проблемы. Исследовательской программе нельзя позволять становиться институционально доминирующей до того, как она соберет убедительные научные доказательства. До того, как это произойдет, альтернативные подходы должны поощряться, чтобы прогресс науки не блокировался излишними инвестициями в неверное направление. Когда имеются неподдающиеся, но ключевые проблемы, должен быть лимит в пропорциях поддержки, выдаваемой любой отдельной исследовательской программе, которая намерена решить их, – скажем, треть от общего фондирования.

Некоторые из этих предложений представляют собой крупные реформы. Но когда речь идет о теоретической физике, мы не говорим совсем об очень больших деньгах. Предположим, что фондирующая организация решает полностью поддержать всех мечтателей, которые игнорируют генеральное направление и следуют своим собственным амбициозным программам, чтобы решить проблемы квантовой гравитации и квантовой теории. Мы говорим, возможно, о двух дюжинах теоретиков. Их полная поддержка могла бы занять мельчайшую часть общего национального бюджета на физику. Но, судя по тому, какой вклад сделали такие люди в прошлом, вероятно, что некоторые сделают нечто достаточно необычное, чтобы сделать это вложение лучшим во всей области.

На самом деле даже малое финансирование может помочь в поиске независимо мыслящих пророков со степенью доктора философии по теоретической физике или математике, которые работают над своими собственными подходами к фундаментальным проблемам – то есть, людей, делающих нечто настолько необычное, что имеется хороший шанс, что они никогда не будут в состоянии получить академическую карьеру. Кого-то вроде Джулиана Барбура, Антони Валентини, Александра Гротендика – или Эйнштейна, если уж на то пошло. Дайте им пять лет поддержки, продлеваемой на вторую или даже на третью пятилетку, если они вообще чего-то достигнут.

Звучит рискованно? Королевское общество в Объединенном королевстве имеет подобную этой программу. С ней связано взрывное начало карьер нескольких ученых, которые сегодня важны в своей области и которые, вероятно, никогда не получили бы поддержки такого рода в Соединенных Штатах.

Как вы могли бы выбрать таких людей, достойных поддержки? Просто. Спросите тех, кто уже делал науку таким образом. Чтобы еще удостовериться, найдите, по меньшей мере, одну завершившую образование личность среди кандидатов, которая глубоко возмущена тем, что пытаются делать кандидаты. Чтобы быть на самом деле уверенным, найдите, по меньшей мере, одного профессора, который думает, что кандидат ужасный ученый и непременно потерпит неудачу.

Может показаться странным обсуждение академической политики в книге для широкой публики, но вы, публика, индивидуально и коллективно являетесь нашими работодателями. Если наука, которую вы оплачиваете, не получается, это побудит вас держать нас в шаге от увольнения и заставить нас делать нашу работу.

Так что у меня есть некоторые заключительные слова для различных аудиторий.

Для образованной публики: будьте критическими. Не верьте большинству того, что вы слышите. Когда ученый заявляет, что он сделал что-то важное, попросите его предъявить доказательства. Оценивайте это так же строго, как вы делали бы в отношении инвестиций. Устройте эту проверку столь внимательно, как вы делали бы, покупая дом или выбирая школу, в которую вы собираетесь послать своих детей.

Для тех, кто принимает решения о том, что наука должна получать, – то есть, для глав департаментов, исследовательских комитетов, деканов, должностных лиц фондов и финансирующих агентств: только люди вашего уровня могут осуществить рекомендации, подобные тем, что только что перечислены. Почему не рассмотреть их? Они являются предложениями, которые должны быть обсуждены в местах, подобных офисам Национального фонда науки, Национальной академии наук и их двойников по всему миру. Это не просто проблема теоретической физики. Если высоко упорядоченная область, подобная физике, поражена симптомами группового мышления, то что может произойти в других, менее строгих областях?

Для моих собратьев физиков-теоретиков: проблемы, обсужденные в этой книге, являются ответственностью всех нас. Мы составляем научную элиту только потому, что б*о*льшее общество, частью которого мы являемся, глубоко заботится об истине. Если теория струн ошибочна, но продолжает доминировать в нашей области, последствия могут быть тяжелыми – для нас персонально, а также для нашей профессии. Для нас важно открыть двери и позволить войти альтернативам, а также в целом повысить стандарты обоснования.

Чтобы выразить это более прямо: если вы один из тех, чья первая реакция, когда высказывается сомнение в

ваших научных убеждениях, есть «А что думает X?» или «Как вы можете говорить такое? Каждый хорошо знает, что ...», тогда вы в опасности недолго быть ученым. Вы получаете хорошие деньги за выполнение своей работы, и это означает, что вы несете ответственность за проведение тщательной и независимой оценки всего, во что верите вы и ваши коллеги. Если вы не можете дать точное обоснование вашим уверенностям и взглядам, совместимое с фактами, если вы позволяете другим людям делать для вас ваши мысли (даже если они старшие и влиятельные), тогда вы не достойны ваших этических обязательств как члена научного сообщества. Ваша докторская степень является для вас лицензией иметь ваши собственные взгляды и выносить ваши собственные суждения. Но это намного больше; это обязывает вас мыслить критически и независимо по поводу всего в вашей области компетентности.

Это жестко. Но имеются даже более жесткие слова для тех из нас, работающих над фундаментальными проблемами, которые не являются струнными теоретиками. Наша работа предполагает находить ошибочные утверждения, задавать новые вопросы, находить новые ответы и возглавлять революции. Легко увидеть, где теория струн, вероятно, ошибается, но критика теории струн работой не является. Работой является изобретение теории, которая верна.

Я буду жестче всего к себе. Я вполне ожидаю, что некоторые читатели зададут мне вопрос: «Если ты такой умный, почему ты не сделал ничего лучше, чем струнные теоретики?» И они будут правы. Поскольку, в конце концов эта книга является формой отсрочки. Конечно, я надеялся, когда писал ее, сделать путь более легким для тех, кто идет следом. Но мое ремесло в теоретической физике и моя настоящая работа заключается в завершении революции, которую начал Эйнштейн. Я не сделал эту работу.

Так что я собираюсь делать сам? Я иду пытаться использовать преимущества хорошей судьбы, которую подарила мне жизнь. Для начала я иду раскапывать мою старую статью «К взаимосвязи между квантами и тепловыми флуктуациями» и читать ее. Затем я иду выключать телефон и БлэкБерри, ставить что-нибудь из Бебель Жильберто, Эстеро или Рона Секссмита, увеличивать уровень звука, вытирать начисто доску, добывать где-нибудь хороший мел, открывать новую записную книжку, брать мою любимую ручку, садиться и начинать думать.

