

• New Science

ЛЕОНАРД САСКИНД

КОСМИЧЕСКИЙ  
ЛАНДШАФТ

Теория струн и иллюзия  
разумного замысла Вселенной



LEONARD SUSSKIND

.....

**THE COSMIC  
LANDSCAPE**

.....

String Theory and the  
Illusion of Intelligent Design

Little, Brown and Company  
New York Boston



ЛЕОНАРД САССКИНД

.....

# КОСМИЧЕСКИЙ ЛАНДШАФТ

.....

Теория струн и иллюзия  
разумного замысла Вселенной



Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж  
Ростов-на-Дону · Екатеринбург · Самара · Новосибирск  
Киев · Харьков · Минск

2015

ББК 24.632  
УДК 524.882  
С12

**Сасскинд Л.**

- С12 Космический ландшафт. Теория струн и иллюзия разумного замысла Вселенной. — СПб.: Питер, 2015. — 448 с.: ил. — (Серия «New Science»).
- ISBN 978-5-496-01166-2

Леонард Сасскинд, известный американский физик и один из создателей теории струн, в свое время предложил революционную концепцию понимания Вселенной и места человека в ней. Своими исследованиями Сасскинд вдохновил целую плеяду современных физиков, которые поверили, что эта теория сможет однозначно предсказать свойства нашей Вселенной. Теперь же в своей первой книге для широкого круга читателей Сасскинд уточняет и переосмысливает свои взгляды, утверждая, что данная идея отнюдь не универсальна и ей придется уступить место гораздо более широкому понятию гигантского «космического ландшафта».

Исследования начала XXI века позволили науке подняться на новую ступень в познании мира, утверждает Сасскинд. И эта увлекательная книга, переносящая читателя на передовую сражений в современной физике, — яркое тому подтверждение.

**12+** (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ББК 24.632  
УДК 524.882

В оформлении обложки использованы иллюстрации shutterstock.com по специальному соглашению по многопользовательской лицензии.

Права на издание получены по соглашению с HarperCollins Publisher Inc. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-0316013338 англ.  
ISBN 978-5-496-01166-2

© Little, Brown and Company  
© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2015  
© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2015



## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	<b>8</b>
<b>Введение</b> .....	<b>12</b>
<b>Глава 1. Фейнмановский мир</b> .....	<b>28</b>
Природа дрожит .....	34
Фейнмановские диаграммы .....	52
Законы Физики .....	75
<b>Глава 2. Мать всех физических проблем</b> .....	<b>79</b>
Худшее из когда-либо сделанных предсказаний .....	82
Стивен Вайнберг произносит «запретное слово» .....	97
Случай отрицательной $\lambda$ .....	102
Планковская длина .....	104
<b>Глава 3. Рекогносцировка местности</b> .....	<b>110</b>
Поля .....	115
Холмы и долины .....	120
Качение по Ландшафту .....	129
<b>Глава 4. Миф об эlegantности и однозначности</b> .....	<b>133</b>
Что физики понимают под красотой .....	133
Происхождение мифов .....	142

Теория струн и развенчание мифа.....	145
Элегантна ли природа?.....	150
<b>Глава 5. Гром с небес.....</b>	<b>156</b>
Вселенная Александра Фридмана .....	156
Космологический принцип и три геометрии .....	162
Три судьбы .....	168
Геометрия судьбы .....	170
Возраст Вселенной и старейшие звезды .....	177
Решение.....	179
Сверхновые I типа .....	181
Свет творения.....	183
Инфляция .....	193
<b>Глава 6. О мороженой и варёной рыбе .....</b>	<b>201</b>
Подарок для Тини .....	202
История рыбы.....	202
Антропные Ландшафты.....	205
Немного астрофизики.....	213
Когда антропный принцип имеет смысл?.....	221
Философские возражения.....	228
<b>Глава 7. Мир на резинках .....</b>	<b>236</b>
Адроны .....	237
Происхождение теории струн .....	240
<b>Глава 8. Реинкарнация.....</b>	<b>268</b>
Компактификация.....	271
Элегантная суперсимметричная Вселенная?.....	279
Волшебная, таинственная и удивительная M-теория .....	294
<b>Глава 9. Сами по себе? .....</b>	<b>305</b>
<b>Глава 10. Браны в основании вселенской машины Руба Голдберга .....</b>	<b>318</b>
D-браны.....	321
Браны любых размерностей.....	324
Браны и компактификация.....	327



Потоки.....	332
Конифодные сингулярности.....	334
Дискретуум Буссо и Полчински.....	337
<b>Глава 11. Вселенная из мыльной пены.....</b>	<b>341</b>
Стабильность и метастабильность.....	343
Настоящая ледяная катастрофа.....	346
Клонирование пространства.....	348
Метастабильное пространство де Ситтера.....	351
Вечная инфляция.....	353
Парадоксальные отношения между детьми и родителями.....	362
Два взгляда на историю.....	366
Многомирие.....	369
<b>Глава 12. Битва при чёрной дыре.....</b>	<b>381</b>
Все права.....	390
Дополнительность чёрных дыр.....	392
Голографический принцип.....	395
Пузыри вокруг нас.....	399
<b>Глава 13. Подведение итогов.....</b>	<b>402</b>
Слоганы.....	402
Консенсус?.....	408
Законы природы эмерджентны.....	419
Естественный отбор и Вселенная.....	422
Начало инфляции.....	435
Суперструны в небесах.....	437
Высокоэнергетическая физика.....	439
<b>Эпилог.....</b>	<b>442</b>



## Предисловие

Мне всегда доставляло удовольствие объяснять физические проблемы. На самом деле это больше, чем просто удовольствие, для меня это потребность — объяснять физические проблемы. Я очень много времени трачу на, казалось бы, странное занятие, на маниловщину — на объяснение некоей воображаемой восхищённой аудитории сложных научных идей. Возможно, я выгляжу при этом глупо, но для меня это стало привычкой, и даже больше, чем просто привычкой: это стало неотъемлемой частью моей умственной деятельности, неким ментальным инструментом организации моих идей и даже — средством создания новых способов размышления над проблемами. Поэтому вполне естественно, что в определённый момент я решил попробовать написать популярную книгу. Более того, пару лет назад я уже начал писать книгу — про двадцатилетнюю дискуссию между мной и Стивенем Хокингом о судьбе информации, упавшей в чёрную дыру...

Но почти в то же самое время я обнаружил, что нахожусь в центре гигантского научного тайфуна. Бушующие в нём споры касались не только происхождения Вселенной, но и законов, управляющих ею. Свою статью «Антропный ландшафт теории струн» (*The Anthropic Landscape of String Theory*) я посвятил новой формирующейся концепции, которую назвал «Ландшафт». Статья наделала много шума в сообществе физиков и космологов, которое в настоящее время включает не только учёных, но и философов и даже богословов. Концепция

ландшафта — это идея, ломающая установленные рамки и не только затрагивающая смену парадигмы в физике и космологии, но и ставящая глубокие культурные вопросы ландшафта нашей социальной и политической жизни, такие как: «Может ли наука объяснить тот экстраординарный факт, что Вселенная, кажущаяся настолько странно и неэффективно устроенной, в то же время настолько хорошо приспособлена для нашего существования в ней?» Поэтому я решил переставить кастрюлю с чёрной дырой на дальнюю конфорку и заняться популярной книгой об этой удивительной истории. Так родился «Космический ландшафт».

Читатели этой книги, возможно, обратили внимание, что последние несколько лет научные колонки СМИ пестрят сообщениями о том, что космологи озадачены двумя удивительными «тёмными» открытиями. Первое открытие заключается в том, что 90 % вещества во Вселенной состоит из некоей таинственной скрытой субстанции, называемой *тёмной материей*. Второе открытие утверждает, что 70 % энергии во Вселенной — это некая призрачная и таинственная вещь, называемая *тёмной энергией*. Эпитеты «тайна», «таинственный» и «удивительный» повторяются в этих статьях с завидной регулярностью.

Должен признаться, что не считаю достойным исследования всё, что выглядит таинственно. Для меня слово «тайна» относится к тем вещам, которые не поддаются рациональному объяснению. Открытие тёмной материи и тёмной энергии стало сюрпризом, но никак не откровением. Физики, занимающиеся элементарными частицами (и я один из них), всегда понимали, что их теории неполны и что многие частицы до сих пор остаются неоткрытыми. Традиция постулировать существование новых труднообнаружимых частиц началась с Вольфганга Паули, который правильно угадал, что одна из форм радиоактивности связана с почти неуловимой частицей, называемой нейтрино. Тёмная материя, правда, не состоит из нейтрино, но в последнее время физики напостулировали множество частиц, достойных претендовать на роль тёмной материи. В этом нет никакой тайны — только трудности выявления и обнаружения подобных частиц.

Тёмная энергия имеет больше оснований претендовать на загадочность, но основной вопрос заключается не в том, что делать с её присутствием, а в том, как объяснить её отсутствие. Физики уже больше

75 лет уверены, что существуют все основания считать пространство наполненным тёмной энергией. Таинственность здесь заключается не в самом существовании тёмной энергии, а в том, почему её так мало. Ясно лишь одно: будь тёмной энергии хотя бы немножко больше, это самым фатальным образом сказалось бы на нашем собственном существовании.

Настоящая же загадка, поднятая современной космологией, касается замалчивания присутствия «слона в комнате». Я могу добавить, что этот «слон» является полным конфузом для физиков: с какой стати вдруг Вселенная представляется нам будто бы нарочно спроектированной так, чтобы в ней могли существовать формы жизни типа нас с вами?

Этот вопрос озадачил учёных и в то же время воодушевил сторонников ложного комфорта креационистского мифа. Ситуация во многом напоминала положение в додарвиновской биологии, когда мыслители не могли понять, как без направляющей естественные физические и химические процессы божественной руки возможно возникновение чего-либо столь сложного, как человеческий глаз. Как и глаз, отдельные физические параметры Вселенной так удивительно тонко настроены и согласованы, что этот факт требует объяснений.

Позвольте мне выйти перед строем и прямо заявить о моих собственных предубеждениях. Я категорически настаиваю, что настоящая наука требует объяснений, не апеллирующих к сверхъестественным сущностям. Я считаю, что развитие глаза определяется дарвиновскими механизмами. Кроме того, я уверен, что физики и космологи также должны найти естественное объяснение свойств нашего мира, в том числе удивительно счастливого несчастного случая, благодаря которому стало возможным наше собственное существование. Я уверен, что когда люди подставляют магию в рациональные объяснения, они не делают науки, независимо от того, насколько громко они заявляют обратное.

В прошлом большинство физиков (включая меня) предпочитали игнорировать «слона» — даже ради того, чтобы отрицать его существование. Удобнее было считать, что законы природы следуют из нескольких элегантных математических принципов и что наблюдаемое устройство Вселенной является следствием счастливого стечения обстоятельств. Но последние открытия в области астрономии, космологии, и прежде всего теории струн — не оставили физикам-теоретикам



инового выбора, кроме как серьёзно задуматься о таких вещах. Удивительно, но мы наконец-то начинаем понимать причины этого калейдоскопа совпадений. Факты, собранные для объяснения «иллюзии разумного замысла», свидетельствуют о зависимости устройства Вселенной только от физических и математических принципов и закона больших чисел. Вот, собственно, о чём мой «Космический ландшафт»: это научное объяснение наблюдаемых физических и космологических чудес и анализ философских последствий такого объяснения.

Кто же является целевой аудиторией этой книги? Ответ: все, у кого есть живой интерес к науке и желание проникнуть в тайну возникновения и устройства этого мира. Но хотя книга и адресована неспециалистам, она не для тех, кто ищет в науке «царских путей» и не привык напрягать свои мозги. Я постарался освободить книгу от уравнений и научного жаргона, но не от сложных концепций. Я избегал математических формул, но, с другой стороны, стремился дать точные и ясные объяснения принципов и механизмов, лежащих в основе новой формирующейся парадигмы. Понимание этой новой парадигмы будет иметь решающее значение для каждого, кто следит за дальнейшим поиском ответов на «большие вопросы».

Я благодарен многим людям, которые не всегда догадывались, что помогали мне писать эту книгу. Большинство из них — физики и космологи, чьи идеи я позаимствовал: Стивен Вайнберг, Герард 'т Хоофт, Мартин Рис, Джозеф Полчински, Рафаэль Буссо, Алан Гут, Александр Виленкин, Шамит Качру, Рената Каллош, но прежде всего Андрей Линде, который щедро делился со мной своими идеями на протяжении многих лет.

Эта книга никогда не была бы написана без поддержки моего агента Джона Брокмана и моего друга Малкольма Гриффита, читавшего и критиковавшего первые беспорядочные черновики. Он научил меня «жонглировать более чем тремя мячами» (этой идиомой Малкольм характеризовал те сложности, которые возникают при написании последовательной книги). Я в долгу перед моим редактором, а теперь и другом Лиз Нейгл из Little Brown и признателен за её выдающийся вклад в написание книги. Её заботливое руководство было бесценным.

И наконец, сверх всякой меры я благодарен моей жене Анне за её любовь, постоянную поддержку и помощь.



## *Введение*

Воздух очень холодный, и ничто, кроме моего собственного дыхания, не нарушает абсолютной тишины. Сухой рассыпчатый снег хрустит под подошвами ботинок. Его идеальная белизна под светом звезд придаёт окружающей местности зловещий блеск, в то время как звезды растворяются в непрерывном свечении, пересекающем чёрный свод небес. Ночь на этой пустынной планете ярче, чем в моём родном мире. Это холодная и безжизненная красота идеального места для метафизического созерцания — если бы такое место когда-либо существовало.

Я оставил домашний уют базы, чтобы в одиночестве подумать о событиях дня, высматривая в небе падающие звёзды. Но было невозможно думать о чём-либо другом, кроме чудовищной и безликой природы Вселенной. Фейерверк галактик, бесконечно расширяющаяся Вселенная, леденящая холодность пространства, тепло рождающихся звёзд и их предсмертная агония на стадии красных гигантов: безусловно, это должно иметь экзистенциальный смысл. Кажется, что отдельный человек и жизнь в целом не имеют отношения к работе Вселенной: маленькое пятнышко воды, капля аминокислот и щепотка углерода на булавочной головке планеты, вращающейся вокруг звезды без какой-либо цели.

Чуть раньше, во время коротких часов скупого солнечного света, Курт, Кип и я прогулялись к российскому комплексу посмотреть, сможем ли мы найти кого-нибудь из «иванов», чтобы поговорить. Стивен хотел пойти с нами, но его инвалидная коляска не приспособлена для

передвижения по сугробам. Покинутый комплекс — несколько низких ржавых построек из гофрированного металла — выглядел опустевшим. Мы постучали, но никаких признаков жизни не проявилось. Я с треском распахнул дверь и заглянул в пугающую темноту помещения, а затем, набравшись храбрости, шагнул вперёд и осмотрелся. Внутри полностью заброшенного комплекса было так же холодно, как и снаружи. Сотня или около того жилых комнат открыты и пусты. Как могла вот так за- просто исчезнуть в никуда сотня мужчин? В молчании мы побрели обратно к нашей базе.

В баре, выпивающего и смеющегося, мы нашли нашего русского — Виктора. Он, кажется, был одним из трёх последних русских, оставшихся на планете. Поставки из России прекратились более года назад. Они бы умерли от голода, но, к счастью, наши люди приютили их. Мы никогда не видели двух других россиян, но Виктор заверил нас, что они живы.

Виктор настоял на покупке мне выпивки «для согрева» и спросил: «Как вам нравится это место?» Я ответил, что во время моих путешествий только однажды видел ночное небо столь же прекрасное, как здесь. По иронии судьбы другая посещённая мной чужая планета была настолько горячее, что скалы, казалось, способны были поджарить всё, что коснётся их поверхности.

Конечно же, в реальности мы не были на другой планете. Это только казалось, что мы не на Земле. Но Антарктика действительно чужая. Стивен Хокинг, Курт Каллан, Кип Торн, Стэн Десер, Клаудио Тейтельбойм, наши жены и ещё несколько физиков были там в развлекательной поездке — она прилагалась в качестве бонуса за путешествие в Чили для участия в конференции по чёрным дырам. Клаудио, известный чилийский физик, организовал для нас перелёт на пару дней на антарктическую базу на одном из гигантских грузовых самолётов чилийских ВВС «Геркулес».

Был август 1997 года, в Южном полушарии стояла зима, и мы ожидали худшего. Самый лютый мороз, который я когда-либо переживал, — это 20 градусов<sup>1</sup> ниже нуля, и температура минус 60 градусов<sup>2</sup>, которая

<sup>1</sup> Сасскинд приводит температуру по шкале Фаренгейта:  $-20^{\circ}\text{F} = -29^{\circ}\text{C}$ . — *Примеч. пер.*

<sup>2</sup>  $-60^{\circ}\text{F} = -51^{\circ}\text{C}$ . — *Примеч. пер.*

вполне могла ожидать на базе в середине зимы, настораживала меня. Когда самолёт приземлился, мы с тревогой застёгивали на себе тяжёлое арктическое снаряжение, предоставленное военными и рассчитанное на страшный мороз.

Затем багажный отсек открылся, и жена Курта Шанталь, выглянув из самолёта, взмахнула руками и радостно прокричала нам: «Здесь не холоднее, чем в зимний день в Нью-Джерси!»<sup>1</sup>. Так оно и было. И температура оставалась такой весь день, пока мы резвились на снегу.

Но где-то в середине ночи морозное чудовище проснулось. Наутро Антарктида дала полную волю своей ярости. Я всего на пару минут выглянул на улицу, чтобы в полной мере ощутить то, что пережили Шеклтон и его люди после кораблекрушения. Как все они не погибли? Ни один член экспедиции не был потерян. Более года на ледяном морозе и пронизывающем ветру — почему все они не умерли от пневмонии? Теперь, в центре этой ревущей бури, я знал ответ: ничто не выживает здесь — даже микробы, вызывающие воспаление лёгких.

Другой чужой планетой, которую я упомянул в разговоре с Виктором, была Долина смерти — ещё одно место, лишённое жизни. Нет, не совсем лишённое. И я ещё тогда подумал, сколь горячим должен быть воздух, чтобы уж наверняка изжарить всю протоплазму. Общим для Антарктиды и Долины смерти фактором является крайняя сухость воздуха. Здесь слишком холодно, чтобы воздух мог содержать водяной пар. Низкая влажность, а также полное отсутствие светового загрязнения делают возможным увидеть свет звёзд таким, каким его редко видит современный человек. Стоя под антарктическим звёздным небом, я вдруг понял, как нам повезло, что мы — люди. Жизнь хрупка: она процветает только в узком диапазоне температур от точки замерзания до точки кипения. Нам повезло, что наша планета находится на таком «правильном» расстоянии от Солнца: немного дальше — и повсюду будет холод вечной антарктической зимы, а то и ещё хуже, чуть ближе — и поверхность будет и в самом деле поджаривать всё, что её коснётся. Виктор, будучи русским, подошёл к вопросу с духовной стороны: «Почему бы не допустить, — спросил он, — что наше существование есть проявление бесконечной любви и доброты

---

<sup>1</sup> Курт Каллан — профессор из Принстона.



Бога?» Моё собственное «бесмысленное» объяснение станет вам понятным в своё время.

На самом деле у нас гораздо больше поводов поблагодарить случай, и не только за комфортную температуру. Без нужного количества углерода, кислорода, азота и других элементов от нашего климата не было бы никакого проку. Если Солнце в центре Солнечной системы заменить на более общий случай двойной звезды<sup>1</sup>, орбиты планет окажутся слишком хаотичными и нестабильными для существования жизни. Это всего лишь один из примеров опасностей подобного рода. Но на вершине всего — сами законы природы. Стоит внести небольшие изменения в законы Ньютона или в правила атомной физики и — пшик — жизнь либо мгновенно прекратится, либо никогда не возникнет. Кажется, что наш ангел-хранитель не только предоставил нам для жизни очень доброкачественную планету, но и придумал правила существования — законы физики и космологии — прямо-таки для нас. Это одна из величайших загадок природы. Это удача? Это чей-то разумный и благожелательный замысел? И в чьей юрисдикции находится этот вопрос: науки, метафизики или религии?

Эта книга — о споре, в котором столкнулись страсти физиков и космологов, являющемся в свою очередь частью более обширной дискуссии, особенно в Соединённых Штатах, где эти споры приняли характер партизанской войны на политическом театре. По одну сторону баррикад расположились те, кто убеждён, что мир создан или разработан неким разумным агентом в благотворительных целях. По другую сторону оцетинились лезвиями Оккама трезвый научный подход, утверждающий, что Вселенная является результатом действия безликих и бескорыстных законов физики, математики и теории вероятностей — мир, так сказать, без цели. Я не отношу к первой группе библейских буквалистов, считающих, что мир создан шесть тысяч лет назад, и готовых стоять насмерть за эту идею. Я говорю о вдумчивых интеллектуалах, которые смотрят на мир и не могут поверить, будто в том, что мир настолько хорошо приспособлен для людей, повинна лишь слепая удача. Я не обвиняю этих людей в глупости. Они имеют все основания так считать.

---

<sup>1</sup> Двойная звезда представляет собой гравитационно-связанную систему из двух звёзд, обращающихся вокруг общего центра масс.

Защитники разумного замысла обычно приводят в качестве аргумента невозможность возникновения столь сложного органа, как зрительная система человека, в результате чисто случайных процессов. Это же невероятно! Но биологи, вооружённые очень мощным инструментом — принципом естественного отбора, чья объясняющая мощь велика, считают, что их доказательства решительно перетягивают чашу весов в пользу Дарвина. Чудо глаза — это всего лишь видимость чуда.

На мой взгляд, энтузиасты замысла обретают более твёрдую почву под ногами, когда речь заходит о физике и космологии. Биология является лишь частью истории творения. Законы физики и происхождение Вселенной — другая часть, и здесь опять появляются в изобилии невероятные чудеса. Кажется невероятным, чтобы набор каких-либо правил случайно привёл к чуду разумной жизни. Тем не менее именно в этом уверены большинство физиков: разумная жизнь является счастливым следствием физических принципов, не имеющих ничего общего с нашим собственным существованием. Здесь я разделяю скептицизм толпы сторонников разумного замысла: я считаю, что удача требует объяснения. Но объяснение, которое вытекает из современной физики, отличается от разумного замысла так же, как «Бульдог Дарвина» от «Мыльного Сэма» Уилберфорса<sup>1</sup>.

Дебаты, которым посвящена моя книга, это не ожесточённое политическое противостояние между наукой и креационизмом. В отличие от спора между «Бульдогом Дарвина» Томасом Хаксли и епископом Уилберфорсом, рассматриваемая дискуссия идёт не между религией и наукой, а между двумя враждующими группировками учёных — теми, кто считает, что законы природы определяются математическими соотношениями, которые просто случайно сложились так, чтобы позволить возникнуть жизни, и теми, кто считает, что законы физики в некотором роде изначально соответствуют требованиям возникновения разумной жизни. Центром кристаллизации ожесточённых споров стал

<sup>1</sup> Сэмюэль Уилберфорс — англиканский епископ, прозванный Мыльным Сэмом за скользкость в церковных дебатах. Томас Хаксли — английский зоолог, популяризатор науки и защитник эволюционной теории Чарльза Дарвина, прозванный за свои яркие полемические выступления «Бульдогом Дарвина». Мыльный Сэм саркастически спросил Хаксли, кто из его предков, бабушка или дедушка, был мартышкой? Хаксли ответил: «Я бы скорее согласился быть потомком обезьяны, чем продажного болтуна».

*антропный принцип* — гипотетический принцип, который говорит, что мир-де так прекрасно устроен, чтобы мы здесь могли его наблюдать! Со своей стороны хочу заметить, что в такой формулировке не больше смысла, чем в утверждении, что причина возникновения глаза в том, чтобы кто-то смог прочитать эту книгу. На самом деле это лишь усечённый вариант гораздо более богатого набора концепций, о которых я расскажу в следующих главах.

Но полемика среди учёных стала поводом к более широкой общественной дискуссии. Неудивительно, что она вышла за пределы семинарских аудиторий и научных журналов и переросла в политические дебаты о разумном замысле и креационизме. И христианские интернет-сайты ринулись в бой.

Библия говорит:

*«Ибо невидимое Его, вечная сила Его и Божество, от создания мира через рассматривание творений видимы, так что они безответны»*<sup>1</sup>. — *Его вечная власть и Божественная природа. Поэтому нет им прощения за незнание Бога.*

*Это неоспоримая истина. В некотором смысле, с открытием антропного принципа это стало ещё более верно, чем когда-либо прежде. Поэтому главное доказательство, которым мы обладаем, — это само сотворение Вселенной, несущее на себе подпись Бога: Вселенная сотворена так, чтобы мы могли в ней жить.*

Или с другого религиозного сайта<sup>2</sup>:

*В своей книге «Космический эскизный проект» (The Cosmic Blueprint) профессор астрономии Пол Дэвис подытоживает решающее доказательство замысла:*

<sup>1</sup> К римлянам, 1:20. Синодальный перевод. — *Примеч. пер.*

<sup>2</sup> Я не в курсе религиозных убеждений Дэвиса или Гринстайна, но я бы с осторожностью относился к слишком буквальному толкованию их заявлений. Физики часто используют такие термины, как «замысел», «агент» и даже «Бог» в качестве метафоры для обозначения непознанного. Я использовал термин «агент» в популярной статье и до сих пор сожалею об этом. Эйнштейн часто говорил: «Господь утончён, но не злонамерен», «Бог не играет в кости», «Я хочу знать, как Бог создал мир». Большинство комментаторов считают, что Эйнштейн использовал термин «Бог» в качестве метафоры для упорядоченного набора законов природы.

*«Профессор сэр Фред Хойл, отнюдь не симпатизирующий христианству, говорит, что всё выглядит так, будто суперинтеллект забавляется с физикой, а также с химией и биологией».*

*А астроном Джордж Гринстайн замечает:*

*«После анализа всех свидетельств возникает навязчивая мысль о том, во Вселенной должны действовать некие сверхъестественные агенты или, скорее, Агенты. Возможно ли, что вдруг, сами того не желая, мы наткнулись на научные доказательства существования некоего высшего существа? Был ли это Бог, который пришёл и так чудесно создал космос для нашего блага?»*

Стоит ли удивляться, что антропный принцип доставляет физикам столько неудобств?

Дэвис и Гринстайн — серьёзные исследователи, а Хойл — один из величайших учёных XX века. Как они отмечают, видимость разумного замысла не вызывает сомнений<sup>1</sup>. Для возможности существования жизни необходимо сочетание невероятных факторов. Нам потребуется несколько глав, чтобы полностью разобраться с этим «слоном в комнате», но давайте начнём с азов.

Мир, каким мы его знаем, весьма нестабилен, и в этом смысле он представляет особый интерес для физиков. Существует множество вариантов, при которых всё может пойти плохо, настолько плохо, что существование жизни в том виде, в каком она нам известна, станет совершенно невозможным. Условия, которым должен удовлетворять мир, похожий на наш и допускающий существование жизни, можно разделить на три набора требований. Первый набор включает сырьё, необходимое для существования жизни: химические вещества, поскольку жизнь — это химический процесс. Что-то в природе атомов заставляет их соединяться в самых причудливых комбинациях, образуя гигантские молекулы жизни — ДНК, РНК, сотни белков и всё остальное. На самом деле химия — это раздел физики, а конкретно — физики валентных электронов, которые обращаются вокруг ядра на самых удалённых орбитах. Валентные электроны перескакивают от

<sup>1</sup> Будет ли это предложение вырвано из контекста на одном из религиозных сайтов? Надеюсь, что нет.



одного атому к другому либо обобществляются атомами, что и позволяет атомам проявлять свои удивительные способности.

Законы физики начинаются со списка элементарных частиц, таких как электроны, кварки и фотоны, и каждая обладает собственными уникальными свойствами, например массой и электрическим зарядом. Из этих объектов построено всё остальное. Никто не знает, почему этот список именно такой и почему элементарные частицы обладают именно такими свойствами. Можно составить бесчисленное множество других подобных списков, но Вселенная, допускающая существование жизни, не терпит произвола в этом вопросе. Удаление из списка любой из этих элементарных частиц — электрона, фотона или кварка — или даже незначительное изменение любого из их свойств приведёт к полному коллапсу обычной химии. В отношении электронов и кварков всё очевидно: из кварков состоят протоны и нейтроны, образующие атомные ядра, которые, в свою очередь, вместе с электронами образуют атомы. Без них атомы не могли бы существовать. Не столь очевидна важность существования фотонов. В следующих главах мы познакомимся с природой электромагнитных и гравитационных взаимодействий, пока же вам достаточно знать, что фотоны с их уникальными свойствами ответственны за существование электромагнитных сил, удерживающих электроны в атомах и атомы в химических соединениях.

Если законы природы кажутся идеально подходящими для существования химии, то так же хорошо они приспособлены и для удовлетворения второму набору требований, а именно требованиям к характеру эволюции Вселенной, допускающему наше комфортное существование. Крупномасштабные свойства Вселенной — её размеры, скорость расширения, существование галактик, звёзд и планет — в основном регулируются силой гравитации. Теория гравитации Эйнштейна — Общая теория относительности — описывает расширение Вселенной из первоначального сверхгорячего и сверхплотного сгустка, образовавшегося после Большого взрыва, до её нынешних огромных размеров. Казалось бы, свойства гравитации, особенно величину гравитационных сил, можно легко изменить. Слабость гравитационного взаимодействия остаётся по-настоящему

необъяснимым чудом<sup>1</sup>. Гравитационное притяжение между электроном и атомным ядром в десять тысяч миллиардов миллиардов миллиардов миллиардов раз слабее электрического. Но будь гравитационное взаимодействие хотя бы немного сильнее, Вселенная проэволюционировала бы так быстро, что на возникновение разумной жизни в ней не осталось бы времени.

Гравитация играет ведущую роль в развёртывании Вселенной. Она является причиной конденсации вещества — водорода, гелия и так называемой тёмной материи — в сгустки галактик, звёзд и, наконец, планет. Но чтобы это произошло, очень ранняя Вселенная должна быть слегка «комковатой». Если бы исходный материал Вселенной был распределён равномерно, он и оставался бы таким в течение всего времени. Выходит, что 14 миллиардов лет назад Вселенная уже состояла из множества комков. Будь комки немного больше или немного меньше, и не сформировались бы ни галактики, ни звёзды, ни планеты и жизни было бы негде развиваться.

Наконец, Вселенная имеет определённый химический состав. В начале были только водород и гелий. Разумеется, для формирования жизни этого недостаточно. Углерод, кислород и остальные элементы возникли позже. Они сформировались в ходе ядерных реакций внутри звёзд. Но способность звёзд превращать водород и гелий в наиболее важный для жизни углерод является очень деликатным делом. Небольшие изменения в законах электромагнетизма и ядерной физики способны предотвратить образование ядер углерода.

Кроме того, после образования углерода, кислорода и других биологически важных элементов внутри звёзд они должны были освободиться оттуда, чтобы предоставить материал для формирования планет и возникновения жизни, — мы ведь не можем жить в горячих недрах звёзд. Каким же образом этим элементам удалось покинуть звёздные недра? Ответ: в результате взрывов сверхновых.

Взрыв сверхновой сам по себе замечательный феномен. В дополнение к нейтронам, электронам, фотонам и гравитации для обеспечения

---

<sup>1</sup> Для экспертов: слабость гравитационных сил эквивалентна легкости обычных элементарных частиц. Проблема малости масс частиц называется *проблемой калибровочной иерархии*. Несмотря на наличие интересных идеи, консенсуса в её решении пока нет.