КОММЕНТАРИИ И ССЫЛКИ

Введение

[1] Mark Wise, "Modifications to the Properties of the Higgs Boson," <Изменения к свойствам бозона Хиггса>, сообщение на семинаре, Март, 23, 2006. Доступно на http://streamer.perimeterinstitute.ca/mediasite/viewer/FrontEnd/Front.aspx?&shouldResize=False.

[2] Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality, <Ткань космоса: Пространство, время и структура реальности>* (New York: Alfred A. Knopf, 2005), стр. 376

[3] Gerard T'Hooft, *In Search of the Ultimate Building Blocks, <В поиске первичных строительных блоков>* (Cambridge: Cambridge University Press, 1996), стр. 163.

[4] Цитируется по *New Scientist*, «Nobel Laureate Admits String Theory Is in Trouble», <Нобелевские лауреаты

признают, что теория струн в неприятностях>, Декабрь, 10, 2005. Это вызвало некоторую полемику, как пояснил Гросс в своем замечании на открытии 23й Иерусалимской зимней школы по теоретической физике, (полный текст доступен на http://www.as.huji.ac.il/schools/):

«Что я на самом деле об этом думаю, так это то, что мы еще не знаем ответа как на то, что есть теория струн, так и на то, является ли она окончательной теорией или в ней что-то пропускается, и мы, кажется, стоим перед необходимостью глубоких концептуальных изменений ... именно в отношении природы пространства и времени. Но [это] далеко не доказательство, что мы должны остановить разработку теории струн – она потерпела неудачу, она закончилась, – это замечательный период.»

[5] J. Polchinski, сообщение на 26й Летнем институте по физике частиц Стэнфордского линейного ускорительного центра, 1998, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9812104].

[6] http://motls.blogspot.com/2005/09/why-no-new-einstein-ii.html.

[7] Lisa Randall, "Designing Words," <Интригующие слова>, в *Intelligent Thought: Science Versus the Intelligent Design Movement <Умные мысли: наука против движения в поддержку разумного плана>*, ed. John Brockman (New York: Vintage, 2006).

1. Пять великих проблем теоретической физики

[8] John Stachel, «How Did Einstein Discover Relativity?» <Как Эйнштейн открыл теорию относительности?> http://www.aip.org/history/einstein/essay-einstein-relativity.htm. Я должен отметить, что некоторые философы науки относятся к ОТО как к, по меньшей мере, отчасти конструктивной теории; для целей нашего обсуждения это теория принципов, поскольку она описывает, как должны описываться пространство, время и движение, какую бы материю ни содержала вселенная.

2. Красивый миф

[9] Читатель должен заметить, что мой разговор об этой истории изрядно упрощает ее, чтобы доказать главное положение. Имеются другие важные эксперименты, которые были проведены со светом, проходящим через текущую воду, или с влиянием относительного движения Земли и звезд на наблюдения звездного света. Эйнштейн был также не единственный, кто понял, что правильный ответ содержит выбор принципа относительности, то же сделал великий французский математик и физик Анри Пуанкаре.

3. Мир как геометрия

[10] Я должен сознаться, что Нордстрём решал проблему не так. Но он упустил эту возможность. Это был способ, принятый более поздними сторонниками дополнительных измерений, и он является усовершенствованием того, что сделал Нордстрём.

[11] Тут имеется пояснение, которое заключается в том, что это применимо только к наблюдениям, которые имеют место в малых областях пространства на протяжении малых промежутков времени. Если вы падаете достаточно далеко, чтобы видеть, что сила гравитационного поля изменяется, вы можете различить гравитацию и ускорение.

[12] Эксперт может предпочесть здесь более точное понятие инерции, но я нахожу, что это затруднит неподготовленных читателей.

[13] Исключая, конечно, как мы видели, случай темной материи и темной энергии.

[14] Цитируется по Hubert F.M. Goenner, *On the History of Unified Field Theories (1914-1933), <К истории единых теорий поля (1914 – 1933)>*, стр.30. http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2004-2/index.html (2004).

[15] Там же, стр. 38-39.

[16] Там же, стр. 39.

[17] Там же, стр. 35.

[18] Цитируется по Abraham Pais, *Subtle Is The Lord, <Бог изощрен>* (New York: Oxford Univ. Press, 1982), стр.330.

[19] Там же, стр.332.

[20] Там же.

[21] Там же, стр. 334.

4. Объединение становится наукой

[22] Те читатели, кому интересно узнать больше, могут прочитать о калибровочной симметрии в главе 4 моей книги 1997 года *The Life of the Cosmos <Жизнь космоса>* (NewYork: Oxford University Press).

[23] Хотя нам это не понадобится, некоторые читатели могут пожелать узнать больше о том, как работает калибровочный принцип. Вот ключевая идея: обычно ориентации, которые определяют симметрию, применяются к системе в целом. Чтобы показать, что объект симметричен относительно вращения, вы одновременно поворачиваете весь объект. Вы не можете вращать только часть мяча. Но есть специальные случаи, в которых симметрия работает, даже если вы применяете ее к части системы. Такие симметрии называются *локальными* симметриями. Это кажется противоречащим интуиции; как это может работать? Оказывается – и это та вещь, которую тяжело объяснить без математики, – что она работает, если разные части системы действуют на другие с помощью определенных сил. Это и есть калибровочные силы.*

---

* Неплохое изложение сути калибровочного принципа можно, например, посмотреть здесь: http://nuclphys.sinp.msu.ru/zgauge/index.html – *(прим. перев.)*

---

[24] Еще раз, история более сложна, чем мое обобщение. Теории Янга-Миллса на самом деле были открыты в контексте единых теорий с дополнительными измерениями в 1920х, но оказались забытыми, что привело к их повторному открытию Чен Нинь Янгом, Робертом Миллсом и другими в 1950х.

[25] Главная тема книги *The Life of the Cosmos <Жизнь космоса>* заключалась в следствиях из этих изменений.

5. От объединения к суперобъединению

[26] Y. Nomura and B. Tweedie, [http://arxiv.org/abs/hep-ph/0504246].

[27] P. Frampton, e-mail (использовано с разрешения автора).

6. Квантовая гравитация: развилка на дороге

[28] Эйнштейн, "Approximate Integration of the Field Equations of Gravitation," <Приблизительное интегрирование полевых уравнений гравитации>, *Sitzungberichte der Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin, 1916), <Сообщение о заседании Прусской Академии наук (Берлин, 1916)>*, стр. 688-96. По поводу ранней истории квантовой гравитации см. John Stachel, введение и комментарии к части V *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory, <Концептуальные основы квантовой теории поля>*, ed. Tian Yu Cao (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1999).

[29] W. Heisenberg and W. Pauli, "Zur Quantendynamik der Wellenfelder," <К квантовой динамике волновых полей>, *Zeit. fur Physik*, 56: 1-61 (1929), стр.3.

[30] М.П. Бронштейн, «Квантование гравитационных волн», *Журн. Эксп. и Теор. Физ.*. 6 (1936), стр.195. Для большей информации о М. Бронштейне см. Stachel в *Conceptual Foundations <Концептуальных основах>*, а также Г. Горелик, «Матвей Бронштейн и квантовая гравитация: 70ти летняя годовщина нерешенной проблемы», *Успехи Физических Наук*, 48: 10 (2005).

[31] Richard P. Feynman, *What Do You Care What Other People Think? <Что вас заботит в мыслях других людей?>* (New York: W.W. Norton, 1988), стр. 91.

[32] Фактически, это общее свойство систем, связанных друг с другом гравитацией, таких как звезды и галактики. Все это системы, которые охлаждаются, когда к ним подводится энергия. Это фундаментальное отличие между системами с гравитацией и без нее оказалось большим камнем преткновения для многих попыток по объединению физики.

7. Подготовка к революции

[33] G. Veneziano, "Construction of a Crossing-Symmetric Regge-Behaved Amplitude for Linearly Rising Regge Trajectories," <Построение редджиевской кроссинг-симметричной амплитуды для линейно возрастающих траекторий Редджи>, *Nouvo Cimento*, 57 A: 190-97 (1968).

[34] http://www.edge.org/3rd_culture/susskind03/susskind_index.html

[35] P. Ramond, "Dual theory for free fermions," <Дуальная теория для свободных фермионов>, *Phus. Rev*. D, 3(10): 2415-18 (1971).

[36] Другой чрезвычайно важной статьей была P. Goddard, J. Goldstone, C.Rebbi, and C. Thorn, "Quantum Dynamics of a Massless Relativistic String," <Квантовая динамика безмассовой релятивистской струны>, *Nucl. Phys*., 56: 109-35 (1973).

[37] J. Scherk and J.H. Schwarz, "Dual Models for Non-Hadrons," <Дуальные модели для не-адронов>, *Nucl. Phys*. B, 81(1): 118-44 (1974).

[38] T. Yoneya, "Connection of Dual Models to Electrodynamics and Gravidynamics," <Связь дуальных моделей с электродинамикой и гравидинамикой>, *Prog. Theor. Phys*., 51(6): 1907-20 (1974).

8. Первая суперструнная революция

[39] J.H. Schwarz, в интервью Саре Липпинкотт, 21 и 26 июля 2000, http://oralhistories.library.caltech.edu /116/01/Schwarz_OHO.pdf.

[40] M.B. Green and J.H. Schwarz, "Anomaly Cancellations in Supersymmetric D=10 Gauge Theory and Superstring Theory," <Сокращение аномалий в суперсимметричной D=10 калибровочной теории и теории суперструн>, *Phys. Lett*. B, 149(1-3): 117-22 (1984).

[41] Интервью Шварца.

[42] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions <Структура научных революций>* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1962).

[43] S. Mandelstam, "The N-loop String Amplitude – Explicit Formulas, Finiteness and Absence of Ambiguities," < N-петлевая амплитуда струны – явные формулы, конечность и отсутствие неопределенностей>, *Phys. Lett*. B, 277(1-2): 82-88 (1992).

[44] P. Candelas et al., "Vacuum Configurations for Superstrings," <Вакуумные конфигурации для суперструн>, *Nucl. Phus*. B, 258(1): 46-74 (1985).

[45] A. Strominger, "Superstrings with Torsion," <Суперструны с кручением>, *Nucl. Phus*. B, 274(2): 253-84 (1986).

[46] В книге P.C.W. Davies and Julian Brown, eds., *Superstrings: A Theory of Everything <Суперструны: теория всего>*, (Cambrige, U.K.: Cambrige Univ. Press, 1988), pp. 194-95.

[47] Sheldon L. Glashow and Ben Bova, *Interactions: A Journey Through the Mind of a Particle Physicist <Взаимодействия: путешествие по разуму физика, занимающегося частицами>* (New York: Warner Books, 1988), p. 25.

[48] L. Smolin, «Did the Universe Evolve?» <Развивалась ли вселенная?> *Class. Quant. Grav*., 9(1): 173-91 (1992).

9. Революция номер два

[49] E. Witten, "String Theory Dynamics in Various Dimensions," <Динамика теории струн в различных размерностях>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9503124]; *Nucl. Phys*. B, 443: 85-126 (1995).

[50] C.M. Hull and P.K. Townsend, "Unity of Superstring Dualities," <Единство суперструнных дуальностей>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9410167]; *Nucl. Phys*. B, 438: 109-37 (1994).

[51] J. Polchinski, "Dirichlet Branes and Ramond-Ramond Charges," <Браны Дирихле и заряды Рамона-Рамона>, *Phys. Rev. Lett*., 75(26): 4724-27 (1995).

[52] J. Polchinski, ???

[53] J. Maldacena, "The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity," <Предел больших N суперконформных теорий поля и супергравитации>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9711200]; *Adv. Theor. Math. Phys*., 2: 231 -52 (1998); *Int. J. Theor. Phys*., 38: 1113 -33 (1999).

[54] A.M. Polyakov, "A Few Projects in String Theory," <Некоторые проекты в теории струн>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9304146].

[55] B. de Wit, J. Hoppe, and H. Nicolai, "On the Quantum-Mechanics of Supermembranes," <К квантовой механике супермембран>, *Nucl. Phys*. B, 305(4): 545-81 (1988).

[56] N. Banks, W. Fischler, S. Shenker, and L. Susskind, "M-Theory as a Matrix Model: A Conjecture," <М-теория как матричная модель: Предположение>, *Phys. Rev*. D, 55(8): 5112-28 (1997).

10. Теория всего, чего угодно

[57] Наблюдения сверхновых были проделаны Саулом Перлмуттером и сотрудниками в Лоуренсовской лаборатории в Беркли и Робертом Киршнером с коллегами в Команде по поиску далеких сверхновых (High-Z Supernova Search Team).

[58] E. Witten, "Quantum Gravity in de Sitter Space," <Квантовая гравитация в пространстве де Ситтера>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0106109]; Виттен продолжает: «Это последнее утверждение, что не очень удивительно, устанавливает классическую теорему запрета. Ибо, с точки зрения обычных проблем по стабилизации модулей, тяжело получить пространство де Ситтера надежным способом на квантовом уровне, установив, что оно не возникает классически.»

[59] S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, and S. Trivedi, "De Sitter Vacua in String Theory," <Вакуумы де Ситтера в теории струн>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0301240].

[60] См., например, T. Hertog, G.T. Horowitz, and K. Maeda, "Negative Energy Density in Calabi-Yau Compactifications," <Отрицательная плотность энергии в компактификациях Калаби-Яу>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0304199]; *Jour. High Energy Phys*., 0305: 60 (2003).