взрыва сверхновой необходим ещё один тип элементарных частиц — нейтрино. Вылетая из коллапсирующей звезды, нейтрино создают давление, выталкивающее наружу все остальные частицы. К счастью, в нашем списке элементарных частиц присутствуют и нейтрино, при том с нужными свойствами.

Как я уже сказал, мир, полный биологических явлений, отнюдь не соответствует общим ожиданиям. Среди множества возможных вариантов списков элементарных частиц и различных взаимодействий это очень редкое исключение. Но достаточно ли исключительно это исключение, чтобы оправдать введение новой радикальной парадигмы, включающей антропный принцип? Если бы наши суждения основывались только на тех вещах, о которых я уже рассказал, нам не удалось бы привести к консенсусу даже тех, кто открыт для антропных идей. Большинство тонких настроек, необходимых для существования жизни, всё же допускают некоторый разброс, не позволяющий отвергать вероятность случайного везения. Возможно — а в это всегда верили физики, — в конце концов будет обнаружен математический принцип, который объяснит существование именно такого списка частиц и констант, и множество счастливых совпадений окажется не более чем множеством счастливых совпадений. Но существует одна тонкая настройка (я расскажу о ней в главе 2), которая в высшей степени невероятна. Она являлась вселенской головоломкой для физиков в течение пятидесяти лет. Единственное её объяснение, если только его можно назвать объяснением, — это антропный принцип.

Сформулирую ещё один парадокс: «Можем ли мы надеяться когда-нибудь объяснить чрезвычайно доброжелательный характер физических законов нашего собственного мира без апелляции к сверхъестественному разуму, когда антропный принцип с его помещением разумной жизни на центральное место в объяснении свойств нашей Вселенной выглядит как предположение, будто кто-то, некий агент, наблюдает за человечеством?» Эта книга о формировании новой физической парадигмы, которая тоже использует антропный принцип, но особым способом, предполагающим полностью научное объяснение наблюдаемой щедрости Вселенной, — при помощи *физического дарвинизма*, как я его называю.

Каковы же законы физики, о которых я говорил? Как они сформулированы? До тех пор, пока не появился Ричард Фейнман, единственным инструментом, который использовали теоретики для выражения законов физики, были загадочные непроходимые уравнения квантовой теории поля — настолько сложные, что даже у математиков были проблемы с их пониманием. Но сверхъестественная способность Фейнмана визуализировать физические явления в корне изменила ситуацию. Он придумал, как обобщить законы элементарных частиц в виде несколько простых рисунков. Фейнмановские диаграммы и законы физики элементарных частиц, известные физикам как *стандартная модель*, будут предметом главы 1.

Действительно ли Вселенная и законы природы настолько сбалансированы? Вторую главу, которую я назвал «Мать всех физических проблем», правильнее было бы назвать «Мать шаткого равновесия». Если законы элементарных частиц перенести на законы гравитации, результатом станет потенциальная катастрофа: мир, в котором небесные тела поведут себя подобно элементарным частицам, будет разорван на куски самой разрушительной силой, какую только можно себе вообразить. Единственный выход из этого кошмара — подобрать значение одной из констант, *космологической постоянной* Эйнштейна, настолько точно, что никому даже в голову не придёт, что это значение могло возникнуть случайным образом.

Космологическая постоянная была введена Эйнштейном вскоре после завершения его теории гравитации, и вот уже более 90 лет она является величайшей загадкой для физиков-теоретиков. Она описывает силу отталкивания — наподобие антигравитации — силу, которая могла бы полностью разметать Вселенную, не будь космологическая постоянная столь исчезающе малой. А проблема в том, что все современные теории требуют, чтобы космологическая постоянная была отнюдь не малой. Современная физика покоится на двух основаниях: теории относительности и квантовой механике. Общим результатом построения мира на этих принципах оказывается Вселенная, которая очень быстро самоуничтожается. Но по совершенно необъяснимым причинам космологическая постоянная «отрегулирована» с удивительной степенью точности. Для некоторых этот факт больше, чем какой-либо другой, служит основанием считать, что Вселенная должна быть результатом творения.

Но ведь Стандартная модель не вырублена на скрижалях? Может быть, возможны другие законы?

В третьей главе я объясню, почему не все наши частные законы универсальны — они могут изменяться в зависимости от места или времени. Законы физики чем-то похожи на погоду: они управляются невидимыми космическими силами почти так же, как дождь, ветер или град управляются температурой, влажностью, атмосферным давлением и скоростью ветра. Эти невидимые агенты влияния называются *полями*. Некоторые из них, такие как магнитное поле, нам хорошо знакомы. Многие другие не известны даже физикам. Но они есть, они заполняют пространство и управляют поведением элементарных частиц. *Ландшафт* — вот термин, который я придумал для описания всей совокупности этого теоретического окружения. Ландшафт — это пространство возможностей, схематическое изображение всех возможных условий, допускаемых теорией. За последние пару лет существование богатого ландшафта возможностей стало центральным вопросом в теории струн.

Но наш спор имеет не только научную сторону. В главе 4 мы поговорим об эстетической стороне дискуссии. Физики, особенно физики-теоретики, наделены обострённым чувством красоты, элегантности и неповторимости. Они всегда считали, что законы природы являются уникальным и неизбежным следствием некоторых элегантных математических принципов. Эта вера настолько глубоко укоренилась в их головах, что большинство моих коллег испытывают горькое чувство утраты и разочарования, если окажется, что никакой неповторимости и элегантности на самом деле нет, если выяснится, что законы физики страшны и уродливы. Но что такое элегантность физического закона в понимании физика?

Если единственным критерием правильности устройства Вселенной является возможность существования разумной жизни, то вся теоретическая конструкция вполне может оказаться подобием безумной неуклюжей машины Руба Голдберга<sup>1</sup>. Несмотря на уверения физиков, что законы, управляющие элементарными частицами, элегантны, эмпирические данные склоняют нас к противоположному выводу.

---

<sup>1</sup> Определение машины Руба Голдберга см. в главе 4.

Вселенная имеет больше общего с машиной Руба Голдберга, чем с уникальным следствием математической симметрии. Мы не сможем полностью вникнуть в споры и оценить необходимость сдвига парадигмы без понимания смысла красоты и элегантности в физике, без знания истории возникновения этих понятий и их соотношения с реальным миром. Эта книга — о концептуальном «землетрясении», но не только в работах теоретиков.

Многое из того, что мы знаем, известно из экспериментальной космологии и современной астрономии. Движущей силой изменения парадигмы являются два ключевых открытия: успех инфляционной космологии и обнаружение очень малой космологической постоянной. Под термином *инфляция* понимается короткий период быстрого экспоненциального расширения Вселенной, который подготовил сцену мироздания для Большого взрыва. Без инфляции Вселенная, вероятно, так и осталась бы крошечным зёрнышком, не более элементарной частицы. В результате инфляционной фазы Вселенная выросла до размеров, значительно больших, чем всё, что мы можем обнаружить с помощью самых мощных телескопов. Когда в 1980 году Алан Гут впервые предложил инфляционную теорию, было очень мало шансов, что астрономические наблюдения когда-либо смогут её подтвердить или опровергнуть. Но с тех пор астрономия расширила свои возможности на несколько порядков и то, что когда-то казалось невозможным, сегодня является свершившимся фактом.

Невероятные достижения в астрономии привели ко второму открытию, которое обрушилось на физиков как гром среди ясного неба и настолько шокировало научный мир, что мы до сих пор не оправались от его последствий. Все были уверены, что давно забытая космологическая постоянная<sup>1</sup> равна нулю, и вдруг оказалось, что нет. Это выглядело так, будто в законах природы кто-то специально прописал ненулевое значение космологической постоянной, чтобы предохранить зарождающуюся жизнь от смертельной опасности — и ни для чего более. Глава 5 посвящена этим открытиям. В этой главе также сообщаются основные сведения из астрономии и космологии, которые понадобятся читателю.

---

<sup>1</sup> Известная также как «тёмная энергия».

Космологическая постоянная может служить «матерью эквилибристики», но существует и множество дополнительных деликатных условий, которые кажутся фантастическим стечением обстоятельств. В главе 6 «О мороженой и варёной рыбе» будет рассказано об этих менее значительных гирьках, уравнивающих Вселенную. Они варьируются от космологических до микроскопических масштабов, от сценария расширения Вселенной до масс элементарных частиц, таких как протон и нейтрон. Усвоенный нами урок свидетельствует, что Вселенная не является простой, напротив, она полна удивительных, необъяснимых счастливых случайностей.

До недавнего времени антропный принцип почти всеми физиками воспринимался как ненаучная, религиозная и вообще тупиковая и ошибочная идея. По их мнению, этот принцип был плодом горячечного бреда опьянённых космологов, упившихся собственными мистическими идеями. Реальным теориям, таким как теория струн, надлежит разрешать все загадки природы научным путём, который не имеет ничего общего с возможностью или невозможностью нашего собственного существования. Но потрясающий поворот судьбы поставил струнных теоретиков в неловкое положение: теперь их собственная заветная теория повернулась против них и стала оружием в руках их противников. Вместо одной уникальной элегантной теоретической конструкции она создаёт колоссальный ландшафт в духе машины Руба Голдберга. В результате многие струнные теоретики сменили сторону баррикад. В главах 7, 8, 9 и 10 я расскажу о теории струн и о её влиянии на сдвиг парадигмы.

В главах 11 и 12 речь пойдёт о новых представлениях о Вселенной, которые формируются благодаря совместной работе астрономов, космологов и физиков-теоретиков: о мире, который, согласно космологам Андрею Линде, Александру Виленкину и Алану Гуту, состоит из практически бесконечной коллекции невероятно разнообразных «карманных вселенных». В каждом кармане стоит собственная «погода»: свой собственный список элементарных частиц, набор взаимодействий и физических констант. Последствия такого широкого взгляда на Вселенную очень важны для физики и космологии. Вопрос «Почему в нашей Вселенной всё так, как мы наблюдаем?» может быть теперь заменён вопросом «Есть ли среди этого бесчисленного разнообразия



карманов такой, условия в котором похожи на условия в нашей Вселенной?» О механизме, называемом *вечной инфляцией* и приводящем к этому разнообразию путём эволюции из начального хаоса, о революционных изменениях в дискуссии об антропном принципе, к которому привела новая теория, идёт речь в главе 11.

Сдвиг космологической парадигмы касается не только основ теоретической физики. В главе 12 рассказывается о битве титанов, о конфликте, который я называю «Битва при чёрной дыре». Эта битва разыгрывалась последние тридцать лет и радикально изменила понятия физиков о гравитации и чёрных дырах. Битва велась за судьбу информации, падающей за горизонт событий чёрной дыры: теряется ли она навсегда для внешнего наблюдателя, остающегося по эту сторону горизонта? Или же существуют какие-то тонкие неведомые каналы связи, по которым информация возвращается в нашу Вселенную, после того как чёрная дыра испаряется? Хокинг отстаивал мнение, что вся информация, ушедшая за горизонт, теряется безвозвратно. Нет ни малейшего способа получить информацию об объектах, которые находятся по ту сторону. Но это оказалось не так. Законы квантовой механики не допускают возможности потерять даже один бит. Для того чтобы понять, как информация избегает пожизненного заключения в чёрной дыре, необходимо было полностью перестроить самые фундаментальные представления о пространстве.

Чем же «Битва при чёрной дыре» поможет нам в поиске ответов на вопросы, поднимаемые в этой книге? Поскольку под влиянием космологической постоянной Вселенная расширяется, в космологическом масштабе тоже должен существовать горизонт событий. Наш космический горизонт располагается на расстоянии около 15 миллиардов световых лет от Земли, где звезды «убегают» так быстро, что их свет уже никогда не достигнет нас, как и любой другой сигнал. Это, как и в случае с горизонтом чёрной дыры, — точки, откуда нет возврата. Единственное отличие в том, что космический горизонт окружает нас, в то время как горизонт чёрной дыры окружает мы. В любом случае ничто из-за горизонта не может влиять на нас, по крайней мере, так считалось... Кроме того, другие карманные вселенные — гигантское море разнообразия — находятся вне нашей досягаемости, за горизонтом! Согласно классической теории, эти другие миры навсегда изолированы



от нашего мира. Но те же аргументы, при помощи которых была выиграна «Битва за Чёрную дыру», применимы и к космологическим горизонтам. Свидетельства существования и детали устройства всех прочих карманных вселенных содержатся в тонких особенностях космического излучения, которое постоянно омывает все части нашей наблюдаемой Вселенной. Глава 12 является введением в «Битву за Чёрную дыру», рассказом о том, как она была выиграна и какие последствия это имело для космологии.

Споры и дискуссии, изложенные в «Космическом ландшафте», происходили в реальности: физики и космологии со всей страстью отстаивали собственные взгляды, всё это было на самом деле. Глава 13 посвящена современным взглядам ведущих физиков-теоретиков и космологов и их спорам. Также в ней обсуждаются различные пути, которыми эксперименты и наблюдения могут помочь нам достичь консенсуса.

На вопрос Виктора «Почему бы не допустить, что наше существование есть проявление бесконечной любви и доброты Бога?» я бы привёл ответ Лапласа Наполеону: «Я не нуждаюсь в этой гипотезе». «Космический ландшафт» — вот мой ответ, и в равной мере это — ответ постоянно растущей армии физиков и космологов на парадокс доброжелательной Вселенной.



## Глава 1

# ФЕЙНМАНОВСКИЙ МИР

Без сомнения, мы никогда не узнаем имени первого космолога, который посмотрел в небо и задался вопросами: «Что всё это значит? Откуда оно взялось? Какова моя роль во всём этом?» Мы можем лишь предположить, что это произошло в доисторические времена, вероятно, в Африке. Первые космологические модели, базировавшиеся на мифах, не имели ничего общего с сегодняшней научной космологией, но они родились из того же человеческого любопытства. Неудивительно, что эти мифы рассказывали о земле, воде, небе и живых существах. И разумеется, они апеллировали к сверхъестественному творцу: как же ещё объяснить существование таких сложных и замысловатых существ, как люди, не упомянуть дождь, солнце, съедобных животных и растения, которые, кажется, созданы исключительно для нашей пользы?

Идея о существовании точных законов, управляющих как горным, так и дольным миром, отсылает нас к Исааку Ньютону. До Ньютона не существовало концепции универсальных законов, одинаково применимых как к небесным телам типа планет, так и к повседневным земным явлениям: льющемуся дождю или летящей стреле. Ньютонские законы движения служат первым примером таких универсальных законов. Но даже могучий ум сэра Исаака не сумел проникнуть настолько далеко, чтобы предположить, будто те же самые законы способны привести и к возникновению человека. К сожалению, Ньютон тратил больше времени на теологию, чем на физику.

Хоть я и не историк, всё же рискну высказать мнение, что современная космология фактически началась с Дарвина и Уоллеса<sup>1</sup>. В отличие от своих предшественников, им удалось представить объяснение нашего существования, полностью исключающее вмешательство сверхъестественных сил. В основе эволюционного учения Дарвина лежат два эмпирических закона. Первый говорит о том, что невозможно полностью избежать ошибок при копировании информации. Даже лучший репродуктивный механизм время от времени даёт сбои, и репликация ДНК — не исключение. За столетие до открытия Криком и Уотсоном двойной молекулярной спирали ДНК Дарвин интуитивно понял, что накапливание случайных мутаций и есть тот механизм, который служит локомотивом эволюции. Большинство мутаций неблагоприятны, но Дарвин достаточно хорошо разбирался в вероятностях, чтобы понимать, что то и дело по чистой случайности возникают и полезные мутации.

Вторым столпом интуитивной теории Дарвина был принцип конкуренции. Победитель размножается. Лучшие гены обеспечивают процветание, худшие приводят в смертельный эволюционный тупик. Эти две простые идеи великолепно объясняют, как сложные и даже разумные формы жизни способны развиться без сверхъестественного вмешательства. В сегодняшнем мире компьютерных вирусов и интернет-червей очень легко представить себе аналогичные эволюционные принципы применительно к неживым объектам. После того как мы удалили магию из происхождения живых существ, перед нами открывается путь к чисто научному объяснению акта творения.

Дарвин и Уоллес задали стандарты не только для биологических наук, но также и для космологии. Законы, управляющие рождением и эволюцией Вселенной, должны быть теми же самыми законами, которые управляют падением камней, химическими реакциями, ядерными процессами и превращениями элементарных частиц. Они освобождают нас от оков сверхъестественного, показывая, что сложная и даже разумная жизнь может развиться естественным образом из случайностей путём

---

<sup>1</sup> Альфред Рассел Уоллес (1823–1913) — британский натуралист, путешественник, географ, биолог и антрополог, современник Дарвина и сооткрыватель механизма естественного отбора. Именно знакомство с записками Уоллеса и сподвигло Дарвина на публикацию своей работы.

конкуренции. Космологам следует поступить так же: положить в основу космологии обезличенные правила, одинаковые для всей Вселенной, происхождение которых не имеет никакой связи с нашим собственным существованием. Единственный бог, существование которого могли бы допустить космологи, — это «слепой часовщик» Ричарда Докинза<sup>1</sup>.

Современная космологическая парадигма не очень стара. Когда я был молодым и учился в магистратуре Корнелльского университета, в начале 1960-х, *Теория Большого взрыва* ещё находилась в состоянии острой конфронтации с другим серьёзным претендентом — *Теорией стационарной Вселенной*, которая была очевидным логическим антагонистом теории Большого взрыва. Если теория Большого взрыва утверждала, что Вселенная возникла в какой-то момент времени, то теория стационарной Вселенной говорила, что Вселенная существовала *всегда*. Эта теория была детищем трёх знаменитых космологов: Фреда Хойла, Германа Бонди и Томаса Голда, считавших возникновение Вселенной в результате происшедшего каких-то десять миллиардов лет назад взрыва слишком сомнительным событием. Голд был профессором в Корнелле, и его кабинет располагался всего через несколько дверей от моего. В те времена он неустанно проповедовал добродетель бесконечно старой и бесконечно большой Вселенной. Моё знакомство с ним ограничивалось тем, что мы здоровались по утрам, но однажды, что было очень нехарактерно для него, Голд подсел с чашкой кофе к нескольким студентам, и у меня появилась возможность задать ему давно мучивший меня вопрос: «Если Вселенная вечна и неизменна, как так получается, что галактики удаляются друг от друга? Не означает ли это, что в прошлом они были более тесно упакованы в пространстве?» Объяснение Голда было простым: «Разумеется, галактики разлетаются, но по мере того, как они удаляются друг от друга, освобождающееся пространство между ними заполняется вновь создаваемой материей». Это был, конечно, разумный, но не имеющий математического смысла ответ. В течение нескольких после-

<sup>1</sup> Слепой часовщик в заглавии книги Ричарда Докинза взят из трактата Уильяма Пейли, доказывавшего, что часы не могут появиться самопроизвольно, а только как результат деятельности разумного существа (часовщика). Докинз в своей книге показывает, что естественный отбор, слепо оперирующий спонтанными вариациями простых исходных форм, может породить не менее сложные конструкции. Эта метафора может быть легко распространена и на процесс создания космоса.

дующих лет теория стационарной Вселенной уступила место теории Большого взрыва и была забыта. Победившая парадигма Большого взрыва утверждала, что расширяющаяся Вселенная насчитывает около десяти миллиардов лет и имеет протяжённость в десять миллиардов световых лет<sup>1</sup>. Однако одно утверждение разделялось обеими теориями: уверенность в том, что Вселенная однородна, то есть что в любой её части на протяжении всей её истории действуют одни и те же физические законы, причём это именно те самые законы, которые мы открываем в наших земных лабораториях.

Было интересно наблюдать взросление экспериментальной космологии. За последние сорок лет она превратилась из набора качественных гипотез в зрелую и очень точную количественную науку. Но лишь сравнительно недавно основные концепции теории Большого взрыва, сформулированные ещё Георгием Гамовым, начали вытесняться более мощными идеями. На заре нового столетия мы вдруг обнаружили, что перешли тот водораздел, который, по-видимому, навсегда изменит наши представления о Вселенной. Случилось нечто гораздо более важное, чем открытие нового факта или вывод нового уравнения. Наше видение мира, рамки, ограничивающие наше мышление, более того, вся эпистемология физики и космологии сейчас переживают серьёзное потрясение. Узкая парадигма XX века, представляющая единственную Вселенную с возрастом в десять миллиардов лет и десяти миллиардов световых лет в поперечнике, уступает место чему-то несравнимо большему, готовому разродиться массой новых возможностей. Постепенно космологи и физики вроде меня приходят к точке зрения на нашу десятиллиардолетнюю Вселенную как на один из бесконечно малых карманов колоссального *Мегаверсума*<sup>2</sup>, в то время как физики-теоретики предлагают теории, задвигающие наши обычные законы природы в дальний угол гигантского ландшафта математических возможностей.

---

<sup>1</sup> Один световой год — это, как можно догадаться, расстояние, которое свет пролетает за один год. Оно составляет приблизительно десять триллионов километров.

<sup>2</sup> Термин *мультиверсум* или *мультивселенная* используется более широко, чем термин *Мегаверсум*, но лично я предпочитаю Мегаверсум как более звучный термин. Мои извинения энтузиастам мультивселенной.

Слову «ландшафт» в том значении, в котором оно используется в контексте этой книги, всего несколько лет, но с тех пор, как я в 2003 году ввёл его в обращение, оно заняло прочное положение в космологическом лексиконе. Оно обозначает математическое пространство, представляющее все возможные природные условия, допускаемые теорией. Каждая возможная реализация условий содержит свои собственные физические законы, собственный набор элементарных частиц и фундаментальных констант. Некоторые из реализуемых миров очень похожи на наш, но отличаются в деталях. Например, один мир может содержать электроны и кварки и все прочие элементарные частицы, известные в нашем мире, но гравитационное взаимодействие в нём будет в миллиард раз сильнее. В другом гравитационные силы будут такими же, как и в нашем мире, но электроны — тяжелее атомных ядер<sup>1</sup>. Третий окажется во всём похож на наш, за исключением огромной отталкивающей силы (она описывается космологической постоянной), растаскивающей в разные стороны галактики, молекулы и даже атомы. И даже трёхмерность нашего пространства не является «священной коровой»; отдельные области Ландшафта могут иметь четыре, пять, шесть и больше пространственных измерений.

Согласно современным космологическим теориям, разнообразие ландшафта приводит к соответствующему разнообразию в обычном пространстве. Лучшая на сегодняшний день теория Вселенной — *инфляционная космология* — против нашей воли приводит нас к концепции Мегаверсума, заполненного огромным количеством миров, которые Алан Гут назвал «карманными вселенными». Некоторые из карманных вселенных микроскопически малы и никогда не достигнут макроразмеров. Другие — велики, как наша, но абсолютно пусты. И каждая из них расположена в собственной маленькой долине космического Ландшафта. Так что старый вопрос XX века «Что мы можем найти во Вселенной?» теперь следует переформулировать в виде: «Что мы *не* можем в ней найти?»

Следует также пересмотреть и переосмыслить место человека во Вселенной. Мегаверсум столь разнообразен, что вряд ли допускает существование разумной жизни повсюду, но она может развиваться в отдельных его частях. Согласно этой новой точке зрения, ответы на множество

<sup>1</sup> В нашем мире атомные ядра в тысячи раз тяжелее электронов.

вопросов типа: «Почему эта физическая константа имеет именно такое значение, а не другое?» будут радикально отличаться от тех, которые надеялись услышать физики. Уникальные значения констант не будут являться результатом строгого математического вывода, поскольку Ландшафт допускает бесконечное число вариаций всех возможных значений. Вместо этого ответом будет: «Где-то в Мегаверсуме эта константа имеет такое значение, а где-то — сякое. Мы живём в одном маленьком кармане, в котором значения констант таковы, что позволяют существовать жизни нашего типа. Именно поэтому. И это всё! Других ответов нет».

Мы наблюдаем удивительно гармоничное сочетание законов природы и значений фундаментальных констант, которое не имеет никакого иного объяснения, кроме как: «Если бы было иначе, разумная жизнь не могла бы существовать». Некоторым кажется, что законы физики, по крайней мере часть их, были специально подобраны с таким расчётом, чтобы обеспечить наше существование. Эта идея, называемая *антропным принципом*, ненавидима большинством физиков, о чём я уже упомянул во Введении. Для многих она пахнет сверхъестественным мифом творения, религией и разумным замыслом. Кое-кто считает, что она призывает сдаться и отказаться от благородных поисков рациональных ответов. Но из-за новых беспрецедентных открытий в физике, астрономии и космологии те же самые физики вынуждены в настоящее время пересматривать свои предубеждения. Движущей силой, которая гонит эти волны перемен, служат четыре принципиальных открытия: два в области теоретической физики и два — в области наблюдательной астрономии. С теоретической стороны гонит волну ответвление инфляционной теории, называемое *теорией вечной инфляции* и требующее, чтобы мир представлял собой Мегаверсум, наполненный карманными вселенными, раздувающимися подобно пузырькам газа в только что откупоренной бутылке шампанского. В то же время теория струн порождает невероятно разнообразный ландшафт. Лучшая оценка даёт  $10^{500}$  различных вариантов возможных миров. Это число (единица с пятьюстами нулями) намного превосходит самые «невообразимо большие» числа, но даже оно может оказаться недостаточно большим, чтобы описать все возможные варианты.

Самые последние астрономические открытия были сделаны практически параллельно с теоретическими достижениями. Новей-



шие астрономические данные подтверждают, что Вселенная во время инфляционной фазы экспоненциально расширилась до размеров, в невероятное число раз превышающих те стандартные десять или пятнадцать миллиардов световых лет, которыми мы привыкли оперировать. У нас практически не осталось сомнений, что мы являемся частью намного большего Мегаверсума. Но самой потрясающей новостью оказалось то, что в нашем космическом кармане пресловутая космологическая постоянная (математический член, который Эйнштейн ввёл в свои уравнения и впоследствии решительно от него отказался) отнюдь не равна нулю, как предполагалось ранее. Эти открытия раскачали лодку больше, чем какие-либо другие. Космологическая постоянная вносит в гравитационное взаимодействие дополнительную силу отталкивания, своего рода антигравитацию, в существование которой в реальном мире абсолютно никто не верил. Сам факт наличия ненулевого космологического члена стал катастрофой для физиков, и единственный известный нам способ хоть как-то осмыслить это открытие — апелляция к презираемому и поносимому антропному принципу.

Я не знаю, какие ещё странные и невообразимые повороты будет преодолевать наше представление о Вселенной на пути исследования просторов космического Ландшафта. Но я уверен, что на рубеже XXII века философы и физики будут смотреть на наше «сегодня» как на рубеж, на котором концепция устройства Вселенной XX века уступила место Мегаверсуму, заполненному Ландшафтом умопомрачительных масштабов.

## Природа дрожит

Если квантовая теория не потрясла тебя, значит, ты её ещё не понял.

— *Нильс Бор*

Утверждение, что Законы Физики могут меняться во Вселенной от места к месту, имеет такую же степень бессмысленности, как и утвержд-



дение, что в природе существует более чем одна вселенная. Вселенная — в буквальном смысле слова — это всё, что существует, и по идее это существительное вообще не должно иметь множественного числа. Законы, управляющие Вселенной в целом, не могут меняться, потому что сразу же возникает вопрос: а какие законы управляют изменением законов? Относятся ли эти законы к Законам Физики?

Но я понимаю под Законами Физики нечто более скромное, чем великие всеобъемлющие законы, регулирующие все аспекты Мегаверсума. Я понимаю под ними то же, что понимали рядовые физики XX века, занятые в большей степени своими лабораторными исследованиями, нежели размышлениями о судьбах Вселенной: под Законами Физики я понимаю законы, управляющие «строительными блоками» обычной материи.

Эта книга — именно о таких Законах Физики. Она ставит вопрос не «Что они такое?», а «Почему они такие?». Что же это за законы? Что они утверждают и как они выражаются? Задача первой главы моей книги — коротко рассказать о законах физики, как они понимаются в начале третьего тысячелетия.

Для Исаака Ньютона и его последователей физический мир представлял собой строго детерминированную машину, будущее которой однозначно определялось её прошлым с той же неизбежностью, «как вслед за днём бывает ночь». Законы природы представляли собой правила (уравнения), описывающие этот детерминизм точным математическим языком. Например, можно совершенно однозначно определить траекторию, по которой будет двигаться объект, точно задав его начальные координаты и скорость. Великий французский физик Пьер-Симон Лаплас (1749–1827) выражал идею детерминизма следующим образом:

*«Мы можем рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие его прошлого и причину его будущего. Разум, которому в каждый определённый момент времени были бы известны все силы, приводящие природу в движение, и положение всех тел, из которых она состоит, будь он также достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, смог бы объять единым законом движение величайших тел Вселенной и мельчайшего атома; для такого разума ничего не было бы неясного, и будущее существовало бы в его глазах точно так же, как прошлое».*

Поскольку высказывание Лапласа звучит несколько витиевато, я должен пересказать его в более строгой формулировке: если в какой-то момент времени вы (или некий сверхразум) получите абсолютно точную информацию о координатах и скоростях всех частиц во Вселенной, то сможете с абсолютной точностью предсказать будущее этого мира на сколь угодно большой промежуток времени. Этот ультрадетерминистический взгляд на природу был превалирующей парадигмой вплоть до начала XX века, когда явился мятежный мыслитель Эйнштейн и всё изменил. Хотя Эйнштейн в основном известен как творец теории относительности, его важнейшим и радикальным вкладом в физику, вкладом, подрывающим основы физики, было создание вовсе не теории относительности, а странного мира квантовой механики. И тогда физики пришли к пониманию, что Законы Физики — это в первую очередь законы квантовой механики. Именно поэтому я собираюсь начать первую главу с краткого введения в философию квантовой механики.

Представьте себе мир современной физики, напоминающий кэрролловскую Страну чудес, мир, где всё является не тем, чем кажется, всё флуктуирует и мерцает и над всем царит неопределённость. Забудьте предсказуемую «заводную» Вселенную Ньютона. Мир квантовой механики полностью непредсказуем. Революция, происшедшая в физике в начале XX века, была отнюдь не «бархатной». Она не только изменила уравнения, которыми описываются физические законы, но и разрушила эпистемологические основы классической физики и философии.

Многие физики не сумели перестроить разум на новый лад и мыслями остались в XIX веке. Но более молодое и более гибкое поколение исследователей, упиваясь новыми необычными идеями, создало интуитивно понятный и мощный способ описания новой физики. Их вклад позволил моему поколению уже гораздо проще мыслить квантово-механическими и релятивистскими представлениями, чем классическими.

Создание квантовой механики стало величайшим потрясением за всю историю физики. Квантовый мир — это мир постоянных флуктуаций, мир вероятностей и мир неопределённости. Но электрон не шатается по пространству, будто пьяный матрос по пирсу, он подчиняется достаточно строгим шаблонам случайности, которые могут быть точно описаны каббалистическими символами абстрактной математи-

ки. Однако небольшие усилия с моей стороны и немного терпения с вашей позволят нам перевести наиболее важные положения квантовой механики на простой и понятный человеческий язык.