11. Антропное решение

[61] L. Susskind, The Anthropic Landscape of String Theory, <Антропный ландшафт теории струн> [http://arxiv.org/abs/hep-th/0302219].

[62] S. Weinberg, "Anthropic Bound on the Cosmological Constant," <Антропное ограничение на космологическую константу>, *Phys. Rev. Lett*., 59(22): 2607-10 (1987).

[63] L. Smolin, «Did the Universe Evolve?» <Развивалась ли вселенная?> *Class. Quant. Grav*., 9(1): 173-91 (1992)

[64] S. Weiberg, "Living in the Multiverse," <Жизнь в мультивселенной>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0511037].

[65] Из недавнего обозрения в *Seed Magazine* по поводу взаимосвязи между антропным принципом и разрастанием теорий струн: http://www.seedmagazine.com/news/2005/12/.

[66] E.J. Copeland, R.C. Myers, and J. Polchinski, "Cosmic F- and D-Strings," <Космические F- и D-струны>, *Jour. High Energy Phys*., Art. no. 013, June 2004.

[67] M. Sazhin et al., «CSL-1: Chance Projection Effect or Serendipitous Discovery of a Gravitational Lens Induced by a Cosmic String?» < CSL-1: Эффект случайной проекции или связанное со счастливым случаем открытие гравитационной линзы, индуцированной космической струной?> *Mon. Not. R. Astron. Soc*., 343: 353-59 (2003).

[68] N. Arkani-Hamed, G. Dvali, and S. Dimopoulos, "The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter," <Проблема иерархии и новые размерности на миллиметровом масштабе>, *Phys. Lett*. B, 429: 263-72 (1998).

[69] L. Randall, and R. Sundrum, "An Alternative to Compactification," <Альтернатива компактификации>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9906064]; *Phys. Rev. Lett*., 83: 4690-93 (1999).

12. Что объясняет теория струн

[70] В технических терминах: суперсимметрия подразумевает, что в пространственно-временной геометрии имеется времениподобное или светоподобное киллингово поле. Это предполагает существование симметрии во времени, поскольку (на техническом языке) суперсимметричная алгебра замкнута на гамильтониан. Другой способ выразить это заключается в том, что суперсимметрия требует киллингова спинора, который подразумевает нулевой или времениподобный киллингов вектор.

[71] E. D'Hoker and D.H. Phong, *Phys. Lett*. B., 529: 241-55 (2002); [http://arxiv.org/abs/hep-th/0110247].

[72] D. Friedan, "A Tentative Theory of Large Distance Physics," <Пробная теория физики больших расстояний>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0204131].

[73] D. Karabali, C.Kim, and V.P. Nair, *Phys. Lett*. B., 434: 103-9 (2098); [http://arxiv.org/abs/hep-th/9804132]; R.G. Leigh, D. Minic, and A.Yelnicov, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0604060]. Для применений к 3+1 измерениям см. L. Freidel, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0604185].

[74] В книге *Дорога к реальности* (*The Road to Reality*, 2005) Роджер Пенроуз утверждал, что большинство

из компактифицированных пространств, чьи дополнительные измерения скручены внутрь, будут быстро коллапсировать к сингулярностям. Чтобы показать это, он применил к пространственно-временным фонам этих теорий струн теоремы, которые разработали он и Хокинг, показывая, что ОТО предсказывает сингулярности в космологических решениях. Пока, насколько я знаю, их аргумент стоит. Они придерживались только классического уровня приближений, но это единственное приближение, в котором мы можем изучать эволюцию пространственно-временных фонов струнной теории во времени. Следовательно, результат Пенроуза также правдоподобен, как и аргументы, которые убеждают струнных теоретиков в существовании ландшафта струнных теорий.

[75] Цитировано в Amanda Gefter, «Is String Theory in Trouble?» <Теория струн в затруднении?>, *New Scientist*, Dec. 17, 2005.

13. Сюрпризы реального мира

[76] Часто случается, что удивительные экспериментальные результаты не подтверждаются, когда другие экспериментаторы повторяют эксперимент. Это не означает, что кто-то мошенничает. Эксперименты на грани возможного почти всегда тяжелы для повторения, и типичная трудность заключается в отделении шума от осмысленного сигнала. Часто требуется много лет и много попыток различных людей, прежде чем все источники ошибок в новом виде эксперимента будут поняты и удалены.

[77] Выраженная в терминах R, космологическая константа равна $1/R^2$.

[78] K. Land and J. Magueijo, "Examination of Evidence for a Preferred Axis in the Cosmic Radiation Anisotropy," <Исследование свидетельств выделенной оси в анизотропии космической радиации>, *Phys. Rev. Lett*., 95: 071301 (2005).

[79] Там же.

[80] M. Milgrom, "A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis," <Модификация ньютоновской динамики как возможная альтернатива гипотезе скрытой массы>, *Astrophys. Jour*., 270(2): 265-89 (1983).

[81] Больше информации о MOND и поддерживающих ее данных, а также ссылки доступны на http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/.

[82] J.D. Anderson et al., "Study of the Anomalous Acceleration of Pioneer 10 and 11," <Изучение аномального ускорения Пионеров 10 и 11>, [http://arxiv.org/abs/gr-qc/0104064].

[83] M.T. Murphy et al., "Further Evidence for a Variable Fine Structure Constant from Keck/HIRES QSO Absorption Spectra," <Дальнейшие свидетельства изменения постоянной тонкой структуры из данных Keck/HIRES по QSO спектрам поглощения >, *Mon. Not. Roy. Ast. Soc*., 345: 609-38 (2003).

[84] См., например, E. Peik at al., "Limit on the Present Temporal Variation of the Fine Structure Constant," <Ограничение на текущее временное изменение постоянной тонкой структуры>, *Phys. Rev. Lett*., 93(17): 170801 (2004), и R. Srianand et al., "Limits on the Time Variation of the Electromagnetic Fine Structure Constant in the Low Energy Limit from Absorbtion Lines in Spectra of Distant Quasars," <Ограничения на изменение во времени электромагнитной постоянной тонкой структуры в низкоэнергетическом пределе из линий поглощения в спектрах удаленных квазаров>, *Phys. Rev. Lett*., 92(12): 121302 (2004).

[85] K. Greisen, «End to the Cosmic Ray Spectrum?» <Конец спектра космических лучей?> *Phys. Rev. Lett*.,

16(17): 748-50 (1966), и Г.Т. Зацепин и В.А. Кузьмин, "Верхний предел спектра космических лучей," *Письма в ЖЭТФ*, 4: 78-80 (1966).

[86] S. Coleman and S.L. Glashow, "Cosmic Ray and Neutrino Tests of Special Relativity," <Космические лучи и нейтринные тесты СТО>, *Phys. Rev*. B, 405: 249-52 (1997); S. Coleman and S.L. Glashow, "Evading the GZK Cosmic-Ray Cutoff," <Как обойти GZK-отсечку космических лучей>, [http://arxiv.org/abs/hep-ph/9808446].

14. Равняясь на Эйнштейна

[87] G. Amelino-Camelia, "Testable Scenario for Relativity with Minimum-Length," <Проверяемый сценарий для относительности с минимальной длиной>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0012238].

[88] Joao Magueijo, *Faster Than the Speed of Light: The Story of a Scientific Speculation <Быстрее скорости света: история научной догадки>* (New York: Perseus Books, 2003).

[89] Vladimir Fock, *The Theory of Space, Time, and Gravitation <Теория пространства, времени и гравитации>* (London: Pergamon Press, 1959).

[90] L. Freidel, J. Kovalski-Glikman, and L. Smolin, "2 + 1 Gravity and Doubly Special Relativity," <2 + 1 гравитация и двойная СТО>, *Phys. Rev*. D, 69: 044001 (2004).

[91] E. Livine and L. Freidel, "Ponzano-Regge Model Revisited III: Feynman Dyagrams and Effective Field Theory," <Пересмотр модели Понзано-Редджи, часть III: диаграммы Фейнмана и эффективная теория поля>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0502106]; *Class. Quant. Grav*., 23: 2021-62 (2006).

[92] Florian Girelli and Etera R. Livine, "Physics of Deformed Special Relativity," <Физика деформированной СТО>, [http://arxiv.org/abs/gr-qc/0412079].

15. Физика после теории струн

[93] A. Ashtekar, "New Variables for Classical and Quantum Gravity," <Новые переменные для классической и квантовой гравитации>, *Phys. Rev. Lett*., 57(18): 2244-47 (1986).

[94] http://online.kitp.ucsb.edu/online/kitp25/witten/oh/10.html.

[95] Это не всегда было превалирующим убеждением; придание первоочередной роли причинности должно быть приписано Роджеру Пенроузу, Рафаэлю Соркину, Фэй Даукер и Фотини Маркопоулоу.

[96] См., например, R. Loll, J. Ambjorn, and J. Jurkiewicz, "The Universe from Scratch," <Вселенная с самого начала>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0509010].

[97] См., например, Alain Connes, *Noncommutative Geometry, <Некоммутативная геометрия>*, (San Diego: Academic Press, 1994).

[98] O. Dreyer, "Background-Independent Quantum Field Theory and the Cosmological Constant Problem," <Независимая от фона квантовая теория поля и проблема космологической константы>, [http://arxiv.org

/abs/hep-th/0409048].

[99] См., например, Carlo Rovelli, "Graviton Propagator from Background-Independent Quantum Gravity," <Функция распространения гравитона из фоново-независимой квантовой гравитации>, [http://arxiv.org /abs/gr-qc/0508124].

[100] S. Hofmann and O. Winkler, "The Spectrum of Fluctuations in Singularity-free Inflationary Quantum Cosmology," <Спектр флуктуаций в инфляционной квантовой космологии без сингулярностей>, [http://arxiv.org/abs/astro-ph/0411124].

[101] F. Markopoulou, "Towards Gravity from the Quantum," <К гравитации от квантов>, [http://arxiv.org /abs/hep-th/0604120].

[102] S.O. Bilson-Thompson, "A Topological Model of Composite Preons," <Топологическая модель составных преонов>, [http://arxiv.org/abs/hep-ph/0503213].

[103] S.O. Bilson-Thompson, F. Markopoulou, and L. Smolin, "Quantum Gravity and the Standard Model," <Квантовая гравитация и стандартная модель>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0603022].

[104] Аудиозапись обсуждения доступна на http://www.perimeterinstitute.ca/activities/scientific /cws/evolving_laws/.

16. Как вы боретесь с социологией?

[105] http://www.cosmicvariance.com/2005/11/18/a-particle-physicists-perspective.

[106] Анонимное сообщение на сайте http://groups.google.com/group/sci.physics.strings/ от String Theorist, 9 октября 2004.

[107] *Guardian Unlimited*, 20 января 2005.

[108] На статьи, где я задаю вопросы о том или ином результате теории струн, я получил три отклика, в которых корреспондент ссылался на «сильное» сообщество теории. Как в этом: «Хотя конечность [ряда] возмущений (или предположение Малдасены, или S-дуальность) не удалось доказать, никто в сильном сообществе теории не верит, что это может быть ложным». Один раз может быть совпадение; после трех раз это классическая фрейдистская обмолвка. Как много от социологии струнной теории является лишь желанием всеми-весьма-узнаваемого человека захотеть быть частью сильнейшей из существующих групп?

[109] S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, and S. Trivedi, "De Sitter Vacua in String Theory," <Вакуумы де Ситтера в теории струн>, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0301240].

[110] http://groups.google.com/group/sci.physics.strings/, 6 апреля 2006.

[111] L. Smolin, «Did the Universe Evolve?» <Развивалась ли вселенная?> *Class. Quant. Grav*., 9(1): 173-91 (1992).

[112] http://www.ipm.ac.ir/IPM/news/connes-interview.pdf (используется с разрешения).

[113] Michael Duff, *Physics World*, Dec. 2005.

[114] http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/qg_ss.html.

[115] Однако, я рад сообщить, что в Сети нетрудно найти введения в теорию струн, которые *не* делают искаженные или преувеличенные утверждения. Вот некоторые примеры: http://tena4.vub.ac.be /beyondstringtheory/index.html; http://www.sukidog.com/jpierre/strings/; http://en.wikipedia.org/wiki/M-theory.

[116] S. Mandelstam, "The N-loop String Amplitude – Explicit Formulas, Finiteness and Absence of Ambiguities," < N-петлевая струнная амплитуда – явные формулы, конечность и отсутствие неоднозначностей>, *Phys. Lett*. B, 277(1-2): 82-88 (1992).

[117] Вот несколько примеров: J. Barbon, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0404188], *Eur. Phus. J*., C33: S67-S74 (2004); S. Foerste, [http://arxiv.org/abs/hep-th/0110055], *Fortsch. Phys*., 50: 221-403 (2002); S.B. Giddings, [http://arxiv.org/abs/hep-ph/0501080]; и J. Antoniadis and G. Ovarlez, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9906108]. Редким примером обзора с тщательным и корректным (на данный момент) обсуждением проблемы конечности является L. Alvarez-Gaume and M.A. Vazquez-Mozo, [http://arxiv.org/abs/hep-th/9212006].