Начиная с XIX века физики использовали метафору бильярда, представляя физический мир как набор взаимодействующих и сталкивающихся частиц. Эту аналогию использовали и Максвелл, и Больцман. Она используется и в настоящее время для объяснения квантового мира. В первый раз я слышал её от Ричарда Фейнмана, который придумал следующее описание:

*Представьте идеальный бильярдный стол, катаясь по которому, шары не испытывают трения, а все столкновения шаров абсолютно упругие, то есть при столкновениях шаров не происходит потери кинетической энергии. В дополнение ко всему уберём лузы, так что шары, однажды приведённые в движение, будут бесконечно долго продолжать двигаться, сталкиваясь друг с другом и со стенками бильярда. В начале игры пятнадцать шаров располагаются в виде треугольника, наподобие двумерного аналога пирамиды пушечных ядер. Шестнадцатый шар разбивает пирамиду.*

То, что произойдёт далее, чрезвычайно сложно поддаётся предсказанию и точному описанию. Но почему? Потому что каждое столкновение умножает незначительные различия между начальными скоростями и положениями шаров, и даже очень малое изменение начальных параметров приводит к огромному изменению конечных скоростей и координат после множества столкновений. Ситуация подобной ультрачувствительности поведения системы к начальным условиям называется *хаосом*, и она типична для окружающей нас природы. В отличие от моделирования шахматной партии, где начальные условия описываются набором целых чисел, при моделировании бильярдной партии нужна практически бесконечная точность. Тем не менее в классической физике шары движутся по идеально точным траекториям и их движение полностью предсказуемо, если только начальные положения и скорости шаров известны нам с бесконечной точностью. Разумеется, чем на более отдалённый момент времени мы хотим предсказать движение шаров, тем с большей точностью нам необходимо знать начальные условия. Но поскольку не существует никаких ограничений на точность задания начальных условий, то соответственно нет и никаких

ограничений на точность предсказаний будущего или реконструкции прошлого.

В противоположность классическому квантовый бильярд совершенно непредсказуем, независимо от того, насколько точно мы зададим начальные условия. Не существует такой точности, которая позволила бы нам предсказать что-либо, кроме статистического поведения шаров. В классическом бильярде мы прибегаем к статистическому описанию из-за того, что мы не можем чисто технически достичь необходимой точности определения начальных условий, или из-за того, что решение соответствующих уравнений оказывается слишком сложным. Но квантовый случай не оставляет нам выбора. Законы квантовой механики содержат принципиальную неопределённость, которая не может быть устранена. Почему? Из-за чего мы оказываемся не в состоянии предсказать будущее на основе заданных начальных координат и скоростей? Ответ кроется в знаменитом принципе неопределённости Гейзенберга.

Принцип неопределённости накладывает фундаментальное ограничение на точность одновременного определения координат и скоростей. Это физический аналог ситуации, описанной в «Уловке 22». Пытаясь увеличить точность наших знаний о текущем местоположении шара, мы неизбежно теряем в точности знаний о его последующем положении. Принцип неопределённости является не просто качественной характеристикой поведения объектов, он имеет точную количественную формулировку: произведение неопределённости координаты и неопределённости импульса<sup>1</sup> объекта всегда больше некоторой (очень малой) величины, называемой постоянной Планка<sup>2</sup>. Сам Гейзенберг и многие после него мечтали найти способ обойти принцип неопределённости. Гейзенберг использовал в своих рассуждениях в качестве примера электроны, но с таким же успехом можно рассматривать и бильярдные шары. Представим себе квантовый бильярдный шар, освещённый потоком света. Отражённый от поверхности шара свет можно сфокусировать объективом на фотографической плёнке и, изучив полученное изображение, сделать вывод о местоположении

<sup>1</sup> Импульс определяется как произведение массы объекта на его скорость.

<sup>2</sup> Постоянная Планка обозначается буквой  $\hbar$ , и её числовое значение равно  $6,626068 \times 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}/\text{с}$ .

бильярдного шара. Но как определить его скорость? Простейший и наиболее прямой путь — определить местоположение шара ещё раз через короткий промежуток времени. Зная два последовательных положения тела и разделяющий их промежуток времени, можно без труда вычислить скорость.

Почему эксперимент такого рода невозможен? Ответ отсылает нас к одному из величайших открытий Эйнштейна. Ньютон полагал, что свет состоит из частиц, но в начале XX века корпускулярная теория света была полностью дискредитирована. Многие оптические эффекты, такие как интерференция, могли быть объяснены только в предположении, что свет представляет собой волны, похожие на рябь на поверхности воды. В середине XIX века Джеймс Клерк Максвелл создал чрезвычайно удачную теорию, описывающую свет в виде электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве подобно звуковым волнам в воздухе. Поэтому предположение, сделанное в 1905 году Эйнштейном, о том, что свет (и все прочие виды электромагнитного излучения) состоит из крохотных частиц, называемых квантами, или фотонами, выглядело, мягко говоря, шокирующим. Эйнштейн странным образом предположил, что свет, сохраняя свои прежние волновые свойства — длину волны, частоту и т. п., — состоит при этом из отдельных частиц — квантов. Эти кванты несут определённые порции энергии, которые не могут быть разделены на более мелкие, и описанные свойства света не позволяют построить с его помощью точное изображение слишком малых объектов.

Начнём с определения положения. Для получения чёткого изображение шара длина волны света должна быть не слишком велика. Правило простое: если вы хотите найти положение объекта с заданной точностью, необходимо использовать свет с длиной волны, не превышающей заданную погрешность. Любые изображения, получаемые при помощи света, являются более или менее нерезкими, и желание увеличить резкость заставляет использовать более короткие волны. Подобная проблема отсутствует в классической физике, где энергия светового импульса может быть сколь угодно малой. Но как показал Эйнштейн, свет состоит из неделимых фотонов, и более того, как мы увидим далее, чем меньше длина волны света, тем больше энергия составляющих его фотонов.

Всё это означает, что для получения более резкого изображения, позволяющего более точно определить положение шара, требуется использовать фотоны более высоких энергий. Но это накладывает серьёзные ограничения на точность последующего измерения скорости. Дело в том, что более энергичные фотоны, отражаясь от бильярдного шара, будут передавать ему больший импульс, тем самым изменяя его скорость. Это наглядный пример провала попытки определить положение и скорость с бесконечной точностью.

Обнаруженная в 1905 году связь между длиной волны электромагнитного излучения и энергией фотонов (чем меньше длина волны, тем больше энергия) стала одним из важнейших открытий Эйнштейна. В порядке увеличения длины волны спектр электромагнитного излучения состоит из гамма-лучей, рентгеновских лучей, ультрафиолетового, видимого и инфракрасного света, микроволнового излучения и радиоволн. Радиоволны имеют длины волн от долей метра до космических размеров. Они представляют собой очень плохой выбор для получения резких изображений обычных объектов, потому что величина размытия изображения будет порядка длины волны. На экране радиолокатора человек будет неотличим от мешка с грязным бельём. Более того, мы даже не сможем точно сказать, одного или двух людей мы видим, если расстояние между ними будет меньше длины радиоволны. Все изображения будут выглядеть размытыми пятнами. Это не означает, что радиоволны бесполезны для получения изображений: они просто не годятся для изображения слишком малых предметов. Радиоастрономия является очень мощным методом изучения крупных астрономических объектов, в то время как гамма-излучение лучше всего подходит для получения информации об очень мелких вещах, таких как атомные ядра, потому что длина волны гамма-кванта намного меньше размера атома.

Другими словами, энергия кванта увеличивается с уменьшением длины волны. Отдельные радиокванты имеют слишком маленькую энергию, чтобы их обнаружить. Фотоны видимого света более энергичны: одного фотона видимого света достаточно, чтобы разрушить молекулу. Адаптированный к темноте человеческий глаз способен различать отдельные фотоны, потому что их энергии достаточно для возбуждения палочек сетчатки. Ультрафиолетовые и рентгеновские фотоны обладают энергией, достаточной для выбивания электрона из атома,

а гамма-кванты способны разрушать не только атомные ядра, но даже протоны и нейтроны.

Этой обратно пропорциональной зависимостью между длиной волны и энергией объясняется одна из важных тенденций в физике XX века: строительство всё более и более мощных ускорителей. Чем глубже пытаются проникнуть физики в структуру материи, исследуя молекулы, атомы, ядра, кварки и т. д., чем более мелкие объекты они исследуют, тем меньшие длины волн им нужны для получения чётких изображений этих объектов. Но уменьшение длины волны неизбежно требует увеличения энергии квантов. Для получения таких высоких энергий частицы приходится ускорять до огромных кинетических энергий. Например, для ускорения электронов до огромных энергий приходится строить гигантские по размерам установки. Стэнфордский линейный ускоритель (SLAC), располагающийся неподалёку от того места, где я живу, может ускорить электроны до энергий, в 200 000 раз превосходящих их массы. Но это требует машины примерно в две мили длиной. SLAC является по существу двухмильным микроскопом, который позволяет наблюдать объекты в тысячу раз меньшие, чем протон.

По мере того как на протяжении XX века физикам становились доступны для изучения всё более мелкие объекты, ими обнаруживались всё более неожиданные вещи. Одним из самых драматических стало открытие, что протоны и нейтроны не являются элементарными частицами. Расстреливая нуклоны высокоэнергетичными частицами, учёные сумели различить составляющие их крошечные компоненты — кварки. Но даже при самых больших энергиях (которым соответствуют самые малые длины волн) электрон, фотон и кварк остаются, насколько мы можем утверждать, точечными объектами. Это означает, что мы не можем обнаружить никакой внутренней структуры или составляющих частей электронов и кварков, равно как не можем и определить их размеры. Они так и остаются для нас бесконечно малыми точками.

Вернёмся к принципу неопределённости Гейзенберга и его последствиям. Представим себе один шар на бильярдном столе. Так как шар не может покинуть бильярдный стол, мы автоматически кое-что уже знаем о его положении в пространстве: неопределённость его положения не больше, чем размеры стола. Чем меньше стол, тем более точно



мы знаем положение шара, но тем выше становится неопределённость импульса. Если бы мы начали измерять скорость шара, запертого в пределах бильярдного стола, то в разные моменты времени получили бы разные значения скорости, и в первую очередь это касается направления скорости. Если же мы попытаемся отобрать у шара всю его кинетическую энергию, то обнаружим, что в квантово-механическом случае остаточные колебания не могут быть устранены. Брайан Грин<sup>1</sup> придумал для описания этого движения термин *квантовая дрожь*, и я буду следовать его примеру. Кинетическая энергия, связанная с квантовой дрожью, называется *энергией нулевых колебаний*, и её невозможно отобрать у квантового объекта.

Существование квантовой дрожи, требуемое принципом неопределённости, приводит к интересному следствию, когда мы пытаемся охладить обычное вещество до нулевой температуры. Тепло, как известно, представляет собой кинетическую энергию случайных движений молекул. В классической физике при охлаждении системы до абсолютного нуля молекулы в конце концов полностью останавливаются и, как результат, их кинетическая энергия тоже становится равной нулю.

Каждая молекула в твёрдом теле имеет вполне определённое положение, только она удерживается на месте не бортами бильярдного стола, а другими молекулами. Принцип неопределённости требует, чтобы каждая молекула обязательно обладала некоторой скоростью. В результате в реальном веществе, подчиняющемся законам квантовой механики, кинетическая энергия никогда не может быть отобрана у молекул полностью, даже при абсолютном нуле!

Координата и скорость — отнюдь не единственные параметры, на которые накладывает ограничение принцип неопределённости. Существует много пар так называемых *сопряжённых величин*, которые не могут быть определены одновременно: чем более точно фиксируется одна, тем сильнее флуктуирует другая. Очень важным примером является *принцип неопределённости энергии-времени*: невозможно определить точный момент времени, в который происходит событие, и точное значение энергий объектов, принимающих в нём участие. Предположим,

---

<sup>1</sup> Брайан Грин, «Элегантная Вселенная».



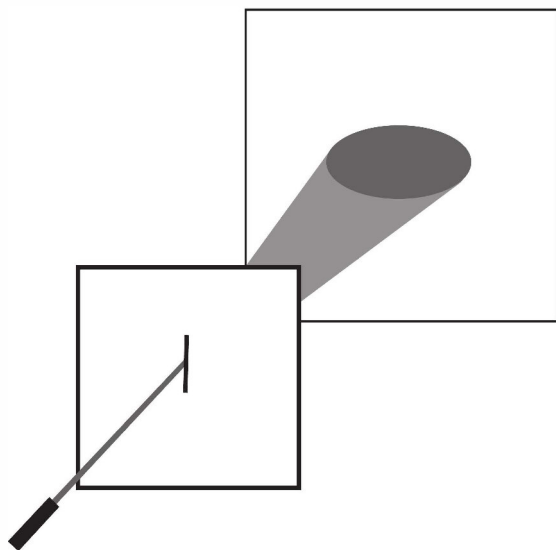
что физик-экспериментатор захотел столкнуть две частицы в конкретный момент времени. Принцип неопределённости энергии-времени ограничивает точность, с которой он может измерить энергию частиц, а также момент времени, в который произошло столкновение. Увеличение точности измерения энергии неизбежно приводит к увеличению неопределённости момента столкновения — и наоборот.

Ещё один важный пример, который мы рассмотрим в главе 3, касается величин электрического и магнитного полей в определённой точке пространства. Эти поля, которые будут играть главную роль в последующих главах, являются невидимой субстанцией, заполняющей пространство и управляющей силами, действующими на электрически заряженные частицы. Напряжённости электрического и магнитного полей, подобно координате и скорости частицы, не могут быть определены одновременно. Если точно известна напряжённость одного, то напряжённость другого обязательно неопределённа. По этой причине поля находятся в состоянии постоянного «дрожания», которое не может быть устранено, что, как и следует ожидать, приводит к появлению некоторой плотности энергии, даже в абсолютно пустом пространстве. Эта *вакуумная энергия* привела к одному из величайших парадоксов современной физики и космологии. Мы ещё неоднократно вернёмся к нему в следующих главах.

Неопределённость и дрожь — ещё не всё. Квантовая механика имеет другую, квантовую сторону. Слово «квантовый» подразумевает некоторую степень дискретности, или зернистости, природы. Фотоны — порции энергии, составляющие световые волны, являются лишь одним из примеров. Электромагнитное излучение является колебательным процессом, или, другими словами, осцилляцией. Ребёнок на качелях, колеблющаяся пружина, вибрирующая скрипичная струна, звуковая волна всё это колебательные явления, и все они обладают свойством дискретности. В каждом случае энергия изменяется квантовыми дискретными порциями, которые не могут быть разделены на части. В макроскопическом мире пружин и качелей величина кванта энергии настолько мала, что нам кажется, будто энергия может принимать любые произвольные значения. Но на самом деле энергия любого колебания кратна некоторой минимальной неделимой величине, равной частоте колебаний, умноженной на постоянную Планка.

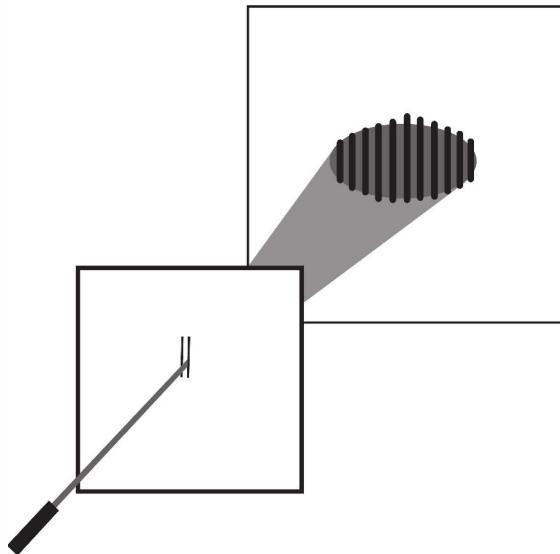
Электроны в атоме также колеблются, окружая ядро. В этом случае квантование энергии можно описать, воображая, что электроны движутся по дискретным орбитам. В атоме, который построил Бор, электроны представляются бегающими вокруг ядра, как если бы они были вынуждены двигаться по отдельным полосам беговой дорожки. Энергия электрона определяется номером полосы, которую он занимает.

Хотя дрожь и дискретность квантового мира и выглядят странными, но по-настоящему странным квантово-механическим поведением является *интерференция*. Это замечательное явление иллюстрирует знаменитый эксперимент с двумя щелями. Представьте себе небольшой источник света — очень яркую миниатюрную лампочку в тёмной комнате, а ещё лучше — лазерный луч. На некотором расстоянии от него помещена фотоплёнка. Когда свет от источника попадает на плёнку, она чернеет — точно так же, как и обычная фотографическая негативная плёнка. Очевидно, что если на пути света поместить непрозрачное препятствие, например лист металла, то свет не попадёт на плёнку и никакого почернения наблюдать не будет. Теперь прорежем в листе металла две параллельные вертикальные щели, так чтобы свет попадал на плёнку, проходя через них. Наш первый эксперимент очень прост: закроем одну щель, скажем левую, и включим источник света.



Спустя какое-то время на плёнке появится широкая полоса — размытое изображение правой щели. Теперь закроем правую щель и откроем левую. На плёнке появится вторая широкая полоса, частично перекрывающая первую.

Снова возьмём неэкспонированную плёнку, но на этот раз откроем обе щели. Если вы заранее не знаете, чего ожидать, результат может вас удивить. На плёнке не будет двух перекрывающихся пятен, как в предыдущем случае. Вместо этого мы обнаружим череду узких тёмных и светлых полос, как на шкуре зебры. В области перекрытия тёмных пятен из предыдущего эксперимента теперь присутствуют незасвеченные участки. Свет как будто самоуничтожается в некоторых местах, пройдя через правую и левую щели. Это явление называется *деструктивной интерференцией* и представляет собой хорошо известное свойство волн. Ещё одним примером интерференции являются биения, которые вы слышите, когда звучат две практически одинаковые ноты.



Если вы попробуете провести этот эксперимент дома, то обнаружите, что всё не так просто, как я рассказываю. Во-первых, интерференционная картина будет хорошо видна, только если щели очень узкие и расположены очень близко друг к другу. Не пытайтесь прорезать

щели консервным ножом — ничего путного не получится. Лучше возьмите бритву. Во-вторых, источник света должен быть точечным. Древний нетехнологичный способ создания точечного источника света состоит в закрывании лампочки накаливания чёрной бумагой, в которой проколото булавочное отверстие. Современный высокотехнологичный способ заключается в использовании лазера. Идеально подойдёт лазерная указка. Проходя через аккуратно прорезанные щели, лазерный свет создаёт прекрасную чёткую интерференционную картину. Основная трудность при проведении этого эксперимента — надёжно закрепить все компоненты.

Продолжим наши оптические экзерсисы, но на этот раз будем уменьшать интенсивность источника до тех пор, пока из него не начнут вылетать по одному отдельные фотоны. При попадании на достаточно чувствительную фотоплёнку отдельный фотон оставляет на ней чёрную точку. При длительной экспозиции множество точек создадут изображение. В итоге мы увидим те же узоры, что и в предыдущем эксперименте. Среди прочего этот эксперимент подтверждает идею Эйнштейна о том, что свет состоит из отдельных фотонов. Кроме того, частицы попадают на плёнку случайным образом, и интерференционная картина проявляется, только когда мы накопим достаточно много фотонов.

Но эти фотоны ведут себя самым неожиданным образом. Когда открыты обе щели, ни одна частица не попадает на те места фотоплёнки, где имеет место деструктивная интерференция. И это несмотря на тот факт, что фотоны попадают на эти места, когда открыта только одна щель. Складывается впечатление, что открытая левая щель мешает фотонам проходить через правую, и наоборот.

Рассмотрим это под другим углом. Предположим, что точка  $X$  соответствует месту на плёнке, в котором происходит деструктивная интерференция. Фотон может добраться до точки  $X$ , когда открыта левая щель. Он может также добраться до  $X$  и через открытую правую щель. Здравый смысл подсказывает, что если открыты обе щели, то вероятность, что фотон доберётся до  $X$ , увеличится. Но нет — независимо от того, как долго мы будем ждать, в точке  $X$  не появится ни одного фотона. Откуда фотон, проходя через левую щель, знает, открыта или закрыта при этом правая? Физики иногда описывают этот своеобразный эффект так, будто фотон не проходит через каждую из

щелей, но вместо этого «чувствует» оба пути и «вычисляет» их вклад в конечный результат. Облегчает или нет такое представление понимание явления, интерференция всё равно остаётся очень странным феноменом. Однако вы привыкаете к странностям квантовой механики, если работаете с ней сорок или более лет. Но каждый раз, отвлекаясь, чтобы отрефлексировать её, вы понимаете, что всё это очень и очень странно!

## Элементарные частицы

Природа выглядит организованной иерархически: большие вещи состоят из более мелких, которые, в свою очередь, состоят из ещё более мелких, и т. д., пока мы не достигаем предела разрешения наших измерительных приборов. Обычный мир полон подобными иерархиями. Автомобиль — не что иное, как набор составляющих его частей: колёс, двигателя, карбюратора и т. п. Карбюратор, в свою очередь, состоит из более мелких деталей, таких как винты регулировки холостого хода, дроссельные заслонки, форсунки и пружинки. Наш опыт подсказывает, что свойства более мелких вещей определяют поведение более крупных. Философский подход, декларирующий, что целое есть сумма составляющих его частей и что природу можно понять, разлагая её на более простые составляющие, носит название *редукционизм*.

Во многих академических кругах слово «редукционизм» является ругательным. Редукционизм разжигает в научных кругах такие же мощные страсти, как эволюция в религиозных. Мысль о том, что всё сущее — лишь результат взаимодействия мёртвых частиц, рождает такое же неприятие, как мысль о том, что мы, люди, — всего лишь автомобили для наших самолюбивых генов. Так это или нет, но редукционизм реально работает. Любой автомеханик — редукционист, по крайней мере на работе. В науке<sup>1</sup> сила редукционизма феноменальна. Основные законы биологии определяются химией органических молекул: ДНК, РНК и белков. Химики редуцируют сложные химические

<sup>1</sup> Применим или нет редукционизм для исследования разума — вопрос спорный. С моей точки зрения, поведение живой материи подчиняется тем же Законам Физики, что и поведение неживой. Мне не известно ни одного доказательства обратного. С другой стороны, до сих пор никому не удалось полностью объяснить феномен сознания с позиций редукционизма.

свойства молекул до простых свойств атомов, и на этом уровне эстафету у них уже перехватывают физики. Атом — это не что иное, как набор электронов, вращающихся вокруг ядра. Из курса физики элементарных частиц мы знаем, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Те в свою очередь состоят из кварков. Как долго ещё можно разбирать эту матрёшку? Кто знает... Физики XX века добились больших успехов, распространив редукционизм на уровень так называемых «элементарных частиц». Под Законами Физики я понимаю законы, управляющие этими мельчайшими строительными блоками. Очень важно разобраться с тем, что это за законы, прежде чем задаваться вопросом, почему эти законы именно такие.

Языком теоретической физики служат математические уравнения. В физике чрезвычайно сложно зачать новую теорию, иначе как написав для неё одно или несколько уравнений. Уравнения Ньютона, уравнения Максвелла, уравнения Эйнштейна, уравнение Шрёдингера являются важнейшими примерами этого. Математический каркас физики элементарных частиц называется *квантовой теорией поля*. Это сложный предмет, изобилующий весьма абстрактными уравнениями. Уравнения квантовой теории поля настолько сложны, что порой складывается впечатление, будто они не являются правильными — не может же правильная теория быть настолько сложной. К счастью для нас, великий Ричард Фейнман испытывал те же чувства, глядя на уравнения квантовой теории поля, и чтобы упростить понимание теории, он придумал изящный способ изображать эти уравнения в виде картинок. Метод Фейнмана настолько интуитивно понятен, что позволяет изложить основы квантовой теории поля без единого уравнения.

Дик Фейнман был гением визуализации (что не мешало ему прекрасно разбираться и в уравнениях): он создавал мысленные иллюстрации для всего, над чем работал. В то время как иной физик исписывал всю доску формулами в попытке вывести какое-нибудь свойство элементарных частиц, Фейнману достаточно было нарисовать картинку, и ответ становился очевиден сам собой. Он был магом, клоуном и хвостуном, но придуманная им магия позволяла формулировать Законы Физики простым и понятным любому способом. *Фейнмановские диаграммы* — это буквально фотографии событий, которые происходят при перемещении частиц в пространстве, столкновениях и взаимодей-

ствиях. Фейнмановская диаграмма может содержать всего несколько линий, описывающих столкновение двух электронов, или, напротив, быть обширной сетью взаимосвязанных ветвлений, замкнутых траекторий, описывающей все частицы, составляющие кристалл алмаза, живое существо или астрономическое тело. Эти диаграммы могут быть редуцированы до нескольких основных элементов, в которых заключено всё, что нам известно об элементарных частицах. Разумеется, это больше, чем просто фотографии, — в реальности за каждой диаграммой стоят технические детали, описывающие, что делать дальше, чтобы выполнить точный расчёт, но это не столь важно. В нашем случае одна картинка стоит тысячи уравнений.

## Квантовая электродинамика

Квантовая теории поля начинается с кастинга персонажей, а именно со списка элементарных частиц. В идеале список должен включать все элементарные частицы, но это непрактично: мы более чем уверены, что мы даже не знаем полного списка. Но составив неполный список, мы не слишком много потеряем. Это как в театральном представлении: в реальности каждый рассказ касается любого человека на земле, его прошлого и настоящего, но только сумасшедший драматург станет писать пьесу с несколькими миллиардами действующих лиц. Для каждой конкретной истории одни персонажи важнее других, и то же самое верно для физики элементарных частиц.

Авторская пьеса, сочинённая Фейнманом, называлась *Квантовая электродинамика*, или, для краткости, *КЭД*, и в ней было всего два действующих лица: электрон и фотон. Позвольте мне их представить.

## Электрон

В 1897 году английский физик Дж. Дж. Томпсон открыл первую элементарную частицу. Электричество уже было хорошо известно к тому моменту, но эксперименты Томпсона стали первыми, подтвердившими, что электрический ток представляет собой движение отдельных заряженных частиц. Этими движущимися частицами, питающими тостеры, лампочки и компьютеры, являются, конечно же, электроны.



, создаваемые электронами, трудно превзойти по драматизму. Когда гигантские молнии прочерчивают небосвод, электроны перетекают из одного заряженного облака в другое. Раскаты грома порождаются ударной волной, возникающей в результате быстрого расширения воздуха, нагреваемого столкновениями электронов молнии с молекулами воздуха. Вспышка молнии — это электромагнитное излучение, порождённое ускоряющимися и тормозящимися электронами. Крошечные искры и треск, вызываемые статическим электричеством в сухой день, являются проявлениями тех же физических процессов, только в меньших масштабах. Даже обычная бытовая электроэнергия — это не что иное, как тот же поток электронов, прирученный и запертый в медных проводах.

Каждый электрон имеет точно такой же электрический заряд, как и другие электроны. Заряд электрона невероятно мал, необходимо огромное число электронов — около  $10^{19}$  в секунду, — чтобы создать ток в один ампер. Есть одна странность в величине заряда электрона, которая смущала многие поколения студентов, изучавших физику: заряд электрона *отрицателен*. Почему? Есть ли в электроне что-либо принципиально отрицательное? В действительности отрицательность заряда электрона не является каким-то особым свойством этой частицы, это всего лишь результат произвольного соглашения. История этого соглашения восходит к Бенджамину Франклину<sup>1</sup>, который был первым физиком, предположившим, что электрический ток представляет собой поток заряженных частиц. Но Франклин ничего не знал об электронах и выбрал за направление электрического тока то, которое оказалось противоположным направлению движения электронов. В силу традиции остается таким же выбранное Франклином направление тока, а заряд электрона — отрицательным. Как следствие, мы, профессора физики, вынуждены постоянно напоминать студентам, что когда электрический ток течёт слева направо, электроны движутся справа налево. Если это доставляет вам неудобства, вините во всём Бена Франклина.

Если вдруг все электроны внезапно исчезнут, то это приведёт к гораздо более катастрофическим последствиям, чем неработающие то-

<sup>1</sup> Помимо авторства «Альманаха простака Ричарда» и «Декларации независимости», Бенджамин Франклин известен и как один из выдающихся учёных XVIII века.



стеры, лампочки и компьютеры. Электроны играют в природе очень важную роль. Всё обычное вещество состоит из атомов, которые, в свою очередь состоят из электронов, вращающихся вокруг атомных ядер как раскидайчики на резинках. Атомные электроны определяют химические свойства всех элементов таблицы Менделеева. Квантовая электродинамика — это гораздо больше, чем теория электронов: она является основой для теории всей материи.

## Фотон

Если электрон — это маркиз Карабас драмы КЭД, то фотон — несомненно, Кот в сапогах. Именно благодаря ему электрон добивается всех своих успехов. Процесс излучения света молнией можно разложить на микроскопические события, в которых отдельные электроны, ускоряясь или тормозясь, «стряхивают» с себя фотоны. Весь сюжет КЭД вертится вокруг одной основной репризы: излучения одиночных фотонов одиночными электронами.

Фотоны также играют незаменимую роль и в атоме. В определённом смысле, который станет вам понятен позднее, фотоны являются теми верёвками, тросами, которые притягивают электроны к ядру. Если бы фотоны были внезапно исключены из списка элементарных частиц, каждый атом мгновенно распался бы.

## Ядра

Одна из главных целей создания КЭД состояла в объяснении некоторых свойств простых атомов, и в первую очередь атома водорода. Почему именно водорода? Атом водорода, имея всего один электрон, настолько прост, что уравнения квантовой механики могут быть решены для него аналитически. Для более сложных атомов с многими электронами, влияющими друг на друга, решения могут быть получены только с помощью мощных компьютеров, которых не существовало, когда создавалась КЭД. Но для изучения любого атома в список действующих лиц должен быть добавлен ещё один персонаж — ядро. Ядра состоят из положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов. Эти две частицы очень похожи друг на друга, за исключением того, что нейтрон не имеет электрического заряда. Физики используют для этих двух частиц

обобщающее название: *нуклон*. Ядро, по сути, является каплей слипшихся нуклонов. Структура любого ядра, даже ядра атома водорода, настолько сложна, что физики, подобные Фейнману, решили игнорировать её. Вместо этого они сосредоточились на гораздо более простой физике электрона и фотона. Но они не могли полностью исключить ядро из рассмотрения, поэтому ввели его в пьесу не как актёра, а как сценический подмосток. Это стало возможным по двум причинам.

Во-первых, ядро гораздо тяжелее электрона. Оно настолько тяжёлое, что почти неподвижно. Поэтому не будет большой ошибкой замена ядра на неподвижный точечный положительный заряд.

Во-вторых, ядро очень мало по сравнению с атомом. Электрон вращается вокруг ядра на расстоянии около 100 000 ядерных диаметров и никогда не подлетает настолько близко, чтобы затронуть сложную внутреннюю структуру ядра.

Согласно редуционистскому взгляду на физику элементарных частиц, все явления природы — свойства твёрдых тел, жидкостей, газов, живой и неживой материи — могут быть редуцированы до взаимодействий и столкновения электронов, фотонов и атомных ядер. А весь сюжет пьесы состоит в том, что актёры тут и там сталкиваются друг с другом, отскакивают друг от друга, рождая в ходе столкновений новых актёров. Именно эти процессы и изображаются на *фейнмановских диаграммах*.

## Фейнмановские диаграммы

Подъехав к развилке на дороге, следуйте по ней.