[118] Это статья Андрея Маршакова (*УФН*, 172(9): 977-1020 (2002) или *Phys. Usp*., 45: 915-54 (2002), [http://arxiv.org/abs/hep-th/0212114]). Я извиняюсь за технический язык, но, возможно, читатель сможет увидеть суть:

"К сожалению, десятимерная суперструна, претендующая на роль наиболее успешной из существующих струнных моделей, строго определена, вообще говоря, лишь на древесном и однопетлевом уровнях. Начиная с двухпетлевых струнных поправок в амплитуды рассеяния все выражения в пертурбативной теории суперструн по сути дела не определены. Причиной этого являются хорошо известные проблемы с супергеометрией или интегрированием по «суперпартнерам» модулей комплексных структур. В отличие от бозонного случая, где мера интегрирования фиксируется теоремой Белавина-Книжника, определение меры интегрирования по супермодулям (или, точнее, нечетным модулям суперкомплексных структур) все еще является нерешенной задачей ... . Пространства модулей комплексных структур римановых поверхностей некомпактны, и интегрирование по таким пространствам требует специальной заботы и дополнительных определений. В бозонном случае, где интегралы по пространствам модулей расходятся, результат интегрирования ... определен, вообще говоря, с точностью до «граничных членов» (вкладов вырожденных римановых поверхностей или поверхностей меньшего рода (с меньшим числом «ручек»)). В случае суперструны возникают гораздо более существенные проблемы из-за того, что само понятие «границы пространства модулей» не определено. На самом деле интеграл по грассмановым нечетным переменным «не знает», что такое «граничный член». Это является фундаментальной причиной того, что мера интегрирования в фермионной струне плохо определена и зависит от «выбора калибровки» или отдельного выбора «нулевых мод» полей ... в действии ... . Для двухпетлевых вкладов эти проблемы могут быть решены «эмпирически» (...), но, вообще говоря, суперструнная теория возмущений не является в математическом смысле определенной процедурой. Более того, данные проблемы не являются «чистыми» проблемами формализма, те же самые трудности возникают в менее геометрическом подходе Грина и Шварца..."

[119] Вот электронное письмо от Мандельштама, датированное 8 июня 2006:

"По поводу моей статьи о конечности n-петлевой струнной амплитуды позвольте мне, во-первых, заметить, что расходимости могут появляться только тогда, когда пространство модулей вырождается. Я исследовал точки вырождения, связанные с «дилатонной» расходимостью, с которой имеют дело струнные теоретики. Я показал, что аргументы, применявшиеся ранее к однопетлевой амплитуде, могут быть распространены на n-петлевую амплитуду, а также, что соответствующие неоднозначности в определении контура интегрирования по однородным супермодулям могут быть разрешены с использованием однозначного предписания, согласующегося с унитарностью. Я согласен, что это не обеспечивает математически строгое доказательство конечности, но я уверен, что это работает в физических проблемах, которые могли бы привести к бесконечностям. Я не исследовал другого источника бесконечностей, известного с ранних дней дуальных моделей, а именно использования мнимого времени. Множитель *exp(iEt)*, где *E* есть разница между текущей и начальной энергиями, явно может расходиться, если интегрирование проводится по мнимому времени. Есть уверенность из физических соображений, что такие бесконечности могут быть

удалены аналитическим продолжением на реальное время. Это было явно показано для беспетлевой [древесной] и однопетлевой амплитуды, и было показано, что аналитическое продолжение, приводящее к конечности, может быть определено для двухпетлевой амплитуды."

[120] G.T. Horowitz and J. Polchinski, "Gauge/gravity duality," <Калибровочно-гравитационная дуальность> [http://arxiv.org/abs/gr-qc/0602037]. К публикации в *Towards Quantum Gravity, <По направлению к квантовой гравитации>*, ed. DanieleOriti, Cambridge University Press.

[121] http://golem.ph.utexas.edu/~distler/blog/archives/000404.html.

[122] Irving Janis, *Victims of Groupthink: A Psychological Study of Foreign-Policy Decision and Fiascoes <Жертвы группового мышления: психологическое исследование внешнеполитических решений и провалов>* (Boston: Houghton Mifflin, 1972), p. 9. Конечно, явление намного старше. Джон Кеннет Гэлбрэйт, влиятельный экономист, назвал это «традиционной мудростью». Он имел в виду под этим «убеждения, которые, хотя и недостаточно хорошо обоснованы, столь широко приняты среди богатых и влиятельных, что только опрометчивые и безрассудные будут подвергать опасности свои карьеры, не соглашаясь с ними». (Из обзора книг в *Financial Times*, Aug. 12, 2004).

[123] Irving Janis, *Crucial Decisions: Leadership in Policymaking and Crisis Management <Ключевые решения: лидерство в проведении политики и кризисном управлении>* (New York: Free Press, 1989), p. 60.

[124] http://oregonstate.edu/instruct/theory/grpthink.html.

[125] Другим примером является ошибочное доказательство невозможности существования скрытых переменных в квантовой теории, опубликованное Джоном фон Нейманом в 1932 и широко цитировавшееся в течение тридцати лет, пока квантовый теоретик Дэвид Бом не нашел теорию скрытых переменных.

17. Что есть наука?

[126] См. Paul Feyerabend, *Killing Time: The Autobiography of Paul Feyerabend <Момент убивания: автобиография Пауля Фейерабенда>* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1996).

[127] См., например, Karl Popper, *The Logic of Scientific Discovery <Логика научного открытия>* (New York: Routhledge, 2002).

[128] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions <Структура научных революций>* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1962).

[129] Imre Lacatos, *Proof and Refutations <Доказательство и опровержения>* (Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1976).

[130] Леонард Сасскайнд, защищая применимость антропного обоснования, назвал его критиков *Поппераццi* за призывы к необходимости каких-нибудь возможностей фальсификации. Но принять критику установок Поппера, что фальсификация является только частью истории того, как работает наука, это только одно дело, и совсем другое дело защищать применимость научных оснований теории, которая не делает однозначных или специальных предсказаний, с помощью которые она могла бы или быть фальсифицирована или подтверждена. В этой связи я горд быть *Попперaццo*.

[131] Alexander Marshack, *The Roots of Civilization: The Cognitive Beginnings of Man"s First Art, Symbol, and Notation <Корни цивилизации: познавательные начала первого человеческого искусства, символа и*

понятия> (New York: McGraw-Hill, 1972).

[132] D.H. Wolpert and W.G. Macready, *No Free Lunch Theorems for Search, <Теоремы об «отсутствии бесплатных завтраков» для исследований*> Technical Report, Santa Fe Institute, SFI-TR-95-02-010.

[133] Richard P. Feynman, «What is Science?» <Что есть наука?> *The Physics Teacher*, Sept. 1969.

18. Пророки и ремесленники

[134] Цитируется по Simon Singh, "Even Einstein Had His Off Days," <Даже Эйнштейн имел свои выходные> *New York Times*, Jan. 2, 2005.

[135] См., например, Mara Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution <Квантовые диалоги: осуществление революции*> (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1999).