— *Йоги Берра*<sup>1</sup>

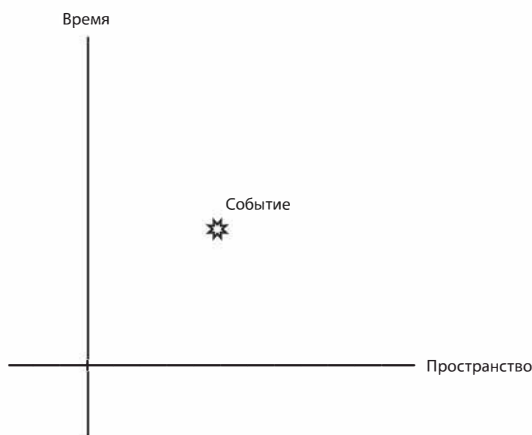
Итак, у нас есть актёры, у нас есть пьеса, и теперь нам нужна сцена. Шекспир сказал: «Весь мир — театр», и, как всегда, бард имел на это право. Сцена для нашего фарса — это весь мир, что для физика означает «всё обычное трёхмерное пространство». Верх-низ, восток-запад

---

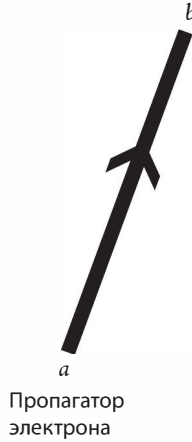
<sup>1</sup> Йоги Берра — американский бейсболист. Цитируемую в эпиграфе фразу Берра произнёс, объясняя, как доехать до его дома. На дороге есть развилка, и какой бы путь вы ни выбрали, вы придёте к его дому. — *Примеч. пер.*

и север-юг — вот три направления, которые мы можем задать вблизи поверхности Земли. Но классическая драма предполагает не только единство действия, но и единство времени. Таким образом, нам необходимо четвёртое направление: прошлое-будущее, образующее вместе с тремя пространственными направлениями *пространство-время*. С тех пор как Эйнштейн сформулировал специальную теорию относительности, физики взяли за правило изображать мир как четырёхмерное пространство-время, охватывающее не только «сейчас», но и всё прошлое и будущее. Точка в пространстве-времени — «где и когда» — называется *событием*.

Для представления пространства-времени можно использовать лист бумаги или меловую доску. Поскольку бумага или доска имеет только два измерения, нам придётся немного «похимичить». Нарисованная на бумаге горизонтальная ось будет изображать сразу все три пространственных направления. Напрягите своё воображение и представьте себе, что горизонтальная ось — это на самом деле не одна, а три перпендикулярные оси. Такой трюк оставляет нам вертикальное направление для представления времени. Будущее обычно принято изображать вверху, а прошлое — внизу (это, конечно, не более чем произвольное соглашение, подобное традиции изображать на географических картах Северное полушарие вверху, а Южное — внизу). Точка на листе бумаги изображает событие — где и когда. Это то, с чего начал Фейнман: частицы, пространство-время и события.

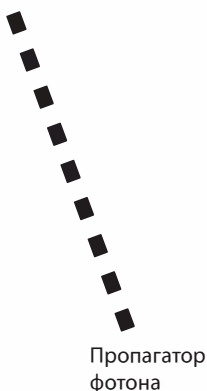


Наша первая фейнмановская диаграмма изображает самый простой случай: «электрон движется из точки  $a$  в точку  $b$ ». Чтобы представить это графически, нарисуем на листе бумаги линию, соединяющую событие  $a$  и событие  $b$ . Фейнман даже рисовал на линии маленькую стрелку, назначение которой скоро станет понятным. Линия, соединяющая  $a$  и  $b$ , называется *пропагатором*.



Фотон тоже может перемещаться из одной точки пространства-времени в другую. Фейнман изображал движение фотона другой линией, или пропагатором. Иногда пропагатор фотона изображается волнистой линией, а иногда — пунктирной. Я буду использовать пунктирную линию.

Пропагаторы — это больше, чем просто картинки. Они являются квантово-механическими инструкциями для расчёта вероятности того, что частица, побывав в точке  $a$ , окажется позже в точке  $b$ . Фейнману принадлежит радикальная идея, что частица не просто движется по кратчайшему пути из  $a$  в  $b$ , а странным образом чувствует все возможные маршруты, включая случайные зигзагообразные блуждания. Мы уже столкнулись с этой квантовой странностью в эксперименте с двумя щелями. Фотоны не просто проходят через левую или правую щель: они каким-то образом ухитряются попробовать оба пути и на основе этих проб создают ту самую удивительную интерференционную картину, которую мы наблюдаем. Согласно теории Фейнмана, все воз-

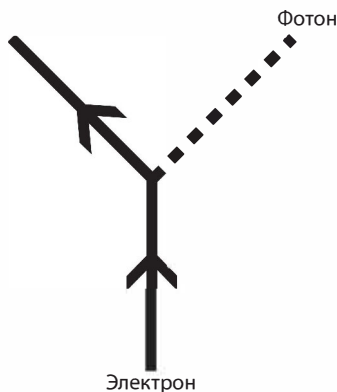


возможные пути вносят вклад в вероятность перехода частицы из точки  $a$  в точку  $b$ . На конечном этапе пишется особое математическое выражение, представляющее все возможные пути между двумя точками, которое и даёт нам искомую вероятность. Вот всё это и составляет концепцию пропатора.

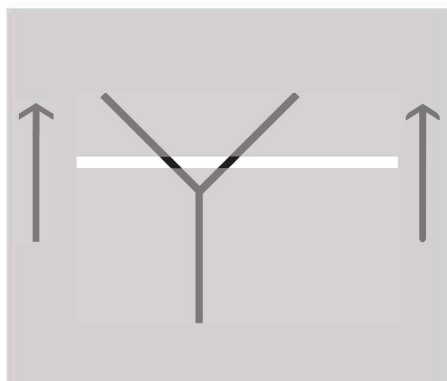
Если бы в природе происходили только свободные движения электронов и фотонов, то в мире никогда бы не случилось ничего интересного. Но существует один процесс, в котором принимают участие электроны и фотоны и который в конечном счёте отвечает за все интересное. Вспомним, что происходит, когда электроны перемещаются из одного грозового облака в другое. Внезапно ночь превращается в день. Свет, излучаемый внезапным мощным электрическим разрядом, на мгновение ярко освещает небо. Откуда берётся этот свет? Ответ кроется в поведении отдельных электронов. Когда движение электрона внезапно прекращается, он может в ответ стряхнуть с себя фотон. Процесс, называемый *излучением фотона*, является основным событием квантовой электродинамики. Подобно тому как вещество строится из частиц, все процессы строятся из элементарных событий излучения и поглощения. Так, электрон, двигаясь в пространстве-времени, может внезапно испустить квант света. Весь видимый свет, а также радиоволны, инфракрасное и рентгеновское излучение — всё состоит из фотонов, которые были испущены электронами либо на Солнце, либо в нити накала лампочки, либо в радиоантенне, либо в рентгеновском аппарате. Таким образом, Фейнман добавляет к списку элементарных

частиц второй список: список элементарных событий. И мы приходим ко второму виду фейнмановских диаграмм.

Фейнмановская диаграмма, соответствующая событию излучения фотона, называется *вершинной диаграммой*. Вершинная диаграмма выглядит как буква Y или как развилка дороги: электрон доходит до развилки и излучает фотон, после чего электрон отправляется по одной дороге, а фотон — по другой. Точка, в которой соединяются все три линии — событие излучения фотона, — называется вершиной.

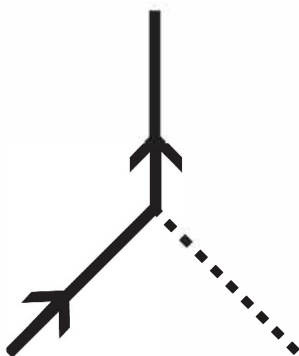


Есть способ превратить фейнмановскую диаграмму в короткий фильм. Вырежьте из картона квадрат со стороной около 10 см и прорежьте в нём щель шириной около 2 мм. Теперь положите квадрат на рисунок фейнмановской диаграммы так, чтобы щель располагалась



горизонтально. Двигая квадрат по рисунку снизу-вверх, вы увидите часть линии сквозь щель — это будет наш электрон. По достижении вершины электрон испустит фотон, и они начнут разлетаться в разные стороны. Двигая эту картонку над рисунком любой диаграммы, вы сможете наблюдать сквозь щель, как частицы движутся, сталкиваются, испускают и поглощают другие частицы, словом, делают всё то, что обычно положено делать элементарным частицам.

Если перевернуть вершинную диаграмму вверх ногами (но прошлое по-прежнему оставить внизу, а будущее вверх), то она будет описывать процесс сближения электрона и фотона и последующего поглощения фотона электроном.



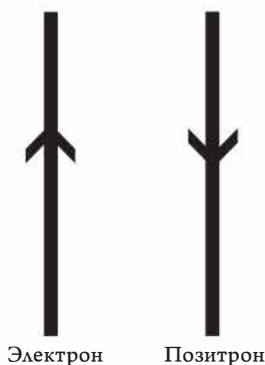
## Антивещество

Рисуя маленькую стрелку на пропагаторе электрона, Фейнман имел в виду вполне определённую цель. Каждый тип электрически заряженной частицы, будь то электрон или протон, имеет частицу-близнеца, а именно античастицу. Античастица во всём похожа на свою частицу-близнеца, за одним исключением: она имеет противоположный электрический заряд. Когда вещество встречается с антивеществом, берегись! Частица и античастица, объединяясь, исчезают (взаимоуничтожаются), высвобождая энергию в виде фотонов.

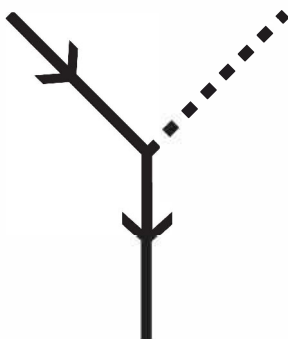
Античастица, парная электрону, называется *позитроном*. Казалось бы, следует расширить наш список частиц, добавив в него античастицы, но, согласно Фейнману, позитрон в действительности не является новым



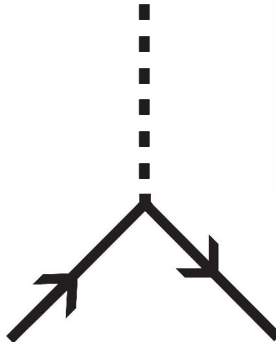
объектом. Он представляется как электрон, движущийся назад во времени! Пропагатор позитрона выглядит точно так же, как и пропагатор электрона, за исключением того, что стрелка на нём указывает в противоположную сторону: из будущего в прошлое.



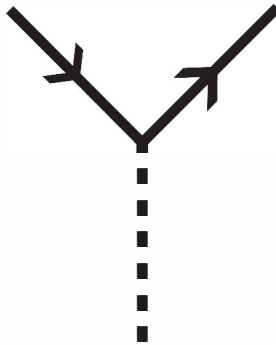
Представлять позитрон как электрон, движущийся назад во времени, или электрон как позитрон, движущийся назад во времени, — зависит от вас. Это совершенно произвольное соглашение. Но в этом представлении можно интерпретировать вершинную диаграмму новым способом: например, считать, что она изображает позитрон, излучающий фотон.



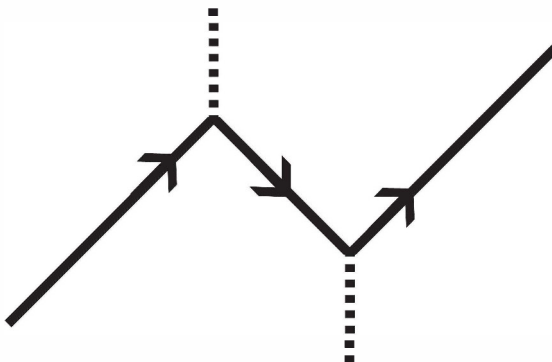
Можно даже повернуть диаграмму на  $90^\circ$ , и тогда она будет изображать процесс аннигиляции электрона и позитрона, в ходе которого остаётся один фотон...



... или фотон, распадающийся на электрон и позитрон.



Комбинируя основные ингредиенты, пропагаторы и вершины, можно построить более сложные процессы. Вот, например, один из интересных вариантов.



Как бы вы интерпретировали эту диаграмму? Если взять картонку с прорезанной в ней щелью и начать двигать её над диаграммой снизу вверх, то мы увидим сначала электрон и фотон; затем фотон внезапно распадается на электрон и позитрон; позитрон сближается с первым электроном, и они аннигилируют, образуя фотон. В конечном итоге мы снова имеем один электрон и один фотон.

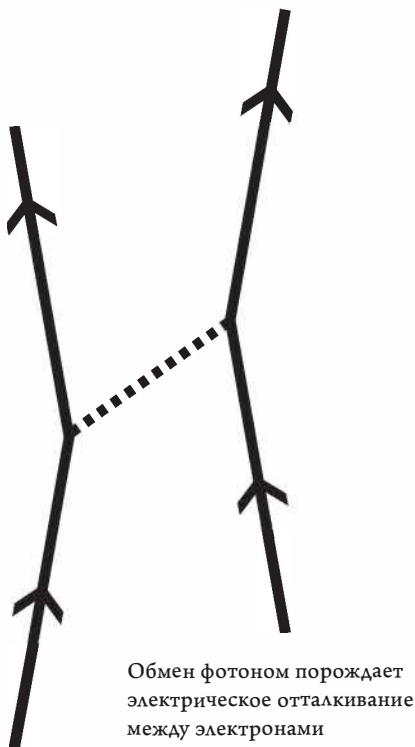
Фейнман предложил другой способ интерпретации этой диаграммы. С его точки зрения, электрон поворачивает вспять во времени, излучая фотон, затем движется в прошлое, поглощает фотон и снова поворачивает во времени в будущее. Оба способа интерпретации — позитроны и электроны либо электроны, движущиеся вспять во времени, — полностью эквивалентны. Вершины и пропагаторы: вот и всё, что есть в мире. Эти основные элементы могут быть скомбинированы бесконечным числом различных способов, позволяющих описать всю природу.

Но не упустили ли мы что-либо существенное? Объекты в природе действуют друг на друга посредством сил. Идея силы глубоко интуитивна — это одна из немногих физических сущностей, для понимания которых нет нужды обращаться к учебнику физики. Толкая камень, человек прикладывает к нему силу. Камень сопротивляется человеку, действуя на него с противоположной силой. Сила гравитационного притяжения удерживает нас на поверхности Земли, не давая улететь прочь. Сила магнита притягивает кусок железа. Сила статического электричества притягивает кусочки бумаги. Хулиганы сильнее ботаников. Идея силы является настолько основополагающей для нашей жизни, что эволюция, видимо, запрограммировала понятие силы в наших головах на уровне нейронных цепей. Но гораздо менее интуитивно понятным является тот факт, что все силы растут из притяжения и отталкивания между элементарными частицами.

Добавил ли Фейнман ещё один набор ингредиентов к своему рецепту: определённые правила для сил, действующих между частицами? Нет.

Все силы в природе появляются из так называемых *обменных диаграмм*, в которых фотон, испускаемый одной частицей, поглощается другой. Например, электрические силы, действующие между электронами, описываются фейнмановской диаграммой, в которой один электр-

рон испускает фотон, который впоследствии поглощается другим электроном.



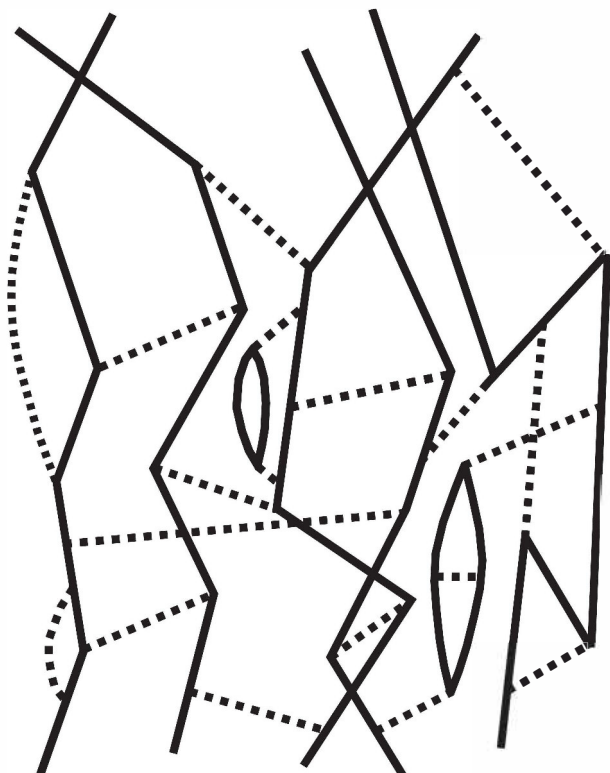
Фотон, движущийся через пространство между электронами, порождает действующие между ними электрические и магнитные силы. Если электроны покоятся, то силы между ними чисто электростатические<sup>1</sup> и быстро уменьшаются с увеличением расстояния между зарядами по закону обратных квадратов. При движении электронов к электростатическим силам добавляются магнитные. И магнитные и электростатические силы выводятся из одних и тех же фейнмановских диаграмм.

Электроны не единственные частицы, которые могут излучать фотоны. На это способна любая электрически заряженная частица, в том числе и протон. Это означает, что фотонами могут обмениваться

<sup>1</sup> Электростатические силы часто называют кулоновскими.

два протона или протон и электрон. Данный факт имеет огромное значение для науки и жизни в целом. Постоянный обмен фотонами между ядром и атомными электронами порождает силу, удерживающую атом от разрушения. Без этих снующих туда-сюда фотонов атомы разлетятся на составные частицы и всё вещество прекратит своё существование.

Чрезвычайно запутанные фейнмановские диаграммы — сеть вершин и пропагаторов — могут представлять сложные процессы с участием любого числа частиц. Таким образом, теория Фейнмана описывает всё вещество, от самых простых до самых сложных объектов.



Попробуйте различными способами подбавлять стрелки к пропагаторам на этой картине, превращая сплошные линии в электроны или позитроны.

## Постоянная тонкой структуры

Различные уравнения и физические формулы содержат целый ряд различных числовых констант. Некоторые из этих констант представляют собой числа, заимствованные из чистой математики. Пример: число 3,14159..., более известное под своим греческим именем  $\pi$ . Мы знаем значение  $\pi$  до миллиардов десятичных знаков, причём не измеряя его, а вычисляя на основе чисто математического определения:  $\pi$  — это отношение длины окружности к диаметру. Другие математические числа, такие как квадратный корень из двух и число, обозначаемое буквой  $e$ , тоже могут быть вычислены с бесконечной точностью, если только кто-нибудь захочет это сделать.

Но в физических формулах присутствуют и другие числа, которые не имеют специфического математического происхождения. Их можно назвать эмпирическими числами. Например, в ядерной физике используется очень важное соотношение между массой протона и массой нейтрона. Его численное значение известно до семидесятичных знаков: 1,001378. На сегодняшний день не известно способа вычислить следующие десятичные знаки чисто математическим путём. Необходимо отправиться в лабораторию и измерить их. Наиболее фундаментальные из этих эмпирических чисел удостоены звания «мировых констант». Постоянная тонкой структуры<sup>1</sup> — одна из таких мировых констант. Подобно  $\pi$ , постоянная тонкой структуры обозначается греческой буквой  $\alpha$  (альфа). В популярной литературе часто приводится её приближённое значение  $1/137$ . Её наиболее точное значение известно до одиннадцатого знака после запятой: 0,00729735257, и это одна из наиболее точно измеренных физических констант.

Постоянная тонкой структуры является примером величины, которые физики называют *константами связи*. Каждая константа связи ассоциирована в квантовой теории поля с одним из базисных событий, с определённым типом вершины на фейнмановской диаграмме. Константа связи является мерой *силы* или *интенсивности* взаимодействия, представленного вершиной соответствующего типа. В квантовой

---

<sup>1</sup> Термин «тонкая структура» принесли в физику оптики, изучавшие детали спектра атома водорода. Впервые постоянная тонкой структуры появилась в теории, описывавшей этот спектр.

, что происходит при излучении фотона.

Можно начать с вопроса: что определяет конкретную точку, в которой электрон, двигаясь в пространстве-времени, испускает фотон? Ответ заключается в том, что ничто не определяет, — физика на микроуровне непредсказуема. Природа содержит элемент случайности, который буквально сводил с ума Эйнштейна в его последние годы. «Бог не играет в кости!» — протестовал Эйнштейн<sup>1</sup>. Но независимо от того, нравилось ли это Эйнштейну, природа не является детерминированной. В природе, как я уже сказал, есть элемент случайности, который встроены в Законы Физики на самом глубоком уровне, и даже Эйнштейн ничего не мог с этим поделать. Но то, что природа не является детерминированной, вовсе не означает, что она полностью хаотична. Вот тут и выступают на сцену принципы квантовой механики. В отличие от ньютоновской физики, квантовая механика никогда не предсказывает будущее на основании информации о прошлом. Вместо этого она предоставляет очень точные правила для вычисления вероятности различных альтернативных результатов эксперимента. Нет никакой возможности предсказать окончательное местоположение фотона, который прошёл через щель, равно как не существует никакой возможности точно предсказать, в каком месте своей траектории электрон испустит фотон или в каком месте другой электрон сможет его поглотить. Но существует определённая вероятность для этих событий.

Хорошей иллюстрацией такой вероятности служит работа электронно-лучевой трубки старого телевизора. Свет, исходящий от телевизионного экрана, состоит из фотонов, рождаемых врезающимися в экран электронами. Электроны испускаются электронной пушкой в задней части кинескопа и направляются к экрану электрическими и магнитными полями. Но не каждый электрон, врезающийся в экран, излучает фотон. Некоторые излучают, а большинство — нет. Грубо говоря, вероятность того, что конкретный электрон испустит квант света, даётся постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Другими словами, только один из 137 электронов испускает фотон. Это означает, что  $\alpha$  — это вероятность

<sup>1</sup> В ответ на это Бор возражал: «Эйнштейн, не указывайте Богу, что делать».



того, что электрон, двигаясь вдоль своей траектории, благоволит излучить фотон.

Фейнман не просто рисовал картинки. Он изобрёл набор правил для расчёта вероятностей сложных процессов, изображённых на этих картинках. Иными словами, он изобрёл точный математический аппарат, который предсказывает вероятность любого процесса в терминах простейших событий: пропагаторов и вершин. В конечном итоге вероятности всех процессов в природе сводятся к константам связи, подобных  $\alpha$ .

Постоянная тонкой структуры также управляет интенсивностью процессов, представленных обменной диаграммой, которая, в свою очередь, определяет силу электрического взаимодействия между заряженными частицами. Она определяет, насколько сильно атомное ядро притягивает к себе электроны. Как следствие, она определяет размер атома и скорости, с которыми электроны движутся по своим орбитам, и в конечном итоге она управляет силами, действующими между различными атомами, которые позволяют им соединяться в молекулы. Но самое важное то, что мы не знаем, почему она имеет значение  $0,00729735257$ , а не какое-то другое. Законы Физики, обнаруженные в XX веке, оказались очень точными и полезными, но происхождение этих законов остаётся загадкой.

Теория этого упрощённого мира электронов, фотонов и точечных ядер и есть квантовая электродинамика, и её фейнмановская версия оказалась невероятно успешной. С помощью разработанных Фейнманом методов свойства фотонов, электронов и позитронов были описаны с удивительной точностью. Кроме того, если в теорию добавить упрощённый вариант ядра, то с такой же невероятной точностью удаётся описать и свойства простейшего атома — атома водорода. В 1965 году Ричард Фейнман, Джулиан Швингер и японский физик Син-Итиро Томонага получили за работы по квантовой электродинамике Нобелевскую премию.

Конец первого акта.

Если в первом акте театральное действие ограничивалось только двумя персонажами, то во втором акте разворачивается на сцене эпическое полотно с сотнями актёров. Новые частицы, обнаруженные в 1950-х и 1960-х годах, пополнили ряды неуправляемой театральной

массовки и на сцене, помимо электронов и фотонов, появились нейтрино, мюоны, тау-лептоны, *u*-кварки, *d*-кварки, странные кварки, очарованные кварки, *b*-кварки, *t*-кварки, глюоны, *W*- и *Z*-бозоны, бозоны Хиггса и другие действующие лица. Никогда не верьте тому, кто говорит, что физика элементарных частиц элегантна. Эта сборная солянка названий частиц отражает такое же нагромождение масс, электрических зарядов, спинов и других свойств. Но, несмотря на обилие и разнообразие действующих лиц, мы знаем, как описать их поведение с огромной точностью. «Стандартная модель» — это название математической конструкции (особого варианта квантовой теории поля), которая лежит в основе современной теории элементарных частиц. Хотя она гораздо сложнее квантовой электродинамики, фейнмановские методы настолько мощные, что и в этот раз они позволяют выразить всё в виде простых картинок. Принципы точно такие же, как в КЭД: всё построено из пропагаторов, вершин и констант связи. Но есть новые актёры и совершенно новые сюжетные линии, одна из которых называется КХД.

## Квантовая хромодинамика

Много лет назад я был приглашён в один знаменитый университет прочитать серию лекций на модную тему, называемую квантовой хромодинамикой. Проходя коридорами физического университета, я услышал, как пара студентов обсуждала название моей лекции. Один, рассматривая объявление о лекции на информационном стенде, спросил: «И о чём это всё? Что такое квантовая хромодинамика?» Второй, подумав и почесав в затылке, ответил: «Хм ... это, должно быть, новый способ использования квантовой механики для обработки фотографий».

Квантовая хромодинамика (КХД) не имеет дела ни с фотографией, ни даже со светом. КХД — это современная версия ядерной физики. Обычная ядерная физика начиналась с протонов и нейтронов (нуклонов), но КХД шагнула гораздо глубже. Вот уже более сорока лет известно, что нуклоны не являются элементарными частицами, они скорее похожи на атомы или молекулы, только в гораздо меньших масштабах. Если бы мы смогли заглянуть внутрь протона при помощи

чрезвычайно мощного микроскопа, то увидели бы, что он состоит из трёх кварков, связанных друг с другом струнами частиц, называемых *глюонами*. Теория кварков и глюонов — КХД — это более сложная теория, чем КЭД, и я не в состоянии описать её на нескольких страницах. Но основные факты не слишком сложны. Вот список её действующих лиц.

## Шесть кварков

Во-первых — кварки. Существует шесть типов кварков. Для того чтобы отличить одни кварки от других, физики дали им причудливые имена: «u-кварк», «d-кварк», «странный кварк», «очарованный кварк», «b-кварк» и «t-кварк»<sup>1</sup>, или более лаконично, u-, d-, s-, c-, b- и t-кварки. Разумеется, нет ничего странного в странном кварке и очарованный кварк ничем не очарован, но глупые имена придают им немного индивидуальности.

Почему существуют шесть типов кварков, а не четыре или два? Да кто ж его знает! Теория с четырьмя или двумя типами кварков принципиально ничем не отличается от теории с шестью типами. Всё, что мы знаем, — это то, что математика стандартной модели требует, чтобы кварки входили в неё парами: u-кварк с d-кварком, очарованный со странным и t-кварк с b-кварком. Но причина тройной репликации простейшей теории с одним «верхним» и одним «нижним» кварком остаётся тайной. Хуже того: только u- и d-кварки играют существенную роль в обычных ядрах<sup>2</sup>. Если бы КХД была инженерным проектом, то присутствие в ней остальных кварков могло бы рассматриваться как экстравагантное разбазаривание ресурсов.

Кварки в некотором смысле похожи на электроны; они несколько тяжелее и имеют своеобразные электрические заряды. В качестве

<sup>1</sup> В английском языке буквы, обозначающие кварки, соответствуют английским словам: up, down, strange, charm, bottom и top, но поскольку на русский язык слова up и top переводятся одинаково, как «верхний», равно как и down и bottom — как «нижний», то во избежание путаницы в русскоязычной литературе принято все кварки, кроме, быть может, странного и очарованного, обозначать латинскими буквами. — *Примеч. пер.*

<sup>2</sup> Существование странного кварка оказывает незначительное влияние на свойства нуклонов, но остальные кварки не вносят никакого вклада.

единицы электрического заряда в микромире обычно принимается заряд протона, которому приписывается значение  $+1$ . Заряд электрона равен заряду протона и противоположен по знаку:  $-1$ . Электрические заряды в этой системе единиц оказываются дробными. Например, «верхние» —  $u$ -,  $c$ -, и  $t$ -кварки — несут положительный заряд, равный двум третям заряда протона:  $+2/3$ . «Нижние» —  $d$ -,  $s$ - и  $b$ -кварки — имеют отрицательный заряд, равный одной трети заряда электрона:  $-1/3$ .

Протоны и нейтроны состоят каждый из трёх кварков. Протон состоит из двух  $u$ -кварков и одного  $d$ -кварка. Сложив электрические заряды кварков, мы получим электрический заряд протона:

$$2/3 + 2/3 - 1/3 = 1.$$

Нейтрон состоит из одного  $u$ -кварка и двух  $d$ -кварков. Аналогичным образом сложив заряды этих кварков, мы получим заряд нейтрона:

$$2/3 - 1/3 - 1/3 = 0.$$

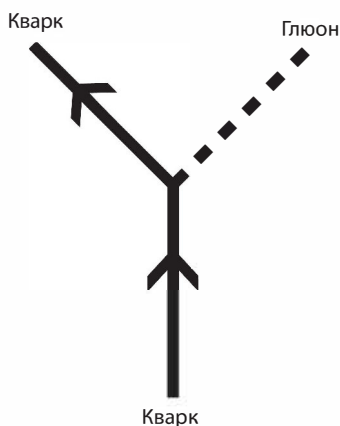
Что произойдет, если мы попытаемся построить протон или что-то вроде протона, заменив  $d$ -кварк  $s$ -кварком? Такие объекты существуют — их называют *странными частицами*, но они не встречаются нигде, кроме физических лабораторий. И даже в лабораториях странные частицы — всего лишь мимолетные явления, они существуют краткий миг, прежде чем распасться на другие частицы. То же верно и в отношении частиц, содержащих очарованные кварки,  $t$ -кварки и  $b$ -кварки. Только из  $u$ -кварков и  $d$ -кварков могут быть собраны стабильные или долгоживущие объекты. Как я уже сказал, если странный, очарованный,  $b$ - и  $t$ -кварк внезапно будут удалены из списка элементарных частиц, вряд ли кто-нибудь это заметит.

А что относительно кварков, перемещающихся вспять во времени? Как и электрон, каждый кварк имеет свою античастицу. Антикварки могут быть собраны в антипротоны и антинейтроны. Когда-то, в самом начале истории Вселенной, когда температуры достигали миллиардов градусов, антинуклоны были столь же обильны, как обычные нуклоны. Но по мере охлаждения Вселенной античастицы почти полностью исчезли, оставив в мире только обычные протоны и нейтроны в атомных ядрах.

## Глюон

Нуклоны подобны крошечным атомам, состоящим из кварков. Но сами по себе кварки не способны связать себя в нуклоны. Как и в случае атома, тут требуется еще один ингредиент для создания силы притяжения, «склеивающей» кварки вместе. В случае атома мы точно знаем, что представляет собой этот клей. Атом связывается в единое целое благодаря непрерывно летающим взад-вперед фотонам, обеспечивающим взаимодействие между электронами и ядрами. Но силы, генерируемые фотонным обменом, слишком слабы, чтобы связать кварки в плотную структуру нуклона — не забывайте, что нуклоны в 100 000 раз меньше атомов. Значит, нам нужна ещё одна частица, обеспечивающая более сильное взаимодействие, способное удержать кварки на столь малом расстоянии. Это частица очень метко названа *глюоном*<sup>1</sup>.

Основные события в любой квантовой теории поля всегда одни и те же: испускание одними частицами других. Фейнмановские диаграммы, описывающие эти события, всегда имеют форму вершинной диаграммы в виде буквы Y. Основные вершинные диаграммы для КХД выглядят точно так же, как вершинная диаграмма испускания фотонов, только с заменой электрона на кварк, а фотона на глюон.



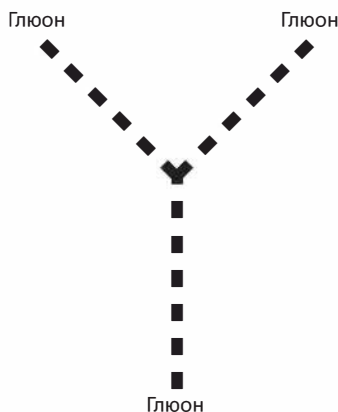
<sup>1</sup> Название «глюон» происходит от английского слова *glue* — клей. — *Примеч. пер.*

Неудивительно, что источником сил, связывающих кварки в протонах и нейтронах, является обмен глюонами. Но есть два существенных различия между КЭД и КХД. Первое различие — количественное. Числовая константа, ответственная за эмиссию глюонов, не так мала, как постоянная тонкой структуры. Эта константа называется  $\alpha_{\text{QCD}}$  (альфа-КХД), и она примерно в 100 раз больше, чем постоянная тонкой структуры, это является причиной того, что силы, действующие между кварками, гораздо сильнее электромагнитных. Поэтому КХД иногда называют теорией *сильных взаимодействий*.

Второе отличие — качественное. Глюоны ведут себя как клей, что всегда напоминает мне одну из сказок дядюшки Римуса: «Однажды Братец Кролик увидел на дороге смоляное чучело. Братец Кролик сказал: “Доброе утро”, но чучело ничего ему не ответило. Тогда Братец Кролик решил прочитать чучело. Он ударил его кулаком, и кулак прилип к смоле. Тогда Братец Кролик боднул чучело головой, и голова тоже прилипла к смоле. Братец Кролик изо всех сил пытался освободиться, но смола просто растягивалась и тащила его лапы и голову обратно. Так он безуспешно боролся с “притяжением” смоляного чучела, пока его не выручил проходивший мимо Братец Медведь».

При чём здесь эта детская история? При том, что кварки являются миниатюрными смоляными чучелами для других кварков. Они крепко склеены друг с другом похожим на липкую смолу веществом, состоящим из глюонов. Ответственной за это странное поведение является одна из дополнительных вершин, не имеющая аналогов в КЭД. Любая электрически заряженная частица может испустить фотон. Но фотоны не взаимодействуют друг с другом. Они являются электрически нейтральными и поэтому не излучают другие фотоны. В этом отношении глюоны резко отличаются от фотонов. Законы КХД требуют существования вершин, в которых глюон распадается на два глюона, и каждый из них движется по собственному пути после развилки.

Эти различия между КХД и КЭД делают КХД гораздо более сложной теорией, чем её электрический аналог. Среди прочего это означает, что глюоны могут обмениваться глюонами и связываться в объекты, называемые *глюолами*, — это частицы, не содержащие кварков и электронов. Более того, глюоны не обязаны собираться исключительно в пары, они могут образовывать длинные цепочки тягучего клея. Ранее



я сравнил электроны в атоме с шариками, болтающимися на верёвочках. Верёвочки в моём сравнении были метафорой, но в случае кварков струны, держащие их вместе, вполне реальны. Они представляют собой глюонные струны, натянутые между кварками. В том случае, если кварк под действием внешнего воздействия вылетает из нуклона, за ним тянется длинная глюонная струна, которая в конечном итоге возвращает его обратно.

## Слабое взаимодействие

Если вы уже устали от изучения физики элементарных частиц, это нормально. В ней слишком много сложных вещей, которые необходимо запоминать. У нас слишком много частиц, поведение которых требует описания, и нет никаких разумных предположений, откуда они все взялись. Квантовой хромодинамикой и квантовой электродинамикой вряд ли исчерпываются все части, которые составляют Стандартную модель. Всё это очень далеко от элегантной и простой физической теории, которую мы ожидали обнаружить «в основании всего». Физика элементарных частиц оказалась больше похожей на зоологию и ботанику, чем на точную науку. Но это, увы, факт, и мы не можем изменять факты.

Сейчас я расскажу ещё об одной части Стандартной модели. Эта часть известна как *слабое взаимодействие*. Слабое взаимодействие, подобно электромагнитному и сильному, играет важную роль в объясне-



нии нашего собственного существования, хотя причины, по которым оно так важно, на первый взгляд не очевидны, мы вернёмся к ним в последующих главах.

История слабого взаимодействия снова возвращает нас в конец XIX века, когда французский физик Антуан Анри Беккерель открыл радиоактивность. Открытие Беккереля всего на один год опередило обнаружение электрона Дж. Дж. Томсоном.

Радиоактивность принято делить на три различных типа: альфа, бета и гамма. Они соответствуют трём очень разным явлениям, только одно из которых (бета-распад) связано со слабым взаимодействием. Сегодня мы знаем, что бета-лучи из уранового образца Беккереля были на самом деле электронами, испускаемыми нейтронами ядер урана. После испускания электрона нейтрон немедленно превращается в протон.

Ни в КЭД, ни в КХД нет ничего, что могло бы объяснить, как нейтрон может испустить электрон и стать протоном. Самое простое обоснование, которое, возможно, уже пришло вам в голову, — это добавить на диаграмму дополнительные вершины и включить их в наш список основных событий. В вершину будет входить исходный нейтрон, а после развилки — расходиться каждый своей дорогой протон и электрон. Но это неверное описание. Дело в том, что в этот момент на сцене появляется новый персонаж — *нейтрино*. Беккерель не знал, что при распаде нейтрона помимо электрона и протона появляется ещё одна частица, точнее, античастица — призрачное антинейтрино.

## Нейтрино

Нейтрино похоже на электрон, но оно не имеет электрического заряда. Представьте себе, что это электрон, который потерял свои электрические свойства. В некотором смысле отношение между электроном и нейтрино аналогично отношению между протоном и нейтроном.

Что же тогда остаётся в нейтрино от электрона? Нейтрино имеет небольшую массу и... собственно, всё. Оно не излучает фотонов. Оно не испускает глюонов. Это означает, что оно не участвует ни в одном из взаимодействий, в которых участвуют электрически заряженные частицы или кварки. Нейтрино не образует сложных объектов, связы-

ваясь с другими нейтрино или частицами. Оно вообще ничего не делает. Фактически нейтрино является одиночкой, оно способно пролететь сквозь свинцовую стену толщиной в несколько световых лет как сквозь пустое пространство. Но нейтрино не полный ноль. Чтобы понять, как нейтрино участвует в нашей пьесе, следует ввести в спектакль ещё одного актёра — *W-бозон*.

## **W-бозон**

Не беспокойтесь относительно значения слова «бозон». Оно просто обозначает другую частицу, аналогичную по своим свойствам фотону или глюону, но имеющую электрический заряд. *W-бозон* появляется в двух ампулах: положительно заряженный *W-бозон* и отрицательно заряженный *W-бозон*. Как вы догадались, они являются античастицами друг друга.

*W-бозон* является ключом к деятельности нейтрино. Не только кварки и электроны могут испускать *W-бозоны* — нейтрино тоже на это способны. Вот неполный список дел *W-бозонов*:

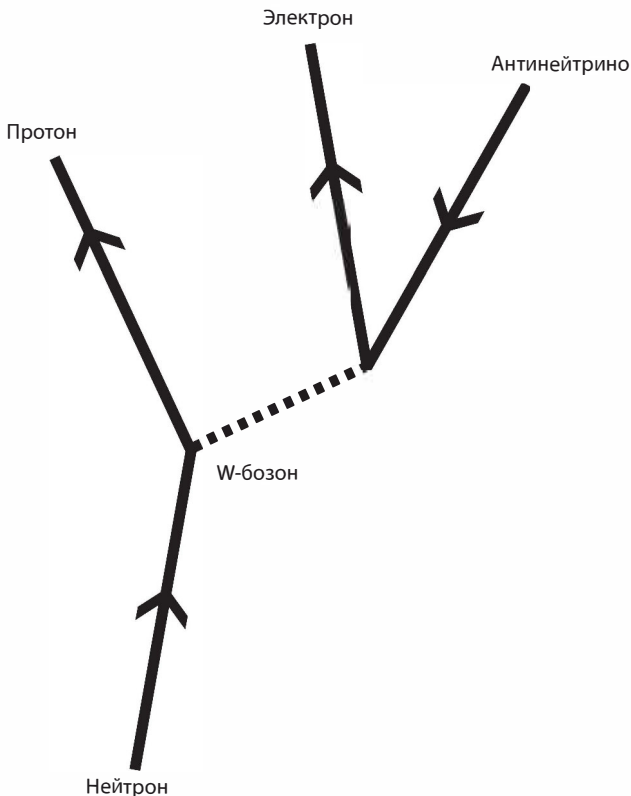
- ◆ электрон, испуская *W-бозон*, превращается в нейтрино;
- ◆ *u*-кварк, испуская *W-бозон*, превращается в *d*-кварк;
- ◆ *u*-кварк, испуская *W-бозон*, превращается в *s*-кварк;
- ◆ *s*-кварк, испуская *W-бозон*, превращается в *s*-кварк;
- ◆ *t*-кварк, испуская *W-бозон*, превращается в *b*-кварк;
- ◆ бозон Хиггса испускает *Z-бозон*...

Список можно продолжать, но он включает в себя частицы, с которыми мы познакомимся только в следующих главах.

Как я уже говорил, протоны и нейтроны не попадают в список элементарных частиц потому, что они состоят из кварков, но иногда полезно забыть о кварках и представлять нуклоны как элементарные частицы. Это потребует от нас добавить некоторые дополнительные вершины. Например, протон может испускать фотон. В действительности фотон испускает один из составляющих протон кварков, но внешне всё выглядит так, как будто это сделал протон. Аналогичным образом один из двух *d*-кварков внутри нейтрона может испустить *W-бозон* и превратиться в *u*-кварк, обусловив таким образом превра-

щение нейтрона в протон. Этот процесс будет описываться вершиной, в которой нейтрон становится протоном, испуская  $W$ -бозон.

Теперь мы готовы рисовать диаграммы Фейнмана, объясняющие бета-излучение, которое обнаружил Беккерель, изучая соли урана. Диаграмма будет выглядеть практически так же, как КЭД-диаграмма, за исключением того, что в том месте, где на диаграмме КЭД должен быть обмен фотонами, у нас будет обмен  $W$ -бозонами. В действительности слабое взаимодействие очень тесно связано с электромагнитным за счёт фотонов.



Возьмите картонку с прорезанной в ней щелью, начните перемещать её над диаграммой снизу вверх. Нейтрон (который может находиться внутри ядра) испускает отрицательно заряженный  $W$ -бозон и превра-

щается в протон.  $W$ -бозон пролетает очень малое расстояние (около  $10^{-16}$  см) и распадается на две частицы: электрон и движущееся вспять во времени нейтрино, или, на светском языке, антинейтрино. Вот что мог бы увидеть Беккерель в 1896 году, если бы имел очень мощный супермикроскоп. Позже мы увидим важность такого процесса в создании химических элементов, из которых мы состоим.

## Законы Физики

Теперь, надеюсь, вы имеете чёткое представление о том, что я подразумеваю под Законами Физики. К сожалению, я не могу подобно некоторым физикам сказать вам, что эти законы элегантны. Правда состоит в том, что это не так. В этой картине слишком много частиц, слишком много вершин диаграмм и слишком много констант связи, а ведь я ещё не рассказал вам о случайном наборе масс, которыми обладают частицы. Все это образует очень неприятный коктейль, но есть одно «но»: эти законы описывают свойства элементарных частиц, ядер, атомов и молекул с невероятной точностью.

Однако цена, которую приходится платить, требует введения не менее 30 «физических констант»<sup>1</sup> — масс и констант связи, значения которых не имеют иного обоснования, кроме того, что они «работают». Откуда берутся эти числа? Физики не в состоянии вывести эти числа ни из тонких материй, ни из математических вычислений. Они являются результатом многих лет экспериментальных исследований элементарных частиц на ускорителях в лабораториях многих стран. Многие из этих констант, как, например, постоянная тонкой структуры, были измерены с большой точностью, но в конечном итоге, как я уже сказал, мы не понимаем, почему они такие, какие есть.

Стандартная модель является кульминацией и квинтэссенцией более чем полувековой истории развития физики элементарных частиц. В сочетании с методом фейнмановских диаграмм она даёт

---

<sup>1</sup> Это только необходимый минимум, не включающий числовые параметры, необходимые для космологии или некоторых расширений Стандартной модели. Если включить все дополнительные константы, то их число легко перевалит за сотню.

точные описания всех явлений в физике элементарных частиц, включая способы объединения частиц в атомные ядра, атомы, молекулы, газы, жидкости и твёрдые тела. Но она слишком сложна, чтобы служить образцом простоты, которая, как мы надеемся, будет отличительной чертой действительно фундаментальной теории — окончательной теории природы.

В отличие от человеческих законов, Законы Физики являются безусловными законами. Мы можем соблюдать закон или игнорировать его, но электрон не имеет такого выбора. Эти законы не похожи на правила дорожного движения или налоговое законодательство, которое меняется от штата к штату и от года к году. Возможно, самый важный экспериментальный факт, который вообще делает возможным изучение физики, состоит в том, что все мировые константы действительно являются константами. Эксперименты, поставленные в разное время в разных местах, описываются одними и теми же фейнмановскими диаграммами и дают одни и те же значения для каждой константы связи и массы. Когда постоянная тонкой структуры была измерена в Японии в 1990-х, она оказалась точно такой же, как и в Брукхейвенской лаборатории в Лонг-Айленде в 1950 году или в Стэнфордском университете в 1970 году.

В самом деле, когда физики проводят космологические исследования, они принимают как должное, что законы природы одинаковы повсюду во Вселенной. Но законы не обязаны быть такими. Безусловно, можно представить себе мир, в котором постоянная тонкой структуры изменяется со временем или в котором отдельные константы варьируются от одного места к другому. Время от времени физики ставят под сомнение предположение, что константы абсолютно постоянны, но пока что у нас нет ни одного свидетельства того, что они не одинаковы в любой части *наблюдаемой Вселенной*: не во всём гигантском Мегаверсуме, а в той части Вселенной, которую мы можем наблюдать при помощи различных типов телескопов, имеющих в нашем распоряжении.

Когда-нибудь мы сможем достичь далёких галактик и измерить константы непосредственно на месте. Но даже сейчас мы постоянно получаем «сводки» из удалённых областей Вселенной. Астрономы ловят свет, приходящий от далёких источников, и распутывают спек-

тральные линии, образующиеся при излучении или поглощении света далёкими атомами<sup>1</sup>. Отношения между отдельными спектральными линиями весьма запутанны, но они всегда одинаковы, независимо от того, где и когда возник пойманный телескопом свет. Практически любое изменение в местных Законах Физики изменило бы детали спектра, так что у нас есть убедительное свидетельство, что правила одинаковы во всех частях наблюдаемой Вселенной.

Эти правила — список частиц, масс и констант связи, список фейнмановских правил — то, что я называю Законами Физики, — универсальны. Они управляют практически всеми аспектами физики, химии и, в конечном счёте, биологии, но они не объясняют сами себя. У нас нет теории, которая сказала бы нам, почему правильна именно Стандартная модель, а не что-то другое. Может быть, есть ещё и другие Законы Физики? Могут ли списки элементарных частиц, масс и констант связи отличаться от наших в тех частях Вселенной, которые мы не можем наблюдать? Могут ли Законы Физики далёкого прошлого отличаться от нынешних? Если да, то что управляет их изменением? Существуют ли более глубокие законы, определяющие, какие Законы Физики возможны, а какие нет? Таковы вопросы, стоящие перед фундаментальной физикой в начале XXI века. Ответам на эти вопросы и посвящён «Космический ландшафт».

Кое-что может вызвать у вас недоумение после прочтения этой главы. Я не раз упоминал, что наиболее важной силой во Вселенной является гравитация. Ньютон создал классическую теорию гравитации, которая носит его имя. Эйнштейн ещё глубже проник в природу гравитации в общей теории относительности. И, несмотря на то что законы гравитации гораздо важнее для определения судьбы Вселенной, чем все остальные, гравитация не является частью Стандартной модели. Причина такой дискриминации вовсе не в том, что тяготение не имеет значения. Напротив, из всех сил природы оно будет играть в этой книге самую большую роль. Причина отделения законов гравитации от других законов заключается в том, что отношение гравитации к микроскопическому миру квантово-механических элементарных частиц ещё никому не понятно. Фейнман пытался применить собствен-

---

<sup>1</sup> Спектральные линии обсуждаются в главе 5.

ные методы к гравитации и с сожалением сдался. Более того, он как-то посоветовал мне никогда не заниматься этой темой. Пусть это печенье пока постоит в закрытой банке на верхней полке...

В следующей главе я расскажу вам о «матери всех физических проблем». Это мрачная сказка о том, как всё идёт наперекосяк при попытке совместить гравитацию с описанными выше Законами Физики. Это жестокий рассказ о крайних формах насилия над природой. Законы Физики в том виде, как мы их понимаем, готовят нам чрезвычайно смертоносную Вселенную. Очевидно, в супе чего-то не хватает.



## Глава 2

# МАТЬ ВСЕХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

*Нью-Йорк, 1967*

Впервые я узнал о «матери всех физических проблем» в один погожий осенний день в Нью-Йорке в малоизвестном районе Вашингтон-Хайтс. Расположенный в трёх километрах к северу от Колумбийского университета, Вашингтон-Хайтс является частью Манхэттена, но во многих отношениях больше напоминает Южный Бронкс, где я вырос. Когда-то он был еврейским районом, где проживали представители среднего класса, но потом большинство евреев покинули его, и их сменили латиноамериканцы, преимущественно кубинские рабочие. Этот большой район недорогих кубинских ресторанов был моим любимым кубинско-китайским местом.

Люди, знакомые с этим районом, знают, что на Амстердам-авеню около 187-й стрит есть несколько необычных зданий в византийском стиле. Прилегающие улицы заполнены молодыми ортодоксальными еврейскими студентами и раввинами; местным студенческим кабаком служила в то время «фалафельная», известная под названием MacDavid's. Дома по нечётной стороне — это кампус Иешива-университета, старейшего еврейского высшего учебного заведения в Соединённых Штатах, специализирующегося на подготовке раввинов и тал-



мудических учёных, но в 1967 году в его состав входила высшая физико-математическая школа Белфер.

Я только что пришёл в школу Белфер на должность ассистента профессора после года докторской работы в Беркли. Поскольку экзотические здания Иешивы ничем не напоминали кампусы Беркли или Гарварда или любые другие университетские кампусы, поиск физического факультета стал проблемой. Бородатый парень на улице указал на верхнюю часть одного из зданий, похожую на купол башни или маковку церкви. Всё это не выглядело многообещающим, но это была единственная работа, на которую я мог рассчитывать, поэтому я вошёл внутрь и поднялся по винтовой лестнице. Наверху обнаружилась открытая дверь в очень маленький тёмный офис, заполненный массивными книжными шкафами с большими томами в кожаных переплётах, все названия которых были написаны на иврите. В офисе сидел похожий на раввина седобородый джентльмен, читавший какой-то древний фолиант.

Табличка на офисе гласила:

*Физический факультет  
Профессор Познер*

«Э... это физический факультет?» — спросил я, ничего не понимая. «Именно так, — ответил он, — и я профессор физики. А кто вы?»

«Я новый сотрудник, новый ассистент профессора — Сасскинд». Его лицо приобрело любезное, но крайне удивлённое выражение: «Ой-вей, они никогда не говорили мне ничего подобного. Что за новый сотрудник?» — «Могу я видеть декана?» — я начал терять терпение. «Я декан. А также единственный профессор физики, и я ничего не знаю ни о каких новых сотрудниках». Мне было 26 лет, у меня была жена и двое маленьких детей, и передо мной со всей отчётливостью замаячила перспектива остаться безработным.

В смущении и замешательстве я спустился вниз и, переходя улицу, вдруг увидел моего знакомого по колледжу Гэри Грубера: «Эй, Грубер, что здесь происходит? Я только что был на физическом факультете. Я был уверен, что там полно физиков, но там оказался только один старый раввин по фамилии Познер». Груберу моя фраза показалась очень забавной. Он засмеялся и сказал: «Я думаю, что ты, вероятно, попал в на-

чальную школу, а не в высшую. Высшая — за углом на 184-й стрит. Я учусь там в аспирантуре». О, сладостное облегчение! Я прошёл к 184-й стрит и посмотрел в ту сторону, куда указал Грубер, но не увидел ничего, что могло бы напоминать высшую школу. Вдоль улицы тянулся ряд неприметного вида витрин. В одной из них рекламировались государственные облигации, другая была и вовсе пуста, а верхние этажи здания заколочены досками. Самый крупный магазин предлагал всё для бар-мицва и еврейских свадеб. Он выглядел давно заброшенным, но в нём ещё продавалось какое-то оборудование для приготовления кошерной пищи. Я прошёл мимо него, в недоумении развернулся и на обратном пути рядом с витриной увидел небольшую табличку:

*Высшая школа Белфер.*

Табличка указывала вверх на широкую лестницу. На ступенях лестницы лежал старый, изрядно потёртый ковер, и запах еды с первого этажа поднимался по лестнице вверх. Место производило удручающее впечатление, но тем не менее я поднялся в большое помещение, напоминающее зал для свадебных торжеств и бар-мицвы, обставленное диванами и удобными стульями и, к моему огромному облегчению, — увешанное классными досками. Классные доски для меня означали физиков.

По периметру зала теснились около двадцати офисных клетушек. Вся школа размещалась в этом огромном зале. Было бы очень тяжело признать в ней физическую школу, если бы не несколько человек, которые вели разговор на физическую тему возле одной из досок. Более того, я узнал некоторых из них. Я увидел Дейва Финкельштейна, который нашёл для меня эту работу. Дэйв был блестящим харизматичным физиком-теоретиком, только что опубликовавшим статью о применении топологии в квантовой теории поля, которой суждено было стать классикой теоретической физики. Я также увидел П. А. М. Дирака, возможно, величайшего физика XX века после Эйнштейна. Дэйв представил меня Якиру Ааронову, соавтору открытия эффекта Ааронова — Бома. Он беседовал с Роджером Пенроузом, в настоящее время — сэром Роджером. Роджер и Дэйв были двумя пионерами в теории чёрных дыр. Я увидел открытую дверь с табличкой, гласившей: Джоэл Лейбовиц. Джоэл, известный специалист в области математической физики,

спорил с Либом Эллиотом, имя которого мне также было известно. Это было сборище самых блестящих физиков, которых я когда-либо встречал, — и все в одном месте.

Они рассуждали об *энергии вакуума*. Дейв утверждал, что вакуум заполнен *энергией нулевых колебаний* и что эта энергия оказывает эффект на гравитационные поля. Дираку не нравилась идея энергии вакуума, потому что она получалась бесконечной. Он считал, что если что-то в теории становится бесконечным, значит, математика такой теории ошибочна, и, следовательно, энергии вакуума не существует. Дэйв немедленно втянул меня в дискуссию, объяснив, как он пришёл к такому выводу. Этот спор стал для меня роковым — я озадачился проблемой, которая преследовала меня в течение последующих сорока лет и в конечном итоге привела к Космическому Ландшафту.

## **Худшее из когда-либо сделанных предсказаний**

Часть нашего разума — я предлагаю называть её *это*, — которая получает удовольствие от доказательства своей правоты, особенно хорошо развита у физиков-теоретиков. Создание теории некоторого явления с последующим расчётом, получающего позднее экспериментальное подтверждение, — это огромный источник удовлетворения. Иногда эксперимент проводится ещё до расчёта, и в этом случае теория не предсказывает, а скорее объясняет результат, но и это тоже неплохо. Даже очень хорошие физики делали в прошлом и делают сейчас неправильные предсказания. Мы склонны забывать о них, но есть одно неправильное предсказание, которое никуда не делось. На сегодняшний день — это худший расчёт, который когда-либо делал кто-либо из физиков. Неправильность этой работы была настолько очевидна, что даже не требовалось эксперимента, чтобы доказать её ошибочность. И самое страшное, что этот неправильный результат, как нам представляется, является неизбежным следствием нашей лучшей теории — квантовой теории поля.

Прежде чем я назову величину ошибки, позвольте мне уточнить, что такое неправильное предсказание. Если результат расчёта расхо-

дится с экспериментом в 10 раз, мы говорим, что ошибка составляет один порядок. Если расхождение составляет 100 раз, то это два порядка. Расхождение в 1000 — три порядка, и т. д. Ошибиться на один порядок величины — это плохо. На два порядка — катастрофа. На три — позор. Так вот, все усилия лучших физиков, использовавших свои лучшие теории для предсказания величины *космологической постоянной* Эйнштейна, дают ошибку на ... *сто двадцать порядков!* Это настолько плохо, что просто смешно.

Эйнштейн был первым, кто обжёгся на космологической постоянной. В 1917 году, через год после завершения общей теории относительности, он написал статью, о которой впоследствии сожалел как о худшей из своих ошибок. Статья называлась «Вопросы космологии и общая теория относительности» и была написана за несколько лет до того, как астрономы поняли, что слабые светящиеся пятна на небе, называемые туманностями, на самом деле являются далёкими галактиками. Прошло ещё двенадцать лет, и американский астроном Эдвин Хаббл произвёл революцию в астрономии и космологии, продемонстрировав, что все галактики удаляются от нас со скоростью, которая растёт с увеличением расстояния до них. Эйнштейн в 1917 году не знал, что Вселенная расширяется. Он, как и все прочие в то время, полагал, что галактики относительно неподвижны и вечно находятся в одних и тех же местах.

Согласно теории Эйнштейна, Вселенная является *замкнутой*, что в первую очередь означает, что пространство имеет конечную протяжённость. Но это не означает, что у пространства есть край. Например, поверхность Земли тоже является замкнутой. На поверхности Земли не существует точки, удалённой от другой далее чем на 20 000 километров. Кроме того, поверхность Земли не имеет края: нет на Земле такого места, где бы она заканчивалась. Лист бумаги конечен, но он имеет край, некоторые даже скажут: четыре края. Но на поверхности Земли, если вы будете долго идти в любом направлении, вы никогда не достигнете конца пространства. Как и Магеллан, вы в конечном итоге возвратитесь в исходную точку<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> На самом деле Магеллан не вернулся обратно в Европу. Он погиб на Филиппинах, но оставшимся в живых членам его команды удалось обогнуть земной шар, тем самым доказав, что он действительно является шаром.

Мы часто используем словосочетание «земной шар», но в нашем случае речь идёт только о поверхности Земли, которая в первом приближении является *сферой*. Чтобы сделать аналогию между поверхностью Земли и Вселенной Эйнштейна корректной, необходимо иметь в виду только поверхность, а не земной шар в целом. Представим себе существ — назовём их плоскатиками, — которые обитают на поверхности сферы. Предположим, что они ни при каких обстоятельствах не могут покинуть эту поверхность: они не могут летать и не могут копать. Давайте также предположим, что единственные сигналы, которыми они обмениваются, распространяются только вдоль поверхности. Например, они могут изучать окружающую среду, испуская и регистрируя поверхностные волны некоторого вида. У этих существ не будет концепции третьего измерения, и они не способны его использовать. Такие существа действительно обитают в замкнутом двумерном мире. Математик бы назвал его *2-сферой*, потому что она является двумерной поверхностью.

Мы не плоскатики, живущие в двумерном мире. Однако согласно теории Эйнштейна, мы живём в трёхмерном аналоге сферы. Замкнутое трёхмерное пространство трудно изобразить наглядно, но оно имеет смысл. Математическим термином для обозначения такого пространства является *3-сфера*. Подобно плоскатикам мы могли бы обнаружить, что живём в 3-сфере, совершив путешествие в одном направлении и вернувшись в итоге в исходную точку. Согласно теории Эйнштейна, наше реальное пространство является 3-сферой.

Вообще говоря, сфера может иметь любое количество измерений. Простейшим примером является окружность.

Окружность одномерна, как и линия. Если бы мы жили на окружности, то имели бы возможность перемещаться только в одном направлении. Другое название окружности — *1-сфера*. Перемещение вдоль окружности — это то же самое, что перемещение вдоль линии, за исключением того, что через некоторое время мы возвращаемся в исходную точку. Чтобы определить круг, начнём с того, что изобразим на двумерной плоскости замкнутую кривую. Если расстояние от центральной точки до каждой точки нашей кривой одно и то же, то наша кривая — окружность. Обратите внимание, что для определения 1-сферы мы начали с двумерной плоскости.

Аналогично можно определить 2-сферу, за исключением того, что теперь мы начнём с трёхмерного пространства. Поверхность является 2-сферой, если каждая её точка находится в трёхмерном пространстве на одном и том же расстоянии от центра. Теперь понятно, как обобщить наше определение на 3-сферу или вообще на сферу любой размерности. Для определения 3-сферы следует перейти в четырёхмерное пространство. Представьте себе пространство, для описания положения точки в котором используются четыре координаты вместо обычных трёх. Теперь просто выберите все точки, находящиеся на одном и том же расстоянии от начала координат. Все они лежат на 3-сфере.

Подобно плоскатикум, живущим на 2-сфере, которым неинтересно изучать что-либо, кроме поверхности сферы, геометру, изучающему 3-сферу, нет никакого дела до четырёхмерного пространства, в которое вложена 3-сфера. Мы можем выбросить из головы четвёртое измерение и сосредоточиться только на 3-сфере.

Космология Эйнштейна описывает пространство, которое в первом приближении имеет форму 3-сферы, но, как и земная поверхность, не обладает совершенной сферической формой. В общей теории относительности пространство не является жёстко зафиксированным, оно больше похоже на поверхность упругого воздушного, а не жёсткого стального шара. Представьте себе Вселенную в виде поверхности такого гигантского деформируемого воздушного шарика. Плоскатики живут на резиновой поверхности и фиксируют только сигналы, распространяющиеся вдоль этой поверхности. Они ничего не знают о других пространственных измерениях, не имеют понятия о внутренностях шара, внешней воздушной оболочке. Их пространство является гибким как резина, и расстояние между двумя точками в таком пространстве может со временем изменяться.

На этом воздушном шарике нарисованы галактики, более или менее равномерно покрывающие его поверхность. Если воздушный шарик надувается, галактики движутся друг от друга. Если он сдувается, галактики сближаются. Все это довольно легко себе представить. Трудность возникает при переходе от двух измерений к трём. Теория Эйнштейна описывает мир, в котором пространство является гибким и растяжимым и имеет форму, близкую к 3-сфере.

А теперь добавим гравитационное притяжение. Согласно теории гравитации (как Ньютона, так и Эйнштейна), каждый объект во Вселенной притягивает любой другой объект с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. В отличие от электрических сил, которые бывают как притягивающими, так и отталкивающими, сила гравитации — всегда сила притяжения. Эффект гравитационного притяжения пытается собрать все галактики вместе и сжать Вселенную. На поверхности воздушного шарика роль гравитации играет упругая сила натяжения его поверхности, стремящаяся сжать шарик. Если вы хотите увидеть эффект этого натяжения, просто воткните в шарик булавку...