[136] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions <Структура научных революций*> (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1962).

[137] Неопубликованное письмо Эйнштейна к Тортону (R.A. Thorton) от 7 декабря 1944 (EA 6-574), Einstein Archive, Hebrew University, Jerusalem. Цитируется в Don Howard, «Albert Einstein as Philosopher of Science» <Альберт Эйнштейн как философ науки> *Physics Today*, Dec. 2005.

[138] T. Jacobson and L. Smolin, "Nonperturbative Quantum Geometries," <Непертурбативные квантовые геометрии> *Nucl. Phys*. B, 299: 295-345 (1988).

[139] См., например, L. Crane, «Clock and Category: Is Quantum Gravity Algebraic?» <Часы и категории: является ли квантовая гравитация алгебраической?> [http://arxiv.org/abs/gr-qc/9504038]; *J. Math. Phys*., 36: 6180-193 (1995).

[140] См., например, F. Markopoulou, "An Insider's Guide to Quantum Causal Histories," <Руководство инсайдера к квантовым причинным историям> [http://arxiv.org/abs/hep-th/9912137]; *Nucl. Phys*. B, Proc. Supp., 88(1): 308-13 (2000).

[141] Seth Lloyd, *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes On the Cosmos <Программирование вселенной: ученый по квантовым компьютерам берется за космос*> (New York: Alfred A. Knopf, 2006).

[142] Я должен тут еще раз подчеркнуть, что я говорю только о людях с хорошей подготовкой целиком до уровня доктора философии. Обсуждение не касается дилетантов или людей, которые не понимают, что такое наука.

[143] L. Smolin, "On The Nature of Quantum Fluctuations and Their Relation to Gravitation and the Principle of Inertia," <К природе квантовых флуктуаций и их связи с гравитацией и принципом инерции> *Class. Quant. Grav*., 3: 347-59 (1986).

[144] Julian Barbour, *The End of Time: The Next Revolution in Physics <Конец времени: следующая революция в физике*> (New York: Oxford Univ. Press, 2001).

[145] D. Finkelstein, "Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle," <Асимметрия прошлого и будущего гравитационного поля точечной частицы> *Phys. Rev*., 110: 965-67 (1958).

[146] Antony Valentini, *Pilot Wave Theory of Physics and Cosmology <Теория управляющей волны в физике и космологии>* (Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, в печати).

[147] Здесь приводится часть письма от национального научного фонда в адрес физика Университета Нотр Дам Джеймса Кашинга в 1995 с отклонением его просьбы поддержать его работу по основаниям квантовой теории:

«Предмет рассмотрения, соревнование Копенгагенской и причинной (Бом) интерпретаций квантовой теории, обсуждался долгие годы и, по мнению нескольких членов Физического отдела Национального научного фонда, ситуация урегулирована. Причинная интерпретация не согласуется с экспериментами, которые проверяли неравенства Белла. Следовательно, ... фондирование ... исследовательской программы в этой области было бы неразумным.

Поразительной вещью по поводу этого письма является то, что оно содержит элементарную ошибку, которая к тому времени была хорошо понята экспертами, что причинная интерпретация полностью согласуется с экспериментами по проверке неравенств Белла. Между прочим, Кашинг был успешным физиком в области элементарных частиц, прежде чем переключил свои интересы на основания квантовой теории, но это не удержало Национальный научный фонд от прекращения его финансирования.»

[148] D. Deutsch, *Proc. Roy. Soc*. A, 400: 97-117 (1985).

[149] David Deutsch, *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes and Its Implications <Ткань реальности: наука параллельных вселенных и ее следствия>* (London: Penguin, 1997).

[150] P.W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on Quantum Computer," <Полиномиальные временные алгоритмы для начального разложения логарифмов для квантового компьютера> [http://arxiv.org/abs/quant-ph/9508027].

[151] A. Valentini, «Extreme Test of Quantum Theory with Black Holes» <Особая проверка квантовой теории с помощью черных дыр> [http://arxiv.org/abs/astro-ph/0412503].

[152] Alexander Grothendieck, *Recoltes et Semailles, <Сбор урожая>* 1986, английский перевод Роя Лискера, http://www.grothendieck-circle.org, глава 2.

19. Как на самом деле работает наука

[153] Имеется неприятное исключение из этого, когда профессор пугается самого себя юного и отказывается от юношеского принимающего риски духа в пользу научного консерватизма. Напоминать кому-нибудь моложе себя что-то подобное в целом не является хорошей идеей.

[154] См., например, «A Study on the Status of Women Faculty in Science of MIT» <Изучение статуса женского профессорско-преподавательского состава в науке Массачусетского технологического института>, том XI, Л4, март 1999, доступно в Сети по адресу: http://web.mit.edu/fnl/women/women.html. Больше информации по проблеме женщин в науке имеется в Американском физическом обществе по адресу: http://www.aps.org/studentsandeducators/ и в комитете по разнообразию профессорско-преподавательского состава Гарвардского университета по адресу: http://www.aps.org/.

[155] James Glanz, "Even Without Evidence, String Theory Gains Influence," <Даже без всякого подтверждения теория струн набрала уважения> *New York Times*, March 13, 2001.

[156] Gary Taubes, *Nobel Dreams: Power, Deceit and the Ultimate Experiment <Нобелевские мечты: власть, обман и конечный эксперимент>* (New York: Random House, 1986), pp. 254-55.

[157] Isador Singer, из интервью, опубликованного он-лайн по адресу: http://www.abelprisen.no/en/prisvinnere/2004/interview_2004_1.html.

[158] Alain Connes, интервью, доступное по адресу: http://www.ipm.ac.ir/IPM/news/connes-interview.pdf.

Благодарности

Книга начинается с идеи, и заслуга за нее принадлежит Джону Брокману за ощущение, что я хотел сделать нечто большее, чем написать тусклую академическую монографию на тему взаимосвязи между демократией и наукой. Это одна из тем данной книги, но, как он и предвидел, аргументы становятся намного более мощными, когда разрабатываются в контексте конкретной научной полемики. Я в долгу перед ним и перед Катинкой Мэтсон за их продолжающуюся поддержку и за приглашение меня в сообщество, которое содержит в себе третью культуру. Предложив мне среду, которая выходит за рамки моей специализации, они изменили мою жизнь.

Ни один писатель не мог бы иметь лучшего редактора, чем Аманда Кук, а степень, до которой все, что тут есть хорошего, является следствием ее руководства и вмешательства, стыдно признать. Сара Липпинкотт завершила работу с такой элегантностью и точностью, которая добила бы любого писателя. Я имел честь работать с ними обеими. Холли Бемисс, Уилл Винсент и каждый в издательстве Houghton Mufflin заботился об этой книге с энтузиазмом и мастерством.