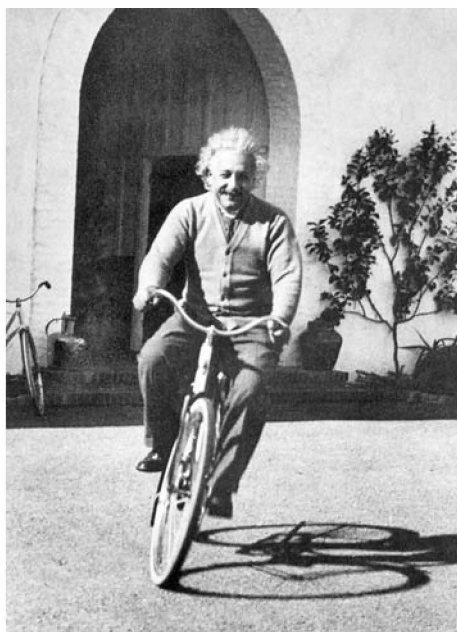
Если никакая сила не противодействует гравитационному притяжению, галактики будут с ускорением двигаться друг к другу, и вся Вселенная обрушится внутрь себя, как проткнутый булавкой воздушный шарик. Но в 1917 году Вселенная выглядела для наблюдателей статической, неизменной. Астрономы, как и все обычные люди, смотрели на небо и не видели никаких крупномасштабных движений далёких звёзд (кроме небольших случайно направленных собственных движений). Эйнштейн понимал, что статическая Вселенная невозможна, если гравитационные силы являются только силами притяжения. Статическая Вселенная подобна неподвижно парящему над поверхностью земли камню. Если бросить камень вертикально вверх, вы увидите, как он сначала поднимается, а затем падает. Вы можете даже уловить тот момент, когда камень останавливается в верхней точке, меняя направление движения. Но вот что камень не может сделать, так это вечно висеть на фиксированной высоте, если нет никакой другой силы, действующей на камень, кроме силы притяжения Земли. Точно таким же образом статическая Вселенная бросает вызов закону всемирного тяготения.

Эйнштейн оказался перед необходимостью модификации своей теории, которая обеспечила бы компенсирующую силу. В случае воздушного шарика такой силой является давление воздуха, противодействующего изнутри натяжению резиновой оболочки. Но реальная Вселенная не наполнена воздухом. Реальная Вселенная представляет собой только поверхность. Поэтому Эйнштейн предположил, что



должна существовать какая-то отталкивающая сила, противодействующая гравитации. Может ли общая теория относительности скрывать в своих уравнениях подобную силу?

Внимательно изучив уравнения теории относительности, Эйнштейн обнаружил в них неоднозначность: уравнения могут быть изменены без нарушения их математической согласованности путём добавления ещё одного члена. Роль этого дополнительного члена весьма неожиданна: он добавляет к обычной силе притяжения, которая ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния, ещё одну силу — силу отталкивания, которая с ростом расстояния увеличивается. Величина новой силы определяется новой физической константой, которую Эйнштейн обозначил греческой буквой  $\lambda$  (лямбда). С тех пор эта константа называется *космологической постоянной* и по-прежнему обозначается буквой  $\lambda$ .



Внимание Эйнштейна привлекло в особенности то, что если выбрать в качестве  $\lambda$  положительное число, то новый член будет соответствовать силе всемирного отталкивания, увеличивающейся про-



порционально расстоянию между телами. Эйнштейн понял, что *лямбда-член* может играть роль той самой отталкивающей силы, действующей против силы всемирного тяготения, которая способна обеспечить равновесие Вселенной. Равновесия галактик можно добиться соответствующим выбором константы  $\lambda$ . Принцип выбора прост: чем больше расстояние между галактиками, тем меньше должно быть значение  $\lambda$ , чтобы удерживать их в равновесии. Несмотря на то что с математической точки зрения константа может быть любой, физически её очень легко определить, зная среднее расстояние между галактиками. В то самое время, когда Хаббл был занят измерением расстояний между галактиками, Эйнштейн был уверен, что открыл секрет Вселенной. Это был мир, балансирующий на двух силах: притяжения и отталкивания.

Но у этой теории есть ряд противоречий. Теоретически Вселенная, построенная Эйнштейном, была нестабильной. Она находилась в состоянии равновесия, но это равновесие было неустойчивым. Разницу между устойчивым и неустойчивым равновесием проще всего понять на примере маятника. Когда маятник висит вертикально, а его груз находится в самой низкой точке, маятник пребывает в состоянии устойчивого равновесия. Это означает, что если вы незначительно отклоните его от точки равновесия, он вернётся к своему первоначальному положению.

Теперь перевернём маятник, так чтобы груз оказался тонко сбалансирован в верхнем положении. Если что-нибудь толкнёт маятник, например лёгкий ветерок или взмах крыла бабочки, он тут же выйдет из равновесия и начнёт падать. Более того, направление, в котором он начнёт падать, непредсказуемо. Статическая Вселенная Эйнштейна ведёт себя как такой неустойчивый перевернутый маятник. Малейшее возмущение вызовет либо её взрывообразное расширение, либо такой же неудержимый коллапс. Я не знаю, упустил Эйнштейн этот элементарный момент в своих рассуждениях или просто решил игнорировать его.

Но самое печальное: теория пыталась объяснить то, чего попросту не существовало. По иронии судьбы, никакой нужды в дополнительном члене в уравнениях не было. Проводя наблюдения на 100-дюймовом

телескопе<sup>1</sup> в обсерватории Маунт-Вильсон в Южной Калифорнии, Хаббл обнаружил, что Вселенная не стоит на месте. Галактики разлетаются друг от друга, и Вселенная расширяется как надуваемый воздушный шарик. Нет никакой необходимости компенсировать силы тяготения; от космологического члена, который не добавляет красоты уравнениям, можно попросту отказаться, приравняв его к нулю.

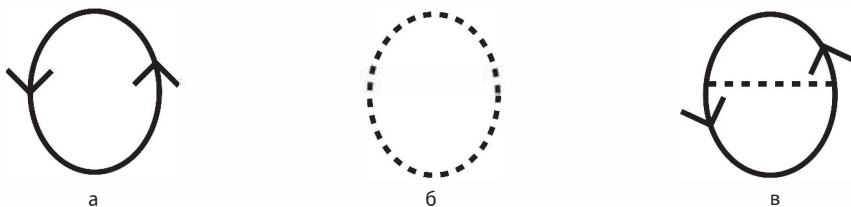
Но однажды открытый ящик Пандоры не так-то просто закрыть.

Космологическая постоянная эквивалентна другой сущности, которую проще всего охарактеризовать как энергию вакуума<sup>2</sup>. Как вы помните, я впервые столкнулся с этим термином в школе Белфер. Словосочетание «энергия вакуума» звучит как оксюморон. Вакуум представляет собой пустое пространство. Оно пустое по определению, — так как же оно может иметь какую-либо энергию? Ответ кроется в тех странных вещах, которые принесла в мир квантовая механика: странная неопределённость, странная квантованность и странная непрекращающаяся дрожь. Даже пустое пространство обладает «квантовой дрожью». Физики-теоретики представляют вакуум наполненным частицами, которые возникают и исчезают настолько быстро, что мы не в состоянии обнаружить их при обычных обстоятельствах. Эти вакуумные колебания имеют очень высокую частоту, которую не в состоянии измерить наши приборы, подобно тому как наши уши не в состоянии услышать звук слишком высокой частоты. Но вакуумные колебания оказывают влияние на атомы, которые гораздо более чувствительны к высоким частотам, подобно тому как уши собак более чувствительны к высоким звукам. Значения уровней энергии атома водорода могут быть измерены с прецизионной точностью, и результаты этих измерений оказываются чувствительными к незримому присутствию моря флуктуирующих в вакууме электронов и позитронов.

<sup>1</sup> Сто дюймов для размера телескопа звучит весьма скромно, но это относится только к диаметру зеркала, собирающего свет, а не к общему размеру инструмента. В действительности телескоп обсерватории Маунт-Вильсон был крупнейшим в мире до тех пор, пока в 1949 году не был построен 200-дюймовый телескоп обсерватории Маунт-Паломар.

<sup>2</sup> Другое название этого члена, особо любимое журналистами, — тёмная энергия.

Эти странные неустранимые колебания вакуума вытекают из квантовой теории поля и могут быть визуализированы при помощи интуитивно понятных фейнмановских диаграмм. Представьте себе полностью пустое пространство-время, в котором первоначально нет ни одной частицы. Квантовые флуктуации могут на короткое время рождают пары частиц, как показано на следующем рисунке.



На первой диаграмме показаны электрон и позитрон, спонтанно возникающие из ничего, а затем, встретившись, взаимоуничтожающие друг друга. Можно интерпретировать эту диаграмму по-другому: движение электрона происходит по замкнутой траектории в пространстве-времени; двигаясь назад во времени, электрон воспринимается нами как позитрон. На второй диаграмме изображены два спонтанно рождённые, а затем уничтоженные фотона. Последняя диаграмма повторяет первую, за исключением того, что, прежде чем исчезнуть, электрон и позитрон обмениваются фотоном. Есть бесконечное множество более сложных «вакуумных диаграмм», но эти три являются наиболее характерными.

Как долго живут подобные электроны и позитроны? Около одной миллиард-триллионной доли секунды. Теперь представьте себе, что подобные процессы идут во всём пространстве, наполняя Вселенную быстро рождающимися и исчезающими элементарными частицами. Эти короткоживущие квантовые частицы, заполняющие вакуум, называются *виртуальными*, но последствия их существования могут быть вполне реальными. В частности, это приводит к тому, что вакуум имеет энергию. Вакуум не является состоянием с *нулевой* энергией. Вместо этого он оказывается состоянием с *минимальной* энергией.

Вернёмся к космологической постоянной.

Умный читатель может спросить: «Кого заботит, обладает вакуум энергией или нет? Если эта энергия всегда присутствует, почему бы

нам просто не скорректировать наше определение энергии путём вычитания из неё энергии вакуума?» Потому что *энергия создаёт тяготение*. Чтобы понять смысл этой фразы, необходимо помнить два простых физических закона. Во-первых (я обещал, что в книге не будет формул, но прошу прощения, без по крайней мере одной я обойтись не могу),  $E = mc^2$ . Даже школьники знают, что эта знаменитая формула выражает эквивалентность массы и энергии. Масса и энергия являются в действительности одним и тем же, просто они выражаются в разных единицах; для преобразования массы в энергию достаточно умножить её на квадрат скорости света.

Во-вторых, закон всемирного тяготения Ньютона, который гласит, что *масса является источником гравитационного поля*. Это означает, что наличие массы, например Солнца, влияет на движение близлежащих объектов. Мы можем описать гравитационное взаимодействие двумя способами: либо просто сказать, что Солнце влияет на движение Земли, либо ввести для удобства гравитационное поле, создаваемое Солнцем, которое, в свою очередь, оказывает влияние на движение любого тела, до которого дотянется.

Количественно закон Ньютона говорит нам, что напряжённость гравитационного поля Солнца пропорциональна его массе. Если тело в 100 раз тяжелее Солнца, его гравитационное поле будет в 100 раз сильнее и сила, действующая на Землю, будет в 100 раз больше. Это и означает фраза «масса является источником гравитационного поля».

Но если энергии и массы это одно и то же, то предыдущее утверждение может быть переформулировано в виде: «*Энергия является источником гравитационного поля*». Другими словами, все виды энергии влияют на гравитационное поле и поэтому также влияют и на движения близлежащих масс. Энергия вакуума в квантовой теории поля не является исключением. Даже пустое пространство будет создавать гравитационное поле, если плотность энергии вакуума не равна нулю. Объекты будут перемещаться по пустому пространству так, будто на них действуют силы. Самое интересное, что если вакуумной энергии приписать положительное значение, то её действие будет проявляться в виде силы всемирного отталкивания, своего рода антигравитации, стремящейся растащить галактики в разные стороны. Но это именно то, что мы говорили ранее о космологической постоянной.

Этот момент настолько важен, что я хочу остановиться и объяснить ещё раз. Если пустое пространство на самом деле заполнено энергией вакуума (или, что эквивалентно, вакуумной массой), то сила, с которой оно будет действовать на находящиеся в нём объекты, будет неотличима от силы, являющейся следствием существования ненулевой космологической постоянной. Незаконнорождённое дитя Эйнштейна оказалось не чем иным, как проявлением энергии нулевых колебаний квантового вакуума. Решив выкинуть космологическую постоянную из своих уравнений, Эйнштейн фактически декларировал, что никакой энергии вакуума не существует. Но с современной точки зрения у нас есть все основания полагать, что квантовая дрожь неизбежно порождает энергию в пустом пространстве.

Если космологическая постоянная, или энергия вакуума, действительно существует, то на её величину накладываются серьёзные ограничения. Если бы она была слишком большой, это привело бы к наблюдаемому искажению траекторий движения небесных тел. Космологическая постоянная должна быть если не нулевой, то очень маленькой. Но с тех пор, как мы идентифицировали космологическую постоянную с энергией вакуума, никто не может объяснить, почему она должна быть равна нулю или иметь крайне малое значение. Очевидно, скрещивание теории элементарных частиц с теорией гравитации Эйнштейна является очень рискованным делом, потому что получающийся теоретический результат приводит к значению космологической постоянной на много порядков больше.

В сильно волнующемся море виртуальных частиц, называемом вакуумом, присутствуют все виды элементарных частиц. В этом море есть электроны, позитроны, фотоны, кварки, нейтрино, гравитоны и многое другое. Энергия вакуума — это сумма энергий всех составляющих его виртуальных частиц. Каждый тип частиц даёт свой вклад. Некоторые из виртуальных частиц движутся медленно, их вклады в энергию невелики, в то время как другие движутся быстрее и имеют более высокие энергии. Если, используя математическую технику квантовой теории поля, мы сложим всю энергию в этом море частиц, то придём к катастрофе. Существует так много виртуальных частиц, обладающих высокими энергиями, что полная энергия получается бесконечной. Но бесконечность — это бессмысленный ответ. Именно это

и вызвало скепсис Дирака. Но современник Дирака Вольфганг Паули пошутил: «Из того, что что-то равно бесконечности, не следует, что это что-то является нулём».

Понятно, что мы переоцениваем вклад очень высокоэнергетичных виртуальных частиц. Для того чтобы математические выражения обрели физический смысл, нам следует как-то по-другому учитывать эффект от их существования. Но мы ещё многого не знаем о поведении частиц, когда их энергия становится выше определённого значения. Физики используют гигантские ускорители для изучения свойств наиболее высокоэнергетичных частиц, но каждый ускоритель имеет свой предел. Даже теоретические идеи в определённый момент выдыхаются. В конечном итоге мы достигнем настолько больших значений энергий, что две частицы, столкнувшись, создадут чёрную дыру! На текущий момент мы находимся далеко от понимания того, что нам открывают имеющиеся инструменты. Даже теории струн это не по плечу. Поэтому вот что мы делаем, чтобы привести теорию в согласие с практикой: мы просто игнорируем вклад (в энергию вакуума) всех виртуальных частиц, энергия которых настолько велика, что они в процессе столкновения способны образовать чёрную дыру. Мы называем это «обрезанием расходимостей», или «перенормировкой теории». Но независимо от используемых слов их смысл остаётся одним и тем же: давайте просто договоримся игнорировать вклад виртуальных частиц очень высоких энергий, который мы пока не понимаем.

Это крайне неудовлетворительная ситуация, но раз уж мы это делаем, то попробуем оценить энергию вакуума, которую дают электроны, фотоны, гравитоны и все прочие известные частицы. Результат больше не будет бесконечным, но он всё равно слишком велик. Обычно энергию измеряют в джоулях. Для того чтобы нагреть литр воды на один градус, необходимо около 4000 джоулей энергии. Единицей объёма обычно служит кубический сантиметр — это примерный объём кончика мизинца. В повседневном мире джоуль на кубический сантиметр — это удобная единица плотности энергии. А сколько же тогда джоулей энергии вакуума содержится в виде виртуальных фотонов в объёме пространства, сравнимом с кончиком вашего мизинца? Оценка на основе квантовой теории поля получается настолько большой, что она требует для своей записи единицы с 116 нулями после неё:

десять в сто шестнадцатой степени! Вот такая чёртова пропасть джоулей энергии вакуума заключена в вашем мизинце в виде виртуальных фотонов. Это гораздо бóльшая энергия, чем та, которая потребовалась бы, чтобы вскипятить всю воду во Вселенной. Это гораздо больше энергии, которую Солнце будет излучать в течение миллиона или миллиарда лет. Это гораздо больше энергии, которую излучат все звёзды во всей наблюдаемой части Вселенной за всё время её существования.

Гравитационное отталкивание, вызванное этой вакуумной энергией, будет иметь катастрофические последствия. Оно не только растащит галактики друг от друга. Оно разорвёт атомы, ядра и даже протоны и нейтроны, из которых состоит вещество галактик. Космологическая постоянная, если она всё же существует, должна иметь намного меньшее значение, чтобы согласовываться со всем, что мы знаем о физике и астрономии.

Пока мы оценили энергию вакуума, возникающую в результате вклада только одного типа частиц: фотонов. Как насчёт виртуальных электронов, кварков и всего остального? Они также флуктуируют и вносят вклад в энергию вакуума. Точное значение энергетического вклада каждого типа частиц зависит от масс этих частиц, а также от значений различных констант связи. Можно было бы ожидать, что если мы добавим вклад от электронов, это сделает энергию вакуума ещё большей. Но это не так. Фотоны и другие подобные им частицы дают положительный вклад в энергию вакуума. Одним парадоксальным фактом квантовой теории поля является то, что виртуальные электроны в вакууме обладают отрицательной энергией. Фотоны и электроны принадлежат к классам частиц, которые дают противоположные вклады в энергию вакуума.

Эти два класса частиц называют *бозонами* и *фермионами*. Для наших целей не важны нюансы различий между этими двумя классами, но я всё же посвящу им пару абзацев. Фермионами являются такие частицы, как электрон. Если вы помните школьную химию, вы, вероятно, знаете о принципе запрета Паули. Он утверждает, что никакие два электрона в атоме не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Именно по этой причине существует периодическая система элементов. При добавлении в атом новых электронов они заполняют всё более



Такое поведение характерно для всех частиц, являющихся фермионами. Никакие два фермиона одного и того же типа не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Они являются отшельниками-изоляционистами.

Бозоны, в противоположность фермионам, — это «социальные» частицы. Фотоны являются бозонами. Очень легко получить много бозонов в одном и том же состоянии: например, лазерный луч является набором фотонов, находящихся в одном квантовом состоянии. Вы не сможете построить лазер, используя пучок фермионов. С другой стороны, невозможно построить атомы из бозонов, по крайней мере те атомы, которые входят в периодическую таблицу.

Какое отношение имеет всё это к энергии вакуума? Ответ состоит в том, что виртуальные бозоны в вакууме имеют положительную энергию, а виртуальные фермионы — отрицательную. Причины тому технические, поэтому просто примите как данность: вакуумные виртуальные фермионы и вакуумные виртуальные бозоны способны компенсировать вклад друг друга в энергию вакуума, потому что их вклады имеют противоположные знаки.

Так что же, если мы подсчитаем вклад всех фермионов и бозонов, существующих в природе: фотонов, гравитонов, глюонов,  $W$ -бозонов,  $Z$ -бозонов и бозонов Хиггса на стороне бозонов и нейтрино, мюонов, электронов и кварков на стороне фермионов, — смогут ли они компенсировать друг друга? Нет, и даже приблизительно! Печальная правда в том, что мы понятия не имеем, почему энергия вакуума не является такой огромной. Почему она недостаточно велика, чтобы разорвать атомы, протоны, нейтроны и все прочие известные объекты.

Тем не менее физики сумели построить математические теории воображаемых миров, в которых положительный вклад бозонов в энергию вакуума в точности компенсируется отрицательным вкладом фермионов. Это очень просто. Всё, что нужно сделать, — это убедиться, что все частицы составляют соответствующие пары: для каждого фермиона должен существовать парный ему бозон, а для каждого бозона — парный ему фермион, и они должны иметь одинаковые массы. Другими словами, электрон должен иметь парный бозон с точно такой же массой и зарядом, как у электрона. Фотон также должен иметь





Физики-теоретики и космологи-наблюдатели рассматривают эту проблему по-разному. Традиционно космологи не имеют ничего против существования космологической постоянной, имеющей очень малое значение. В духе экспериментальной науки — рассматривать любой параметр в аспекте способа его измерения. Теоретики, включая меня, указывают на абсурдность требуемого совпадения и говорят себе (и друг другу), что должно существовать глубоко скрытое математическое обоснование, требующее, чтобы константа была *в точности* равна нулю. Это представляется более вероятным, чем взаимоуничтожение 119 десятичных знаков без уважительной причины. Мы почти полвека стремились найти такую причину, но нам не повезло. Струнные теоретики представляют особую породу физиков с очень строгим мнением об этой проблеме. Теория, над которой они работают, часто выкидывает неожиданные математические чудеса, приводящие к подобному взаимоуничтожению больших чисел. По их мнению (не слишком давно я и сам придерживался подобного мнения), теория струн могла бы быть частным случаем более общей теории всего, объясняющей все явления природы. И будучи верной, такая теория должна была бы содержать некие глубокие математические основания для того, чтобы энергия вакуума была равна нулю. Поиск причины малости энергии вакуума рассматривается как одна из важнейших и сложнейших проблем современной физики. Ни одно другое явление не озадачивало физиков так надолго, как это. Любая попытка решения указанной проблемы, предпринимаемая в квантовой теории поля или в теории струн, неизменно проваливается. Так что проблема энергии вакуума действительно является матерью всех физических проблем.

## **Стивен Вайнберг произносит «запретное слово»**

Физики, десятилетиями ломавшие свой коллективный ум о космологическую постоянную, пришли к середине 1980-х годов с пустыми руками. Отчаянные ситуации требуют отчаянных мер, и в 1987 году Стивен Вайнберг, один из самых видных учёных, высказал отчаянную идею. Наплевав на все предосторожности, он предложил немислимое:

возможно, космологическая постоянная настолько мала по причинам, не имеющим ничего общего с теорией струн или любой другой математической теорией. Может быть, причина в том, что если  $\lambda$  будет больше, то наше собственное существование окажется под вопросом. Этот род логики вошёл в науку под именем *антропный принцип*: некоторые свойства Вселенной или законы физики являются именно такими, потому что, если бы они были другими, мы просто не могли бы существовать. Существует много вопросов, являющихся кандидатами на объяснение при помощи антропного принципа, например:

1. Почему Вселенная большая?
2. Почему существует электрон?
3. Почему пространство трёхмерно?

Возможные ответы:

1. Размеры Вселенной должны быть по крайней мере больше размеров Солнечной системы, чтобы могли существовать солнцеподобные звёзды и земледобные планеты.
2. Без электронов были бы невозможны атомы и органические соединения.
3. Существует множество явлений, которые могут происходить в трёх измерениях, но которые невозможны в пространствах других размерностей. Пример одного из таких явлений — стабильность Солнечной системы. В мире из четырёх и более измерений движения планет будут весьма хаотичны, что не обеспечит стабильные условия в течение миллиардов лет, необходимые для возникновения жизни и биологической эволюции. Ещё хуже то, что силы, действующие между ядрами и электронами, в пространстве высоких размерностей будут настолько сильны, что втянут электроны внутрь ядер и сделают невозможным химические реакции.

Маленькая вселенная, Вселенная без электронов или Вселенная с другим количеством измерений была бы бесплодной Вселенной, в которой не существовало бы разумных существ, задающих эти вопросы.

Нет сомнений, что имеются совершенно законные аспекты, в которых использование антропной аргументации оправданно. Мы живём на поверхности планеты, а не на поверхности звезды, потому что жизнь

не может существовать при температурах 10 000 градусов. Но использовать эти аргументы для объяснения фундаментальных физических констант... Мысль о том, что фундаментальные константы определяются фактом нашего собственного существования, подвергалась анафеме большинством физиков. Какой механизм мог бы скорректировать законы природы для того, чтобы обеспечить существование человеческой расы? Существует ли разумное объяснение, помимо апелляции к сверхъестественным силам? Физики часто относятся к антропному принципу как к религии, суеверию или «запретному слову» и предпочитают отказываться от него.

Стивен Вайнберг — один из моих старых друзей. Я впервые услышал его громовой баритон в мексиканском кафе в Беркли. Это был 1965 год, времена всевозможных протестов: движения Марио Савио за свободу слова, Джефферсона Поланда за свободу секса, выступления в поддержку ЛСД и против войны во Вьетнаме. Я поучаствовал во всех четырёх плюс ещё в нескольких. Мои волосы были длинными, я носил джинсы и обтягивающую чёрную футболку. И в свои двадцать пять я был свежеспечённым доктором из Корнельского университета штата Нью-Йорк. Стивену было немного за тридцать. Мы оба выросли в Бронксе, учились в одной и той же средней школе, но на этом наше сходство заканчивалось. Когда я встретил Стивена, он уже был выдающимся учёным, образцовым профессором Беркли. И одевался он как кембриджский дон.

В тот день в кафе он царил, проповедуя что-то французское и историческое. Разумеется, у меня были все основания проникнуться к нему неприязнью. Но познакомившись с ним ближе, я понял, что самой яркой чертой характера Стива была способность смеяться над самим собой. Он любил казаться важным, но при этом осознавал, что иногда кажется смешным. Как вы понимаете, несмотря на все наши различия, я очень люблю Вайнберга.

Я всегда восхищался ясностью и глубиной понимания физики Стивеном Вайнбергом. На мой взгляд, он скорее, чем кто-нибудь, мог бы претендовать на звание отца-основателя Стандартной модели. Но в последние годы я ещё больше восхищаюсь его мужеством и интеллектуальной последовательностью. Он является одним из ведущих борцов против креационизма и других форм антинаучного мышления.

И однажды ему хватило мужества выразить мнение, которое шло вразрез с научными предрассудками его коллег. На самом деле, и это видно из его статей, сам он сильно недолюбливал антропный принцип, скорее всего потому, что антропный принцип слишком созвучен тому, что некоторые люди сегодня называют *разумным замыслом*. Но тем не менее, приходя в отчаяние по поводу космологической постоянной, он чувствовал, что не может игнорировать возможности антропного объяснения. Что характерно, он задал практический вопрос: будет ли катастрофичным для возможности развития разумной жизни значение космологической постоянной большее, чем наблюдаемые  $10^{-120}$  Единиц? Если окажется, что большее значение  $\lambda$  не может препятствовать развитию жизни, то возможность существования жизни не будет принципиальным фактом, струнные теоретики могут попытаться найти элегантное математическое решение этой проблемы. Но если чуть большее значение космологической постоянной делает существование жизни невозможным, тогда антропный принцип придётся рассматривать всерьёз. Я всегда удивлялся, каким образом Вайнберг собирается вернуться из этой ситуации.

Справедливости ради следует отметить, что многие космологи не только благодушно приняли антропный принцип, но и горячо поддержали его. Например, гипотеза о том, что малость космологической постоянной может иметь антропное объяснение, была высказана двумя космологами Джоном Барроу и Фрэнком Типлером в их книге<sup>1</sup>. Среди тех, кто судит непредвзято, были сэр Мартин Рис, британский «королевский астроном», Андрей Линде и Александр Виленкин — оба известные российские космологи, живущие в Соединённых Штатах. Возможно, космологи оказались более восприимчивы к идее антропного принципа, чем физики, потому что перед их глазами была реальная Вселенная, а не абстрактные уравнения, менее требовательные к простоте и элегантности, чем случайные совпадения произвольных чисел.

В любом случае Вайнберг поставил задачу выяснить, существует ли причина, по которой значение космологической постоянной, превы-

<sup>1</sup> The Anthropic Cosmological Principle. By John D. Barrow & Frank J. Tipler, Oxford University Press, 1986 (Дж. Барроу и Ф. Типлер, «Антропный космологический принцип»).

шающее  $10^{-120}$  Единиц, сделает жизнь невозможной. Чтобы дать некоторое представление о задаче, с которой он столкнулся, можно спросить, насколько большие последствия для обычных земных явлений будет иметь увеличение значения космологической постоянной.

Вспомним, что космологическая постоянная проявляет себя как сила всемирного отталкивания. Силы отталкивания, действующие между электронами и ядрами атома, будут изменять свойства атомов. Но если тщательно всё подсчитать, то станет очевидно, что эффект отталкивания, вызванный столь малой космологической постоянной, будет настолько мал, что влияние его на свойства атомов или молекул будет совершенно незаметным. Даже значение космологической постоянной, на много порядков превышающее  $10^{-120}$  Единиц, всё равно будет слишком мало, чтобы оказать какой бы то ни было эффект на химические реакции. Может быть, малость космологической постоянной важна для стабильности Солнечной системы? Нет. Опять же последствия оказываются слишком малы, даже при увеличении  $\lambda$  на много порядков. Не видно никаких причин, по которым увеличение космологической постоянной может повлиять на возможность существования жизни.

Тем не менее Вайнберг нашёл, за что зацепиться. Это имеет отношение не к сегодняшней физике, химии и астрономии, а к той эпохе, когда галактики только начали формироваться из первичного материала ранней Вселенной. В то время водород и гелий, составлявшие основную массу Вселенной, были распределены по всему пространству очень однородно. Вариаций плотности от одной точки к другой практически не существовало.

Сегодня Вселенная полна фрагментов различных размеров: от малых планет и астероидов до супергигантских скоплений галактик. Если бы условия в ранней вселенной были повсюду одинаковыми, то в ней не смогли бы возникнуть никакие неоднородности. Идеальная симметричная сферическая Вселенная будет оставаться такой неограниченно долго. Но ранняя Вселенная была не совсем однородной. В первые секунды её существования, последствия которых мы можем наблюдать, были незначительные отличия в плотности и давлении, составлявшие в относительном выражении несколько сотысячных. То есть вариации плотности были в сто тысяч раз меньше, чем сама плотность. Для гра-

витационной фрагментации вещества важна не общая плотность, а именно эти небольшие вариации плотности.

Даже этих бесконечно малых иррегулярностей оказалось достаточно для того, чтобы начался процесс формирования галактики. С течением времени вещество стало перетекать под действием гравитации из мест, где плотность была чуть меньше, в места, где она была чуть больше. Это привело к увеличению разницы в плотности между такими местами. В итоге процесс всё ускорялся, пока не привёл к формированию галактик.

Но из-за того, что эти первоначальные неоднородности плотности были крайне малы, даже небольшое гравитационное отталкивание могло бы переломить тенденцию к комкованию Вселенной. Вайнберг обнаружил, что если бы космологическая постоянная была всего на порядок или два больше, чем её нынешнее эмпирическое значение, то во Вселенной никогда не возникло бы ни галактик, ни звёзд, ни планет!

## Случай отрицательной $\lambda$

До сих пор я говорил об отталкивающем эффекте, сопровождающем положительную энергию вакуума. Но предположим, что вклад фермионов перевешивает вклад бозонов: тогда полная энергия вакуума будет отрицательной. Разве такое возможно? Если да, то как это повлияет на аргументы Вайнберга?

Ответ на первый вопрос: да, такое может произойти очень легко. Все, что для этого нужно, — это небольшое преобладание фермионов над бозонами, и космологическая постоянная станет отрицательной. Ответ на второй вопрос тоже несложен. Изменение знака  $\lambda$  добавляет к силе всемирного тяготения не отталкивающую силу, а силу притяжения, которая увеличивается пропорционально расстоянию. Чтобы убедительно доказать, что большая космологическая постоянная автоматически сделает Вселенную необитаемой, нам нужно показать, что жизнь не сможет возникнуть, если космологическая постоянная будет иметь большое отрицательное значение.