За последние десятилетия многие коллеги уделили время, чтобы обучить меня теории струн, суперсимметрии и космологии. Среди них я особенно признателен Ниме Аркани-Хамеду, Тому Бэнксу, Майклу Дину, Жаку Дистлеру, Майклу Грину, Брайану Грину, Гэри Хоровицу, Клиффорду Джонсону, Ренате Каллош, Хуану Малдасене, Любошу Мотлю, Германну Николаи, Аманде Пит, Майклу Пескину, Джо Полчински, Лайзе Рэндалл, Мартину Рису, Джону Шварцу, Стиву Шенкеру, Полу Стейнхардту, Келлогу Штелле, Эндрю Строминджеру, Леонарду Сасскайнду, Кумруну Вафе и Эдварду Виттену за их время и терпение. Если мы все еще не согласны друг с другом, я надеюсь, ясно, что эта книга не является конечной установкой, а лишь тщательно структурированным аргументом, предназначенным быть вкладом в продолжающееся общение, который предпринят с уважением и вне восхищения их усилиями. Если мир окажется одиннадцатимерным и суперсимметричным, я буду первым аплодировать их триумфу. Но в настоящее время я заранее благодарен им, что они позволили мне объяснить, почему после многих раздумий я больше не верю, что это возможно.

Это не история науки, но я рассказываю истории, и некоторые друзья и коллеги щедро выделили свое время, чтобы помочь мне рассказать правдивые истории, а не сохранять мифы. Джулиан Барбур, Джо Кристиан, Гарри Коллинз, Джон Стэйчел и Андрей Старинец предоставили мне детальные научные заметки на целую рукопись. Ошибки, которые, конечно, остались, являются ответственностью меня одного, так как являются следствием отбора, который производился, чтобы сделать книгу настолько общедоступной, насколько это возможно. Поправки и дальнейшие мысли можно присылать на интернет-страничку, связанную с этой книгой. Среди других друзей и членов семьи, которые прочитали рукопись и предложили очень полезную критику, Клифф Баргесс, Говард Бартон, Маргарет Геллер, Джем Гомис, Дина Грасер, Стюарт Кауфманн, Джерон Ланье, Жанна Левин, Жоао Магуэйджо, Патриция Марино, Фотини Маркопоулоу, Карло Ровелли, Майкл Смолин, Паулина Смолин, Роберто Мангабейра Унгер, Антони Валентини и Эрик Вайнштейн. Крис Халл, Джо Полчински, Пьер Рамон, Жорж Руссо, Моше Розали, Джон

Шварц, Эндрю Строминджер и Аркадий Цейтлин также помогли прояснить специфические факты и проблемы.

В течение многих лет мои исследования комфортно поддерживались Национальным научным фондом, за что я остаюсь весьма благодарным. Но мне экстраординарно повезло столкнуться с тем, кто спросил меня: «Что ты на самом деле мог бы сделать? Какова твоя самая амбициозная идея?» Так неожиданно и щедро Джеффри Эпштейн дал мне шанс попытаться получить хорошую выгоду из моих ответов, и за это я всегда буду глубоко признателен.

Эта книга частично посвящена оценке того, как должно управляться научное сообщество, и я был рад поучиться у некоторых из тех, кто был пионером в исследованиях квантового пространства-времени: Стэнли Дезера, Дэвида Финкельштейна, Джеймса Хартли, Криса Исхама и Роджера Пенроуза. Я не смог бы достичь ничего в этом исследовании, если бы не было сотрудничества и поддержки Абэя Аштекара, Джулиана Барбура, Луи Кране, Теда Джекобсона и Карло Ровелли. Я также обязан моим более ранним соратникам Стефону Александеру, Мохаммаду Ансари, Олафу Дрейеру, Джерзи Ковальски-Гликман, Жоао Магуэйджо и, особенно, Фотини Маркопоулоу за непрерывную критику и споры, которые сохранили меня честным и блокировали все попытки воспринимать себя слишком серьезно. Необходимо также сказать, что наша работа не имела бы смысла без широкого сообщества физиков, математиков и философов, которые игнорируют академическую моду, чтобы посвятить себя работе над фундаментальными проблемами физики. Эта книга, прежде всего, посвящена им.

Моя работа и жизнь была бы куда беднее без поддержки друзей, которые дали возможность мне как заниматься наукой, так и прийти к пониманию ее более общего состояния. К ним относятся Сен Клер Кеми, Жерон Ланье, Донна Мойлан, Элизабет Тарк и Мелани Уолкер.

Каждая книга пишется в духе места. В моем случае сначала было два таких места: Нью Йорк и Лондон. Эта книга несет дух Торонто; Пико Айер назвал его городом будущего, и я полагаю себя счастливым знать, почему. За гостеприимство к иммигранту в неопределенный момент сентября 2001 я благодарю за все Дину Гразер, но также и Чарли Трэйси Макдугал, Оливию Миззи, Ханну Санчес и парней из Килевого клуба Дальнего Харбора (Outer Harbour Centreboard Club) (если вы не видите меня на воде с последней весны, то именно поэтому!).

За приглашение меня сюда я благодарю Говарда Бартона и Майка Лазардиса. Я не знаю большего акта дальновидности и поддержки науки, чем основание ими Пограничного института теоретической физики. С их верой в будущее науки и их продолжающейся преданности успеху института, они заслуживают высшей награды, которую может дать любой, кто заботится о науке. Я питаю к ним огромную благодарность за предоставленную возможность, которую они для меня открыли, как в личном, так и в научном смысле.

Несмотря на общий авантюризм и сомнения при создании института и сообщества, все возможные благодарности Клиффорду Баргессу, Фредди Качазо, Лауренту Фрейделю, Джему Гомису, Дэниэлю Готтесману, Люсьену Харди, Джастину Хоури, Раймонду Лафламме, Фотини Маркопоулоу, Мишель Моска, Робу Майерсу, Томасу Тиеманну, Антони Валентини и многим другим, слишком многочисленным, чтобы их перечислить, которые рисковали своими карьерами, чтобы сделать вклад в это рискованное предприятие. И хотя нет необходимости об этом говорить, позвольте мне подчеркнуть, что каждое слово в этой книге является моим собственным взглядом и ни в коей мере не отражает ни официальной, ни неофициальной точек зрения Пограничного института, его ученых или его основателей. Наоборот, эта книга стала возможной благодаря моему членству в сообществе ученых, которые приветствуют честное научное несогласие и которые знают, что живая дискуссия не станет на пути дружбы или совместных усилий, чтобы делать науку. Если бы было намного больше мест, подобных Пограничному институту, я не почувствовал бы необходимости писать эту книгу.

Наконец, моим родителям за их продолжающуюся безоговорочную любовь и поддержку и Дине за все, что делает жизнь счастливой, которые делают все, о чем эта книга, с присущей им точки зрения.