На что будет похожа Вселенная, если все законы природы в ней останутся теми же самыми, за исключением космологической по-



стоянной, которая будет отрицательной? Ответ для этого случая оказывается ещё проще, чем для случая положительной  $\lambda$ . Дополнительная сила притяжения в конечном итоге остановит хаббловское расширение: Вселенная начнёт сдуваться, как проколотый воздушный шарик. Галактики, звёзды, планеты и вся жизнь будут уничтожены в процессе «большого сжатия». Если отрицательное значение космологической постоянной будет слишком большим, наступившее сжатие не даст Вселенной необходимых для возникновения и развития жизни миллиардов лет. Таким образом, существует антропное ограничение на отрицательные значения  $\lambda$ , соответствующее вайнберговскому ограничению на положительные значения. Эти ограничения довольно близки. Если космологическая постоянная отрицательна, она также не должна отличаться от нуля больше чем на  $10^{-120}$  Единиц, чтобы во Вселенной могла возникнуть и развиваться жизнь.

Но, как я уже говорил, ничто не исключает возможности существования других карманных вселенных, в которых космологическая постоянная имеет либо большое отрицательное, либо большое положительное значение. Но они не являются местами, в которых возможна жизнь. Во вселенных с большой положительной  $\lambda$  всё разлетается в разные стороны так быстро, что не остаётся никаких шансов для образования таких структур, как галактики, звёзды, планеты, атомы и даже атомные ядра. В карманных вселенных с большой отрицательной  $\lambda$  расширение быстро сменяется сжатием и хоронит все надежды на возникновение жизни.

Антропный принцип выдержал первое испытание. Тем не менее общей реакцией теоретиков на работу Вайнберга было её игнорирование. Традиционная физика не принимала антропный принцип. Частично это негативное отношение проистекало из-за отсутствия соглашения о том, что же, собственно, декларирует этот принцип. Для некоторых он папахивал креационизмом и потребностью в сверхъестественном агенте для тонкой настройки законов природы в интересах человека, что являлось угрожающе антинаучной идеей. Но больше всего он диссонировал с идеей о возможности теоретически вывести все законы природы и значения физических констант из неких элегантных математических принципов.



Но Вайнберг пошёл несколько дальше. Он заявил, что независимо от того, какой смысл вкладывается в антропный принцип и какой механизм обеспечивает его выполнение, одно достаточно ясно: принцип может показать нам, что  $\lambda$  должна быть достаточно мала, чтобы не убить нас, но нет никаких причин, по которым она должна быть в точности равна нулю. На самом деле нет никаких оснований и для того, чтобы она была на много меньше, чем это необходимо для обеспечения жизни. Не беспокоясь о глубинном смысле антропного принципа, Вайнберг по сути сделал важное предсказание: если антропный принцип является верным, то астрономы должны будут обнаружить ненулевую энергию вакуума, значение которой не будет существенно меньше, чем  $10^{-120}$  Единиц.

## Планковская длина

Меня всегда очаровывал процесс открытия. Я имею в виду психологию процесса, представляющего собой последовательность: цепь рассуждений — озарение — «Эврика!». Одно из моих любимых занятий — ставить себя на место какого-нибудь великого учёного и представлять, как бы я на его месте мог прийти к решающему открытию.

Сейчас я расскажу, как бы я внёс первый большой вклад в квантовую теорию гравитации. Это произошло бы за 16 лет до того, как молодой Эйнштейн создал современную теорию гравитации, и за 26 лет до того, как эти выскочки Гейзенберг и Шрёдингер придумали современную квантовую механику.

На самом деле я, Макс Планк, сделал это, сам того не осознавая.

*Берлин, 1900 год. Институт кайзера Вильгельма*

Недавно я сделал самое удивительное открытие: я открыл совершенно новую фундаментальную физическую константу. Люди называют её моим именем: *постоянная Планка*. Я сидел в своем офисе и думал: почему это у фундаментальных физических констант, таких как скорость света, гравитационная постоянная Ньютона и моя новая константа, такие неудобные значения? Скорость света составляет  $2,997 \times 10^8$  метров в се-

кунду. Гравитационная постоянная —  $6,67 \times 10^{-11}$  кубометров в квадратную секунду на килограмм. А моя константа — ещё хуже:  $6,624 \times 10^{-34}$  килограмм-квадратных метров в секунду. Почему они все такие большие или такие маленькие? Жизнь физиков была бы намного комфортнее, если бы все они были одного порядка.

И тут меня как ударило! Существуют три фундаментальные единицы для измерения длины, массы и времени: метр, килограмм и секунда. Есть также три фундаментальные константы. Если изменить единицы измерения, скажем, на сантиметры, граммы и часы, численное значение всех трёх констант изменится. Например, величина скорости света станет менее удобной:  $1,08 \times 10^{14}$  сантиметров в час. Но если я использую световые годы для измерения расстояния и годы для измерения времени, то скорость света будет равна в точности 1, поскольку свет проходит один световой год за один год. Не означает ли это, что я могу придумать несколько новых единиц измерения и сделать три фундаментальные константы такими, как мне удобно? Я даже могу найти такие единицы измерения, в которых все три фундаментальные физические константы будут равны единице! Это упростит множество формул. Я буду называть новые единицы измерения «естественными», поскольку они основаны на физических константах. Может быть, если мне повезёт, люди начнут называть их «планковскими единицами». Посчитать, срочно посчитать...

А вот и мой результат: естественная единица длины составляет около  $10^{-33}$  сантиметра. Святой Бернулли! Это меньше, чем что-либо, о чём только можно подумать. Некоторые из тех, кто изучает атомы, говорят, что диаметр атома составляет около  $10^{-8}$  сантиметра. Это значит, что новая естественная единица длины во столько же раз меньше атома, во сколько раз атом меньше Галактики<sup>1</sup>!

Отлично! А что у нас с естественной единицей времени? Она получается порядка  $10^{-42}$  секунды! Это невообразимо мало. Даже

---

<sup>1</sup> Прошу прощения за анахронизм. О других галактиках в 1900 году ещё не знали.

период колебания световой волны невообразимо больше естественной единицы времени.

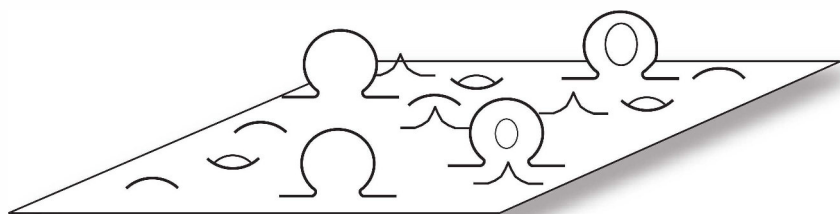
А для единицы массы... Ага, естественная единица массы оказывается небольшой, но всё же не настолько малой: около  $10^{-5}$  грамма. Примерно столько весит пылинка. Эти единицы должны иметь какое-то особое значение.

Все физические формулы выглядят значительно проще, если работать в естественных единицах. Интересно, что это значит?

Вот так Планк, сам того не осознавая, сделал одно из величайших открытий в области квантовой гравитации.

Планк прожил ещё 47 лет, дожив до 89. Но я не уверен, что он когда-либо представлял себе, сколь глубокое влияние оказали открытые им планковские единицы измерения на последующие поколения физиков. К 1947 году общая теория относительности и квантовая механика были частью базового курса физики, но едва ли кто-то думал о синтезе их в *квантовую гравитацию*. Три планковские единицы — единица длины, единица массы и единица времени — имели решающее значение для развития этой дисциплины, но даже сейчас мы только начинаем понимать всю их глубину. Я приведу лишь несколько примеров.

Ранее я уже говорил, что в теории Эйнштейна пространство растягивается и деформируется как поверхность воздушного шарика. Его можно растянуть в гладкую плоскость или скомкать, как старую газету. Но стоит совместить эту идею с квантовой механикой, как пространство обретает совершенно новые свойства. Согласно принципам квантовой механики, всё, что может колебаться, колеблется. Если пространство способно деформироваться, то оно должно быть подвержено «квантовой дрожи». Если бы у нас был очень мощный микроскоп, мы увидели бы, что пространство флуктуирует, вибрирует и мерцает, образуя в местах пучностей миниатюрные «бублики». Оно выглядело бы похожем на кусок ткани или бумаги. Издалека такой кусок выглядит ровным и гладким, но под микроскопом можно увидеть, что он полон ям, неровностей, волокон и отверстий. С пространством всё так же, только ещё хуже. Пространство не просто состоит из подобных текстур: эти текстуры ещё и невероятно быстро меняются.



Насколько мощным должен быть микроскоп, чтобы показать нам флуктуирующую структуру пространства? Вероятно, вы уже догадались: микроскоп должен разрешать детали размером порядка планковской длины, то есть  $10^{-33}$  сантиметра. Это и есть масштаб квантовой структуры пространства.

А как быстро меняется структура пространства на масштабе планковской длины? Опять же нетрудно догадаться, что характерный период этих флуктуаций должен иметь порядок планковского времени —  $10^{-42}$  секунды!

Многие физики считают, что физический смысл планковской длины — это минимальное возможное расстояние. Аналогично, планковское время является кратчайшим возможным промежутком времени.

Но мы ещё не обсудили планковскую массу. Чтобы понять её физический смысл, представьте себе две частицы, сталкивающиеся с такой силой, что в результате они создают в точке столкновения чёрную дыру. Это действительно может случиться, если две сталкивающиеся частицы имеют достаточно большую энергию; в этом случае они исчезнут, оставив после себя чёрную дыру — один из тех загадочных объектов, о которых пойдёт речь в 11-й главе этой книги. Энергия, необходимая для формирования такой чёрной дыры, уже упоминалась ранее, когда я рассказывал об энергии вакуума. Насколько большой должна быть эта энергия, учитывая, что масса и энергия — это одно и то же? Ответ очевиден: разумеется, она должна быть равна планковской массе. Планковская масса не является ни минимальной, ни максимальной возможной массой частицы вещества; планковская масса — это минимальная возможная масса чёрной дыры. Кстати, чёрная дыра планковской массы будет иметь размер порядка планковской длины и просу-

ществует не более планковского времени, прежде чем взорвётся, оставив после себя фотоны и прочий мусор.

Как установил Планк, эта масса составляет около одной стотысячной грамма. По обычным стандартам это не очень большая масса, и если мы умножим её на квадрат скорости света, то получится не очень большая энергия. Но если соотнести эту энергию с энергией столкновения двух элементарных частиц, то такое событие будет настоящим подвигом в микромире. Для получения частиц таких энергий понадобится ускоритель, размер которого будет исчисляться многими световыми годами.

Напомню, что когда мы оценивали плотность энергии вакуума, возникающей за счёт вклада виртуальных частиц, мы получили результат, который соответствует одной планковской массе в одном планковском объёме. Иными словами, мера плотности энергии, которую я определил как 1 Единица, является не чем иным, как естественной планковской единицей плотности энергии.

Мир на планковском масштабе является крайне необычным местом, в котором геометрия постоянно меняется, пространство и время едва различимы, а высокоэнергетичные виртуальные частицы постоянно рождают в ходе взаимных столкновений крошечные чёрные дыры, существующие не дольше планковского времени. Но именно в этом мире струнные теоретики проводят всё своё рабочее время.

Позвольте мне теперь занять немного пространства и времени и подвести итог двух сложных глав, которые приводят нас к следующей дилемме. Микроскопические законы мира элементарных частиц в виде Стандартной модели являются невероятно надёжным фундаментом для построения теории, позволяющей рассчитывать поведение не только самих частиц, но и ядер, атомов и простых молекул. Предположительно, обладая достаточно мощным компьютером и достаточным временем, мы могли бы рассчитать любые молекулы и даже перейти к более сложным объектам. Но Стандартная модель является чрезвычайно сложной и содержит слишком много свободных параметров. Она не способна объяснить сама себя. Можно придумать множество других списков элементарных частиц и констант связи, которые лягут в Стандартную модель столь же математически последовательно, как те, что существуют в природе.

А дальше — ещё хуже. Пытаясь совместить теорию элементарных частиц с теорией гравитации, мы получаем ужасную космологическую постоянную, достаточно большую, чтобы уничтожить не только галактики, звёзды и планеты, но и атомы, и даже протоны и нейтроны, *если только* ... Если что? Если различные бозоны, фермионы, массы и константы связи, используемые при расчёте энергии вакуума, не вступят в сговор с целью отменить первые 119 десятичных знаков. Но какой естественный механизм мог бы обеспечить подобное положение дел? Балансируют ли законы физики на острие невероятно острого ножа, и если да, то почему? Вот в чём вопрос.

В следующей главе мы обсудим, что определяет законы физики и насколько они уникальны. Мы обнаружим, что эти законы вовсе не уникальны! Они даже могут изменяться от места к месту в Мегаверсуме. Могут ли в Мегаверсуме существовать такие особые редкие места, в которых константы сговорились скомпенсировать энергию вакуума с достаточной точностью, чтобы позволить возникнуть жизни? Основная идея ландшафта возможностей, допускающая такой вариант, является предметом главы 3.



### Глава 3

## РЕКОГНОСЦИРОВКА МЕСТНОСТИ

— Навигатор, оно нас догоняет? — Лицо капитана было мрачным, бусинки пота катились по его лысому черепу и падали с подбородка. На руке, сжимавшей в кулаке ручку управления, вздулись вены.

— Да, капитан, боюсь, что нет никакой возможности от него оторваться. Пузырь растёт, и если мои расчёты верны, он неизбежно поглотит нас.

Капитан вздрогнул и ударил кулаком по пульта управления:

— Никогда не думал, что всё закончится именно так. Оказаться проглоченным пузырьком альтернативного вакуума... Можете вы сказать, каковы физические законы внутри него? Есть ли у нас шанс выжить?

— Вряд ли. Я оцениваю наши шансы как  $1:10^{100}$  — один на гугол. Возможно, вакуум внутри пузырька допускает существование электронов и кварков, но постоянная тонкой структуры, скорее всего, слишком велика. Она разорвёт атомные ядра ко всем чертям. — Штурман посмотрел на выписанные им уравнения и печально улыбнулся. — Даже если с постоянной тонкой структуры всё о'кей, существует вероятность, что там большая КП.

— КП?

— Да, вы знаете — Космологическая Постоянная. Скорее всего, она отрицательна и достаточно велика, чтобы разорвать наши молекулы — вот так.

Навигатор щёлкнул пальцами.

— Оно уже здесь! О боже! Нет, это суперсимметрия<sup>1</sup>. Никаких шансов...

Дальше — тишина.

Это было начало плохого научно-фантастического рассказа, который я попытался написать. Через несколько абзацев я бросил эту затею, поняв, что начисто лишён писательского таланта. Но наука может быть гораздо интереснее фантастики.

Всё большее число физиков-теоретиков склоняется к мнению, что законы физики не только могут изменяться, но и что это изменение почти всегда оказывается смертельным. В каком-то смысле законы природы похожи на погоду Восточного побережья: чрезвычайно переменчивую, почти всегда ужасную, но в редких случаях — прекрасную. Подобно смертоносным ураганам пузыри с чрезвычайно враждебным содержимым могут пронеситься через Вселенную, разрушая всё на своём пути. Но в особых редких местах мы обнаруживаем законы физики, идеально подходящие для нашего существования. Как же случилось, что мы оказались в одном из таких уникальных мест? Для этого нужно понять причины изменчивости законов физики, оценить, насколько большим является диапазон их изменения и каким образом область пространства может внезапно изменить свой характер, превратившись из смертельно враждебной в дружелюбную. Это подводит нас к главной проблеме нашей книги — Ландшафту.

*Ландшафт* — это пространство возможностей. География и топография Ландшафта состоит из холмов и долин, равнин и каньонов, гор и перевалов. Но, в отличие от обычного ландшафта, Ландшафт не трёхмерен, он простирается на сотни, а может быть, и на тысячи измерений. Почти все описанные детали Ландшафта представляют собой среду, смертельную для жизни, но некоторые из низколежащих долин оказываются обитаемыми. Ландшафт — это не реальное место. Он не располагается на Земле или где-либо ещё. Он не находится ни в простран-

<sup>1</sup> В главе 8 объясняется, почему навигатор боялся суперсимметрии.



стве, ни во времени. Это математическая конструкция, каждая из точек которой представляет собой некий набор возможностей окружающей среды, или, как скажет физик, возможного *вакуума*.

Обычно словом «вакуум» принято обозначать пустое пространство, из которого удалён воздух, водяной пар и любое другое вещество. Это то, с чем обычно имеет дело физик-экспериментатор, который возится с вакуумными трубками, вакуумными камерами и вакуумными насосами. Но в теоретической физике термин «вакуум» обозначает гораздо больше. Это своего рода сцена, на которой разворачивается физическое действие. Вакуум потенциально содержит всё, что может произойти на этой сцене. Это и список всех элементарных частиц, и фундаментальные физические константы, которые могут быть обнаружены или измерены в экспериментах, проводимых в этом вакууме. Короче говоря, вакуум — это среда, в которой Законы Физики принимают конкретную форму. Наш вакуум может содержать электроны, позитроны, фотоны и прочие обычные элементарные частицы. В нашем вакууме электрон имеет массу 0,511 МэВ, масса фотона равна нулю, а постоянная тонкой структуры — 0,007297351. Другие вакуумы могут, например, содержать безмассовые электроны, фотоны с массой 10 МэВ, не содержать кварков, но при этом иметь 40 различных видов нейтрино и постоянную тонкой структуры, равную 15,003571. Другой вакуум означает другие Законы Физики. Каждая точка Ландшафта представляет собой набор законов, которые, скорее всего, очень отличаются от наших собственных, но которые, тем не менее, возможны. Стандартная модель — это всего лишь одна из точек на ландшафте возможностей.

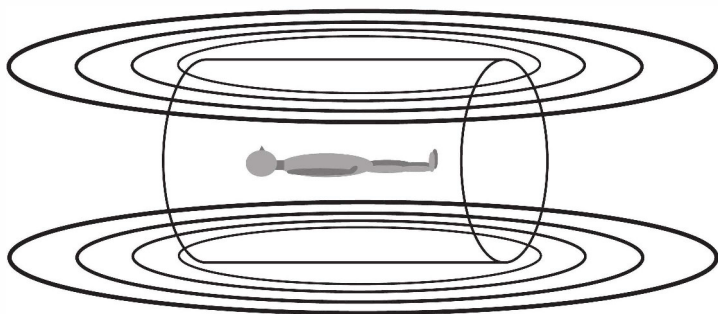
Но если Законы Физики могут различаться от вакуума к вакууму, то же самое можно сказать и об объектах изучения всех наук. В мире с более лёгкими электронами и более тяжёлыми протонами, скорее всего, отсутствовали бы атомы. Отсутствие атомов означает отсутствие химии, то есть отсутствие периодической системы, отсутствие молекул, кислот, оснований, органических соединений, а следовательно, и биологии.

Идея вселенных с альтернативными законами природы кажется научной фантастикой. Но она более реальна, чем фантастика. Благодаря современным медицинским технологиям альтернативные вселенные регулярно создаются внутри МРТ-аппаратов. Аббревиатура МРТ

была придумана для замены прежнего названия, ЯМР — ядерного магнитного резонанса, — чтобы не пугать обывателя страшным словом «ядерный». Поэтому название технологии было заменено на магнитно-резонансную томографию, или сокращённо — МРТ. В действительности в явлении ядерного магнитного резонанса не участвуют ни ядра урана или плутония, ни ядерные боеголовки. Ядра, о которых идёт речь в названии, находятся внутри тела пациента, и МРТ-аппарат аккуратно их возбуждает. Обычно этот аппарат представляет собой полый цилиндр, в стенках которого размещены электрические катушки, создающие внутри цилиндра очень сильное магнитное поле. Пациент внутри цилиндра находится в своей собственной маленькой вселенной, свойства вакуума которой слегка отличаются от свойств вакуума вселенной за пределами цилиндра. Представьте себе, что вы проснулись утром внутри такой машины, не зная, где вы находитесь. Что-то будет не так с законами физики. Первое, что вы заметите, — странное, я бы даже сказал опасное поведение железных предметов. Если у вас случайно в кармане пижамы окажется компас, то вы обнаружите, что его стрелка как влитая указывает в строго определённом направлении.

Вероятно, взять с собой внутрь МРТ-аппарата старый телевизор с электронно-лучевым кинескопом будет не самой лучшей идеей, но предположим, что вы это сделали. Включив его, вы обнаружите, что изображение на экране искажено причудливым образом. Зная, как работает кинескоп, вы могли бы восстановить траектории движения электронов. Сильное магнитное поле заставляет электроны двигаться не по прямой, а по штопорообразной спирали. Физик, знакомый с фейнмановскими диаграммами, скажет, что что-то не так с пропагатором электрона. Пропагатор — это не просто картинка, изображающая перемещение электрона из одной точки в другую, а ещё и математическое выражение, описывающее это движение.

Фундаментальные константы могут также оказаться слегка другими. Взаимодействие сильного магнитного поля со спинами электронов может даже привести к небольшому изменению их масс. Ещё интереснее оказывается влияние сильного магнитного поля на атомы. Магнитные силы слегка сплющивают электронные оболочки атомов в направлении, перпендикулярном вектору поля. В обычном МРТ-аппарате



этот эффект незначителен, но в более сильных магнитных полях атомы могут превратиться в некое подобие спагетти, вытянутых вдоль силовых линий поля.

Эффект влияния магнитного поля обнаруживается в виде небольших изменений энергетических уровней атомов и, соответственно, отражается на спектре излучения. Механизм этих изменений лежит в способе, которым электроны, позитроны и фотоны взаимодействуют друг с другом. Более сильное магнитное поле окажет эффект и на вершинную диаграмму, что отразится на значении постоянной тонкой структуры, которая будет зависеть от характера движения электронов.

Разумеется, магнитное поле МРТ-аппарата слабое, и его влияние на законы, управляющие движением заряженных частиц, минимально. Но в очень сильном поле пациент будет чувствовать себя неудобно, и влияние такого поля на физические законы может стать для пациента фатальным, потому что изменение свойств атомов приведёт к ужасным последствиям в плане протекания химических и биологических процессов.

Существуют два взгляда на описанную ситуацию, и оба правильные. С одной стороны, можно сказать, что фундаментальные законы природы несколько не изменились, а изменилась физическая среда, в которой теперь присутствует сильное магнитное поле. С другой стороны, можно сказать, что изменились правила расчёта фейнмановских диаграмм и что-то случилось с Законами Физики.

Пожалуй, наиболее правильным будет сказать, что:

**Законы Физики определяются окружающей средой.**

## Поля

Поля, как мы уже увидели, — это особые невидимые свойства пространства, оказывающие влияние на поведение объектов. Житейским примером служит магнитное поле: с ним сталкивался всякий, кто когда-либо брал в руки магнит и исследовал таинственное действие, которое тот оказывает сквозь лист бумаги на скрепки, булавки и гвозди. Многие помнят школьный опыт с железными опилками, образующими вокруг магнита рисунок, повторяющий *силовые линии магнитного поля*. Магнитное поле имеет в каждой точке пространства направление и напряжённость, определяющую, с какой силой оно действует на кусок железа. Магнитное поле внутри МРТ-аппарата в 10 000 раз сильнее магнитного поля Земли.

Несколько менее знакомое нам по повседневному опыту электрическое поле тесным образом связано с магнитным. Оно не оказывает заметного эффекта на железные предметы, но именно оно ответственно за притяжение маленьких кусочков бумаги наэлектризованным предметом. При трении одного предмета о другой электроны с поверхности первого предмета переходят на поверхность второго, в результате чего предметы приобретают противоположные по знаку электрические заряды. Заряженные тела создают вокруг себя электрическое поле, которое, подобно магнитному, имеет в каждой точке пространства направление и напряжённость. В конечном итоге Законы Физики оказываются переменчивыми, потому что они определяются полями, а поля могут изменяться. Включение магнитного и электрического полей является одним из вариантов изменения законов, но это не единственная возможность модифицировать вакуум — есть и более интересные способы. Например, можно использовать гравитационное поле Эйнштейна, но и это ещё не всё. Вторая половина двадцатого столетия ознаменовалась открытием новых элементарных частиц, новых типов взаимодействий и, как следствие, новых полей, которыми можно заполнить пространство, и они будут оказывать влияние на обычную материю. Однако одно из всех этих полей, а именно — *поле Хиггса*, будет интересовать нас больше других в плане изучения Ландшафта.

Открытие поля Хиггса<sup>1</sup> не было открытием в обычном, экспериментальном смысле. Теоретики обнаружили, что без поля Хиггса Стандартная модель оказывается несогласованной. Без него фейнмановские правила могут приводить к бессмысленным результатам типа бесконечной или отрицательной вероятности. Но в конце 1960-х — начале 1970-х годов теоретики показали, что одним из способов «починить» Стандартную модель является добавление в неё ещё одной элементарной частицы — частицы Хиггса. Частица Хиггса, поле Хиггса ... Какая связь между полями и частицами заставляет нас давать им одинаковые имена? Идея поля впервые возникла в середине XIX века при изучении электромагнитных явлений. Майкл Фарадей представлял поля в виде гладких возмущений в пространстве, оказывающих влияние на движение электрически заряженных частиц, но само поле *не* обязано было состоять из частиц. Для Фарадея и развившего его идеи Максвелла мир состоял из частиц и полей, и ни у кого не возникало сомнений, что из них есть что. Но в 1905 году Альберт Эйнштейн, исследуя формулу Планка для излучения абсолютно чёрного тела, предложил нелепую гипотезу. Эйнштейн утверждал, что электромагнитное поле на самом деле состоит из огромного количества невидимых частиц, которые он назвал фотонами, или квантами. Когда квантов мало, они проявляют себя подобно частицам, но когда огромное количество квантов движется скоординированно, они ведут себя как поле — *квантовое поле*. Это отношение между частицами и полями оказалось всеобщим. Для каждого типа частиц существует своё поле, а для каждого типа поля — своя частица. Поэтому-то поля и частицы часто называются одинаковыми именами. Электромагнитное поле (обобщающее название электрического и магнитного поля) может быть названо *фотонным полем*. Электроны тоже имеют собственное поле. И кварки, и глюоны — любой персонаж Стандартной модели имеет собственное поле, в том числе и частицы Хиггса.

Я сказал, что Стандартная модель без частиц Хиггса является математическим нонсенсом, но мне следует внести небольшое пояснение.

<sup>1</sup> К теоретическому открытию поля Хиггса, помимо самого Питера Хиггса, было причастно ещё множество людей. Среди них француз Роберт Браут и бельгиец Франсуа Энглер, первыми указавшие на необходимость введения подобного поля.

Стандартная модель без частиц Хиггса математически последовательна, но только до тех пор, пока все частицы движутся со скоростью света, как фотоны. Частицы, движущиеся со скоростью света, не могут иметь массы, поэтому физики утверждают, что поле Хиггса как раз для того и необходимо, чтобы дать элементарным частицам массу. С моей точки зрения, это неудачная формулировка, но мне не придумать лучшую. В любом случае это важный пример того, как поля влияют на мировые константы.

Никто никогда не видел частицу Хиггса, и долгое время не было даже косвенных данных, позволяющих физикам-экспериментаторам сказать, что они её «видели». Только недавно были получены первые результаты, которые можно интерпретировать как обнаружение этой частицы. Собственно, никакой сложности в детектировании частиц Хиггса нет, трудность состоит в первую очередь в генерации их в количестве, достаточном для изучения. Эта проблема не является принципиальной преградой: чтобы рождалась такие тяжёлые частицы, как бозон Хиггса, вам просто нужен большой ускоритель. Частицы Хиггса и поле Хиггса настолько важны для успеха Стандартной модели<sup>1</sup>, что никто всерьёз даже не сомневался в их существовании. В то время, как я пишу эту книгу, в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) близится к завершению строительство нового ускорителя, который будет способен поставлять нам для исследования частицы Хиггса в огромных количествах. Почти 40 лет прошло с момента, когда частицы Хиггса были впервые предсказаны теоретиками, до момента их экспериментального обнаружения.

Если бы поле Хиггса можно было включать и выключать с такой лёгкостью, как магнитное, мы могли бы изменять, например, массу электрона по своему усмотрению. Увеличение массы привело бы к тому, что атомные электроны вращались ближе к ядру, что, в свою очередь, радикально изменило бы химию. Изменяя массы кварков, из которых состоят протоны и нейтроны, можно было бы менять свойства ядер или в определённый момент вовсе уничтожить их. Ещё более разруши-

---

<sup>1</sup> Частица настолько важна, что физик Леон Ледерман написал о ней книгу, озаглавленную «Частица Бога» (Ледерман с равным успехом мог бы назвать книгу «Поле Бога», но я считаю, что название «Частица Бога» лучше характеризует её суть).

тельным является изменение поля Хиггса в другом направлении — например, это может полностью лишить электрон массы. Слишком лёгкий электрон не сможет оставаться внутри атома. Наверное, это не те эксперименты, которые мы хотели бы ставить над миром, в котором живём, потому что подобные изменения будут иметь катастрофические последствия и сделают мир необитаемым. Значительные изменения в Законах Физики будут фатальными, и мы будем возвращаться к этому сюжету снова и снова.

Изменяя поле Хиггса, мы могли бы значительно разнообразить наш мир: вместе с полем будут меняться законы ядерной и атомной физики. Физик из одного региона не будет признавать Законы Физики другого. Но всё же количество возможных вариаций поля Хиггса является весьма скромным. А что бы произошло, если бы количество изменяемых полей исчислялось многими сотнями? Это подразумевало бы многомерный ландшафт, настолько разнообразный, что в нём можно было бы найти все, что угодно. А заветной мечтой учёного, изучающего такой мир, была бы мечта найти в нём что-то невозможное. Как мы вскоре увидим, это отнюдь не пустые фантазии.

Всякий раз, когда перед математиками или физиками встаёт задача, содержащая несколько переменных, они думают о пространстве, содержащем возможные значения этих переменных. Простым примером является температура воздуха. Представьте себе прямую линию, на которой стоит отметка, обозначающая ноль градусов, рядом с ней ещё одна отметка, обозначающая один градус, далее ещё одна отметка, обозначающая два градуса, и т. д. Линия представляет собой одномерное пространство, содержащее возможные значения температуры. Точка с отметкой 25 градусов будет представлять тёплый летний день, точка с отметкой  $-25$  градусов — морозный зимний. Температурная шкала на обычном бытовом термометре является конкретным представлением этого абстрактного пространства.

Предположим, что в дополнение к термометру за окном кухни у нас также есть барометр для измерения атмосферного давления. Мы могли бы нарисовать две оси: одну для представления температуры, а другую для представления атмосферного давления. Опять же, каждая точка, теперь уже в двумерном пространстве, представляет нам одно из возможных погодных условий. Если бы мы захотели фиксировать



ещё больше информации, например влажность воздуха, то могли бы добавить третью координату и представлять состояние погоды в виде точки в трёхмерном пространстве.

Комбинация температуры, давления и влажности говорит нам гораздо больше, чем каждый из этих параметров по отдельности. Она говорит нам о том, какие типы частиц могут существовать при определённых условиях, только в данном случае речь идёт не об элементарных частицах, а о капельках воды. В зависимости от условий капли воды могут принимать вид тумана, дождя, изморози, снега или града.

Законы Физики — это своего рода «погода в вакууме», только вместо температуры, атмосферного давления и влажности эта погода определяется величиной полей. И точно так же, как погода определяет характер водяных капель в воздухе, вакуумная погода определяет список элементарных частиц и их свойства. Сколько существует полей, от которых зависит набор частиц, их массы и константы связи? Некоторые из них мы уже знаем: электрическое и магнитное поля и поле Хиггса. Остальные станут известны, когда мы узнаем о главнейших законах природы больше, чем даёт нам Стандартная модель.

Сегодня наша главная и пока что единственная ставка на открытие такого универсального закона — это теория струн. В главах 7 и 8 мы увидим, что теория струн даёт неожиданный ответ на вопрос о количестве полей, управляющих локальной погодой вакуума. На сегодняшнем уровне наших знаний нам видится, что количество таких полей должно исчисляться сотнями, если не тысячами.

Но независимо от количества полей сам принцип остаётся тем же самым. Представьте себе математическое пространство, каждая размерность которого соответствует отдельному полю. Если полей десять, пространство будет десятимерным. Для представления тысячи полей понадобится тысячемерное пространство. Это пространство и есть ландшафт. Точка на этом ландшафте определяет величины всех полей — состояние вакуумной погоды. Это состояние определяет набор элементарных частиц, их массы и законы взаимодействия. Если бы кто-нибудь умел постепенно перемещаться через вселенные от одной точки ландшафта к другой, все характеристики окружающего его мира также плавно менялись бы. В ответ на эти изменения менялись бы и свойства атомов и молекул.



## ХОЛМЫ И ДОЛИНЫ

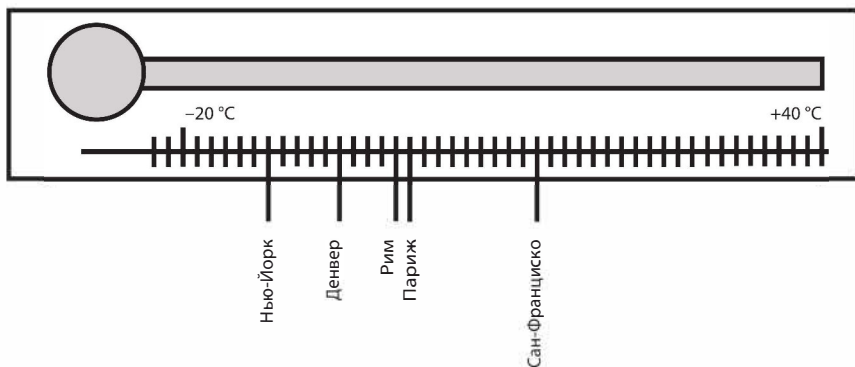
Карта реальной местности неполна, если на ней отсутствуют указания на высоту тех или иных точек над уровнем моря. С этой целью на топографических картах проводят кривые, обозначающие линии равных высот. Ещё нагляднее смотрится пластилиновая модель местности, изображающая горы, долины и равнины в миниатюре.

Представьте, что у нас есть как раз такая модель, и мы пустили по ней кататься маленький гладкий шарик, например шарик от подшипника. Если поместить шарик в случайном месте и отпустить, он покажется вниз до тех пор, пока в конце концов не остановится в нижней части какой-нибудь долины. Почему именно так? На этот вопрос в разные времена отвечали по-разному. Древние греки считали, что каждому элементу предписано собственное место: земля и вода стремятся вниз, огонь и воздух — вверх. Я не знаю, как бы ответили на этот вопрос вы, но как профессор физики предлагаю такое объяснение: шарик от подшипника имеет потенциальную энергию, которая зависит от его высоты. Чем больше высота, тем выше потенциальная энергия. Шарик стремится скатиться туда, где его потенциальная энергия имеет наименьшее значение, или *локальное* наименьшее значение, которого шарик может достичь, не взбираясь без необходимости на холм в поисках более низкорасположенной долины. Физику, изучающему катящиеся шарики, карта с горизонталями и модель ландшафта дают информацию об изменении потенциальной энергии катящегося по ландшафту шарика.

Ландшафт (с большой буквы), которому посвящена эта книга, также имеет холмы, долины, горы и равнины. Только места шариков от подшипника на этом Ландшафте занимают целые карманные вселенные! Что я имею в виду, говоря о том, что карманные вселенные занимают места на Ландшафте? Это как если бы в сводке погоды диктор сообщил, что Денвер занимает область в районе минус пяти градусов на температурной шкале.

Это звучит странно, но определённый смысл в том, чтобы представлять города «ползающими» по шкале термометра, есть.

Но какой смысл имеет высота точки на ландшафте? Очевидно, она не имеет ничего общего с высотой точки над уровнем моря на земной



поверхности. Тем не менее она представляет потенциальную энергию, но не энергию шарика от подшипника, а энергию карманной вселенной<sup>1</sup>. И подобно шарiku, который катится туда, где его потенциальная энергия минимальна, вселенные стремятся эволюционировать в состояние с наименьшей потенциальной энергией. Я ещё вернусь к этому моменту.

Имея это в виду, давайте вернёмся к Законам Физики в МРТ-аппарате. Если магнитное поле будет единственным полем, присутствующим внутри аппарата, ландшафт будет одномерным, как температурная шкала, с единственной осью, на которой отложены значения напряжённости магнитного поля.



Магнитные поля не возникают сами по себе. Для создания поля требуется энергия. На заре электромагнитной теории, прежде чем Майкл Фарадей ввёл понятие поля, считалось, что это энергия электрических токов, протекающих по проводам электрических схем. Но Фарадей по-новому взглянул на природу вещей и вместо проводов,

<sup>1</sup> Даже в метафоре погоды присутствует понятие энергии. Энергия всех молекул в кубическом метре атмосферного воздуха зависит от температуры и давления. Таким образом, мы могли бы добавить понятие высоты и в погодный пейзаж. Разумеется, она не будет иметь ничего общего с обычной высотой.

трансформаторов, сопротивлений и других элементов схем сосредоточил внимание на полях, заполняющих пространство и влияющих на поведение заряженных тел. Очень скоро физики осознали огромное значение энергии самого поля: везде, где есть поля, есть энергия. Например, энергия, содержащаяся в электромагнитном поле луча света, нагревает освещаемые им холодные предметы.

В магнитном поле МРТ-аппарата тоже содержится энергия. Позже мы столкнёмся с полями, содержащими гораздо бóльшую энергию, чем слабое магнитное поле, используемое в магнитно-резонансной томографии, энергии которого едва ли хватит на то, чтобы вскипятить полстакана воды.

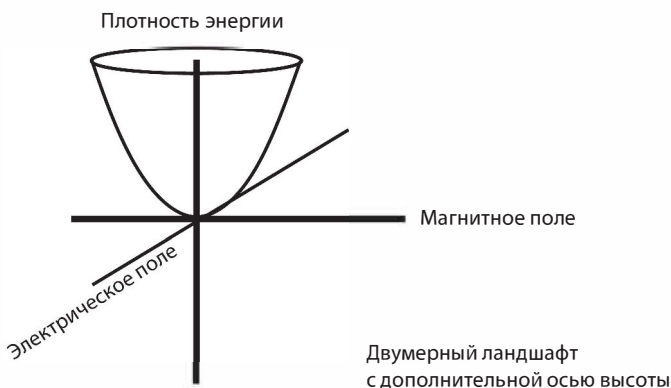
Добавив к нашему одномерному ландшафту вертикальную ось, мы сможем графически отобразить энергию в каждой точке. Энергия магнитного поля пропорциональна квадрату его напряжённости, поэтому наш график будет представлять собой параболу, опирающуюся вершиной на начало координат.



Магнитное поле было одним из двух полей, введённых Фарадеем. Второе поле — электрическое. В отличие от магнитного, оно не оказывает влияния на стрелку компаса, но способно заставить встать дыбом волосы на вашей голове. Сильное электрическое поле может деформировать атомы, растягивая в разные стороны отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные атомные ядра. Деформированные атомы образуют длинные цепочки, в которых положительно заряженные ядра одних атомов притягиваются к вытянутым

отрицательно заряженным электронным оболочкам других. Ещё более сильное электрическое поле оторвёт атомы друг от друга. Понятно, что в подобных точках ландшафта атомы уже не смогут существовать, и, как следствие, не сможет существовать и жизнь.

Присутствие и электрического и магнитного полей вносит ещё большее разнообразие в ландшафт, который становится двумерным. Поскольку электрическое поле тоже обладает энергией, «высота» ландшафта будет изменяться уже в двух горизонтальных измерениях. Такой ландшафт будет выглядеть подобно глубокой чаше с круто поднимающимися вверх краями.



Поскольку электрическое и магнитное поля по-разному влияют на поведение электронов, они вносят большее разнообразие в Законы Физики. Электроны в смешанном поле движутся по более сложным траекториям, чем в каждом из полей по отдельности. Энергетические уровни атомов демонстрируют большой уровень сложности, и ландшафт оказывается более разнообразным. Если всё пространство равномерно заполнить электрическим и магнитным полями, можно будет утверждать, что Законы Физики зависят от «местоположения» вселенной на двумерном ландшафте. В природе, помимо электрического и магнитного, существует большое количество полей, но общий принцип остаётся неизменным: каждая точка на ландшафте, или, другими словами, каждая комбинация полей соответствует определённому значению плотности энергии. Представляя поля расположенными

в горизонтальной плоскости, мы должны добавить к ландшафту всего одну ось для представления энергии. Называя эту ось «высотой», мы, образно говоря, получаем ландшафт с равнинами, холмами, горами и долинами.

Не следует забывать, что электрическое и магнитное поля являются *векторными полями*, что означает, что в каждой точке они имеют не только величину напряжённости, но и направление. Стрелка компаса, расположенного вблизи магнита, укажет направление магнитного поля. В идеальном случае вектор магнитного поля в любой точке на поверхности Земли всегда указывал бы на северный магнитный полюс. В реальности ситуация далека от идеальной, потому что огромные залежи железной руды в земной коре искажают картину магнитного поля, вызывая местные вариации его направления.

Большинство полей, образующих ландшафт, проще электрического и магнитного: большая часть этих полей является *скалярными полями*. Скалярное поле не имеет направления и характеризуется только одной величиной — напряжённостью. Примером скалярного поля может служить поле распределения температуры на поверхности Земли. Вы никогда не услышите от синоптика что-либо типа: «двадцать градусов Цельсия в направлении на северо-запад». Температура имеет величину, но не имеет направления. Но синоптики имеют дело и с векторными полями, например со скоростью ветра, имеющей как величину, так и направление. Температура, атмосферное давление, влажность и скорость ветра являются величинами, которые могут меняться от места к месту, что и делает их полями. Разумеется, это только аналогия, и они не имеют ничего общего с полями, образующими ландшафт.

Поле Хиггса очень похоже на магнитное поле (если не считать, что оно скалярное), но им несоизмеримо труднее манипулировать. Для изменения поля Хиггса даже на ничтожную величину требуется невообразимое количество энергии. Однако если бы мы научились управлять им, мы смогли бы менять по своему усмотрению массы всех элементарных частиц, за исключением фотона.

Локомотивы, пушечные ядра, элементарные частицы — всё имеет массу. Масса является мерой инертности: более массивное тело труднее заставить двигаться или остановить. Для определения массы тела следует приложить к нему силу и измерить создаваемое этой силой уско-

рение: отношение силы к ускорению и будет массой. Если в момент начала эксперимента тело покоилось, то измеренная масса называется массой покоя. В прошлом было принято различать массу движения и массу покоя, но сегодня термин «масса» *всегда означает массу покоя*.

Из опыта известно, что все электроны обладают одинаковой массой. То же самое касается и протонов, и любых других элементарных частиц. Именно по этой причине мы можем говорить о *массе электрона*, не уточняя, какой из электронов мы имеем в виду. Точно так же мы можем говорить о массе любой элементарной частицы, но, разумеется, массы различных типов частиц различаются. Например, масса протона в 1800 раз больше массы электрона.

Фотоны же оказываются эксцентричными чудаками, когда заходит речь об их массе. Масса определяется по ускорению тела, когда тело начинает движение из состояния *покоя*, а фотоны никогда не покоятся, они всегда движутся, причём всегда с одной и той же скоростью. Фотоны, согласно Эйнштейну, являются частицами света, а свет всегда движется со *скоростью света*. Фотоны не могут находиться в покое, вместо того, чтобы замедляться, они просто исчезают. Это означает, что масса фотона равна нулю. И вообще: любые частицы, способные двигаться со скоростью света, должны быть *безмассовыми*.

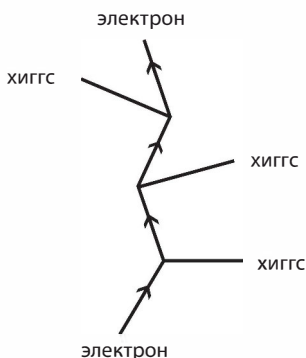
Из всех экспериментально наблюдаемых частиц безмассовым является только фотон. Однако есть основания полагать, что в природе должна существовать по крайней мере ещё одна безмассовая частица. Подобно тому как в результате перехода электрона с одной орбиты на другую атом излучает электромагнитные волны, планеты, двигаясь вокруг Солнца, возмущают гравитационное поле, что приводит к излучению гравитационных волн. Эти гравитационные волны слишком слабы, чтобы обнаружить их на Земле, но время от времени во Вселенной происходят ужасные катаклизмы, порождающие мощнейшее гравитационное излучение. Столкновение чёрных дыр способно освободить невероятное количество энергии в форме гравитационного излучения, для обнаружения которого на Земле были построены специальные детекторы. Если теоретики не заблуждаются, то эти волны будут распространяться в пространстве со скоростью света, поэтому разумно предположить, что они должны состоять из безмассовых частиц — гравитонов.

Хотя я и говорил, что все электроны имеют одну и ту же массу, тут есть одна тонкость, о которой вы, возможно, уже догадались. Масса электрона зависит от величины поля Хиггса в той точке, где в данный момент находится электрон. Если бы мы обладали технологией, позволяющей варьировать поле Хиггса, то масса электрона могла бы зависеть от его местоположения. То же касается и масс всех остальных элементарных частиц, за исключением фотона и гравитона.

В нашем обычном вакуумном состоянии величины большинства известных полей равны нулю. Поля могут флуктуировать из-за квантовых эффектов, но их мгновенные значения при этих флуктуациях с равной вероятностью оказываются как положительными, так и отрицательными, так что в среднем величина поля остаётся нулевой. Создание ненулевого поля требует энергии. Поле Хиггса, однако, ведёт себя по-другому. Его среднее значение в пустом пространстве отлично от нуля. Это как если бы в волнующемся море элементарных частиц присутствовал ещё дополнительный фиксированный уровень жидкости, состоящий из частиц Хиггса. Почему мы не замечаем этой жидкости? Я бы сказал, потому, что мы привыкли к её существованию. Но если бы эта жидкость исчезла, мы сразу же почувствовали бы её отсутствие, хотя... будем честными: мы бы и в этом случае ничего не почувствовали, поскольку прекратили бы своё существование.

«Поле Хиггса даёт частицам их массы» — что стоит за этим утверждением? Ответ уходит своими корнями глубоко в дебри математики Стандартной модели, но я попытаюсь обрисовать главную идею. Как уже говорилось ранее, если исключить поле (или частицу) Хиггса из списка действующих лиц, то квантовая теория поля, описывающая Стандартную модель, будет математически последовательной, только если все элементарные частицы будут безмассовыми, как фотоны. Фактические массы таких частиц, как электроны, кварки,  $W$ -бозоны и  $Z$ -бозоны, возникают из-за их движения сквозь «жидкость», состоящую из частиц Хиггса. Мне бы не хотелось вводить вас в заблуждение ложной аналогией, но это выглядит так, будто хиггсовская жидкость сопротивляется движению частиц. Только это сопротивление не похоже на обычное трение, тормозящее частицы и заставляющее их останавливаться. Вместо этого хиггсовская жидкость сопротивляется

изменению скорости частиц, проявляя себя так же, как инертная масса. Лучше посмотрите на фейнмановскую диаграмму, которая одна стоит тысячи слов.

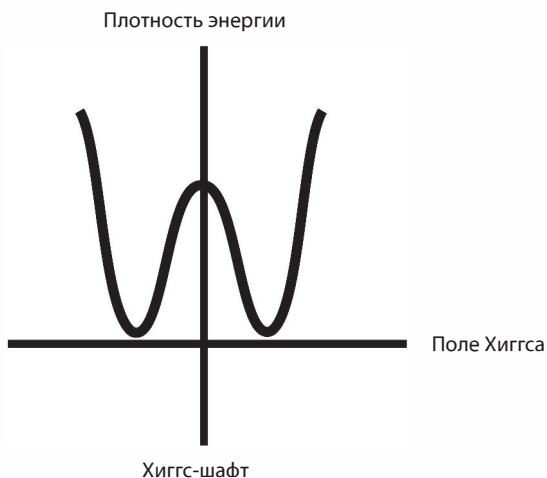


Если бы нам удалось создать в некоторой области нулевое хиггсовское поле, то наиболее заметным следствием этого стала бы нулевая масса электрона. Это оказало бы разрушительный эффект на атомы. Слишком лёгкий электрон не мог бы находиться внутри атома. Ни атомы, ни молекулы не смогли бы существовать. Жизнь в том виде, в каком она нам известна, тоже не возникла бы в такой области.

Было бы крайне интересно проверить это предсказание экспериментально, но манипуляции с полем Хиггса несоизмеримо сложнее, чем манипуляции с магнитным или электрическим полем. Создание области с нулевым полем Хиггса требует невероятного количества энергии. В частности, для очистки от частиц Хиггса одного кубического сантиметра пространства понадобится порядка  $10^{40}$  джоулей. Такую энергию излучает Солнце за миллион лет. Так что проведения подобного эксперимента нам придётся ещё какое-то время подождать.

Почему же поле Хиггса так отличается от электромагнитного поля? Ответ кроется в ландшафте. Представим себе одномерный ландшафт и, игнорируя электрическое и магнитное поля, оставим в нём только одно поле Хиггса. Получившийся «Хиггс-шафт» будет гораздо интереснее, чем простая парабола, описывающая ландшафт магнитного поля. Он представляет собой две глубокие долины, разделённые чрезвычайно высокой горной вершиной.





Не переживайте, если вы не понимаете, почему Хиггс-шафт выглядит столь необычно. Этого никто до конца не понимает. Это просто ещё один эмпирический факт, который следует принимать как данность. Вершина горы — это точка, в которой поле Хиггса равно нулю. Представим, что при помощи некоего супермощного космического пылесоса нам удалось высосать из вакуума всё хиггсовское поле. Перед нами откроется место на Хиггс-шафте, в котором все частицы, входящие в Стандартную модель, являются безмассовыми и движутся со скоростью света. Из графика видно, что вершина горы представляет собой среду с огромной плотностью энергии. Помимо всего прочего, это — смертоносная среда.

В противоположность ей наш уголок Вселенной является безопасным гнёздышком в одной из долин, где плотность энергии минимальна. В этой долине поле Хиггса отлично от нуля, вакуум наполнен хиггсовской жидкостью, и все частицы имеют массу. Атомы ведут себя как положено атомам, и жизнь процветает. Полный ландшафт теории струн весьма напоминает только что описанный, только он бесконечно богаче самыми неблагоприятными для существования жизни возможностями. Дружественные обитаемые долины представляют крайне редкое исключение. Но об этом позже.

Почему в каждом примере мы живём в нижней части долины? Является ли это общим принципом? Без сомнения, да.

## Качение по Ландшафту

Герман Минковский умел глаголом жечь сердца физиков. Вот что он сказал о пространстве и времени: «Отныне время само по себе и пространство само по себе становятся пустой фикцией, и только единение их сохраняет шанс на реальность». Так говорил Минковский о специальной теории относительности — двухлетнем детище Эйнштейна. Это был тот самый Минковский, который объявил миру, что пространство и время должны быть объединены в единый четырёхмерный пространственно-временной континуум. Из четырёхмерного взгляда на мир следует, что если Законы Физики могут меняться от одной точки пространства к другой, то точно так же они должны меняться со временем. Следовательно, обычные законы природы, даже закон всемирного тяготения, могут меняться: внезапно или постепенно.

Представьте себе, что через физическую лабораторию проходит длинноволновое радиоизлучение. Радиоволны, являясь возмущением электромагнитного поля, состоят из колебаний электрического и магнитного полей. Если длина волны велика, то при прохождении волны через лабораторию каждое колебание будет занимать много времени. Для драматизации ситуации предположим, что длина волны составляет два световых года. В этом случае поля, измеряемые в лаборатории, будут в течение полугода увеличиваться, а затем следующие полгода снова уменьшаться до нуля<sup>1</sup>. Если измеряемое в лаборатории поле равно нулю в декабре, то своего максимума оно достигает в июне.

Медленно изменяющиеся поля приведут к тому, что поведение электронов тоже будет меняться со временем. В зимние месяцы, когда поля малы, электроны, атомы и молекулы будут вести себя как обычно. Летом, когда значения полей максимальны, электроны будут двигаться по странным орбитам, а атомы будут сжаты в направлении, перпендикулярном магнитному полю. Электрическое поле также вносит искажения в форму атомов, растягивая электроны и ядра

---

<sup>1</sup> Имейте в виду, что каждый цикл колебаний начинается с нулевого значения, затем поле увеличивается, потом снова уменьшается до нуля, переходит в отрицательную область, достигает наибольшего отрицательного значения и затем снова возвращается к нулю. Таким образом, за один цикл колебаний электрическое и магнитное поля будут дважды проходить через нулевое значение.

в противоположных направлениях. В итоге получается, что Законы Физики изменяются в зависимости от сезона!

А что с полем Хиггса? Может ли и оно меняться со временем? Вспомните, что обычное пустое пространство заполнено хиггсовским полем. Представьте себе, что некий тёмный властелин-физик изобрёл космический пылесос смерти, способный высасывать из пространства частицы Хиггса. Этот пылесос настолько мощный, что может перетащить всю Вселенную или большую её часть на вершину горы, находящуюся в центре пространства Хиггса. В результате этого во Вселенной произойдут страшные события: атомы дезинтегрируют, и жизнь прекратится. Но интереснее всего то, что произойдёт потом. Допустим, что Хиггс-шафт на самом деле является ландшафтом с высокой вершиной, разделяющей две глубокие долины. Вселенная поведёт себя подобно шарикю от подшипника, балансирующему на острие ножа, готовому от малейшего толчка упасть с него в правую или левую долину. Очевидно, что такое состояние нестабильно и малейшее возмущение отправит шарик в одну из долин.

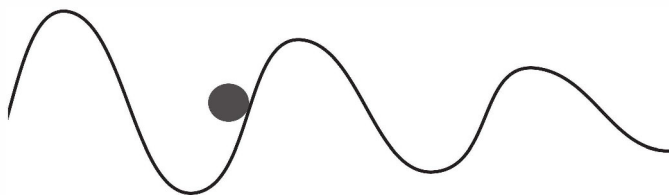
Если поверхность ландшафта совершенно гладкая и трение отсутствует, то шарик, свалившись в долину, не остановится на её дне, а прокатится дальше, поднявшись по склону, после чего покатится в обратную сторону и снова заберётся на вершину горы и так до бесконечности. Но если незначительное трение всё же присутствует<sup>1</sup>, то шарик в конце концов остановится на дне одной из долин.

Так же ведёт себя и поле Хиггса. Вселенная «катается» по Ландшафту, пока не остановится в одной из долин, сформировав обычный вакуум.

Дно долины является единственным местом, где воображаемый шарик может оставаться в покое. Помещённый на склоне, шарик будет катиться вниз. На вершине холма шарик будет находиться в неустойчивом равновесии. Таким образом, единственным возможным стабильным видом вакуума с неизменными Законами Физики является вакуум на дне долины Ландшафта.

<sup>1</sup> Когда Вселенная находится в верхней части горы, энергия вакуума заставляет её расширяться, проявляясь в виде космологической постоянной. Расширение Вселенной приводит к появлению своего рода сопротивления, называемого космическим трением.

Дно долины, в которой упокоится Вселенная, не обязательно должно быть самой низкой точкой Ландшафта. Горный хребет может содержать много долин, каждая из которых окружена вершинами, причём некоторые из долин могут находиться достаточно высоко над уровнем моря и даже выше некоторых горных вершин. Но до тех пор, пока Вселенная пребывает в нижней части какой-нибудь долины, она будет оставаться в ней. Для обозначения низшей точки долины используется математический термин: *локальный минимум*. Любое движение из точки локального минимума сопряжено с подъёмом вверх. Таким образом, мы приходим к важному фундаментальному факту: возможный стабильный вакуум, или, что то же самое, возможные неизменные Законы Физики, соответствует локальному минимуму Ландшафта.



Ни один безумный учёный никогда не соберётся уничтожить поле Хиггса. Как я говорил, чтобы очистить от него один кубический сантиметр пространства, потребуется вся энергия, излучаемая Солнцем за миллион лет. Но примерно 14 миллиардов лет назад температура была настолько высока, что плотность энергии была более чем достаточно, чтобы вымести поле Хиггса из всей известной Вселенной. Я имею в виду очень раннюю стадию эволюции Вселенной сразу после Большого взрыва, когда температура и давление были чрезвычайно велики. Физики считают, что Вселенная родилась с полем Хиггса, равным нулю, то есть находилась на вершине горы. В ходе охлаждения Вселенная скатилась по склону в долину, где мы сейчас и живём. «Качение» по Ландшафту играет центральную роль во всех современных космологических теориях.

Хиггс-шафт имеет небольшое количество локальных минимумов, и вероятность того, что в одном из минимумов плотность вакуумной энергии будет составлять не более  $10^{-120}$ , крайне мала. Однако, как вы

увидите в главе 10, реальный ландшафт теории струн гораздо сложнее, разнообразнее и интереснее. Попробуйте представить пространство с 500 измерениями, топография которого содержит порядка  $10^{500}$  локальных минимумов, в каждом из которых действуют собственные физические законы, — ничего не выйдет. Независимо от того, насколько ваш мозг отличается от моего, число  $10^{500}$  лежит далеко за пределами наших представлений. Но одно точно: в таком огромном наборе возможностей наверняка найдётся вариант, в котором плотность энергии вакуума составляет  $10^{-119}$ , и это будет ответом на вайнберговский антропный аргумент.

В следующей главе я собираюсь отдохнуть от технических вопросов и рассказать о надеждах и чаяниях физиков. Мы снова вернёмся к «строгой науке» в главе 5, но сдвиг парадигмы значит больше, чем факты и цифры. С этим сдвигом связаны эстетические и эмоциональные вопросы, а также возможный отказ от прежней парадигмы. Идея о том, что Законы Физики могут, как погода, зависеть от местных условий, ужасно разочаровывает многих физиков, почти с религиозным фанатизмом верящих, что природа должна быть «красивой» в определённом специфическом математическом смысле.



Глава 4

## МИФ ОБ ЭЛЕГАНТНОСТИ И ОДНОЗНАЧНОСТИ

Бог использовал самую совершенную математику при создании Вселенной.

— *Поль Дирак*

Если вам нужно описать правду, оставьте элегантность портному.

— *Альберт Эйнштейн*

Красота хуже вина, она сводит с ума и того, кто ею обладает, и того, кто на неё смотрит.

— *Олдос Хаксли*

### **Что физики понимают под красотой**

Споры об антропном принципе — это больше, чем противостояние научных фактов и философских принципов. Можно ли применить понятие «хороший вкус» к науке? Как все споры о вкусе, он затрагивает эстетические чувства людей. Сопротивление объяснению природы позиций антропного принципа берёт начало из особых эстетических

критериев, которые оказывали влияние на всех великих физиков: Ньютона, Эйнштейна, Дирака, Фейнмана, и наше поколение не стало исключением. Чтобы понять силу их чувства, следует сначала понять ту эстетическую парадигму, которая сегодня ставится под сомнение носителями новых идей.

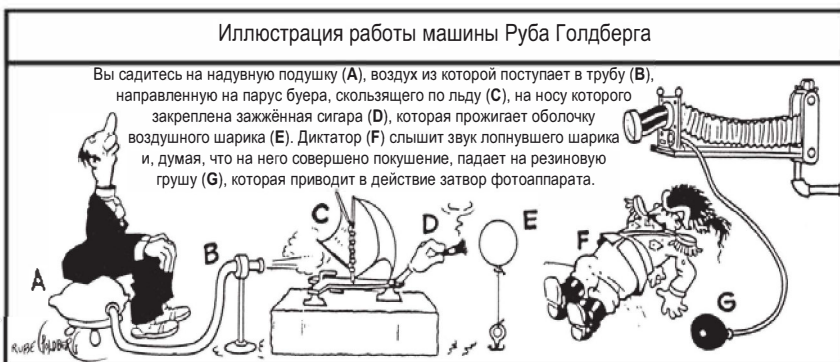
Потратив добрую часть жизни на занятия теоретической физикой, лично я убеждён, что это самая красивая и элегантная из всех наук. И я уверен, что все мои друзья-физики думают точно так же. Но большинство из нас не способно внятно сформулировать, что же мы подразумеваем под красотой физики. Задавая этот вопрос, я получал на него самые разнообразные ответы. Большинство указывало на элегантность математических уравнений, но некоторые отвечали, что сами по себе физические явления красивы.

Я не сомневаюсь, что у физиков существуют какие-то эстетические критерии, по которым они судят о своих теориях.

Все разговоры на эту тему обильно приправлены такими словами, как «элегантность», «простота», «мощность», «однозначность» и т. п., и, возможно, не найдётся двух людей, подразумевающих под одними и теми же словами одни и те же вещи, но я постараюсь сформулировать некое общее определение, с которым согласится большинство физиков.

Для меня различия между элегантностью и простотой слишком тонки. Математики и инженеры тоже используют эти термины более или менее взаимозаменяемо, и они подразумевают под ними примерно то же самое, что и физики. Элегантное решение инженерной задачи означает, что в этом решении использовалось минимальное количество деталей и минимальные затраты труда. Заставить один компонент выполнять две различные функции — это тоже элегантное решение. Минимальное решение — элегантно.

В 1940-х годах карикатурист Руб Голдберг, автор «Невероятных машин Руба Голдберга», придумывал механизмы, выполнявшие простые действия невероятно сложным способом. Например, будильник Руба Голдберга состоял из скатывающегося с горки шарика, приводящего в действие молоток, бьющий по хвосту птички, которая, взлетая, дёрнула за верёвочку, опрокидывающую ведро, вода из которого выливалась на спящего человека. Это прекрасный пример неэлегантного решения задачи.



Решение математической задачи может быть также оценено в терминах эlegantности. Доказательство теоремы должно быть настолько коротким, насколько возможно, количество дополнительных предположений, равно как и количество шагов доказательства, должно быть сведено к минимуму. Математическая система, такая как Евклидова геометрия, должна основываться на минимальном количестве аксиом. Математики любят упорядочивать свои аргументы порой до степени полной непостижимости для непосвящённых.

Идея эlegantности в теоретической физике в основном та же самая, что в математике или в инженерии. Общая теория относительности эlegantна, поскольку позволяет вывести огромное количество следствий из минимального набора постулатов. Физики всегда предпочитают иметь дело с минимальным количеством простых аксиом. Любая теория, содержащая больше постулатов, чем это необходимо, неэlegantна. Эlegantная теория выражается небольшим количеством простых уравнений. Длинные и сложные уравнения с большим количеством запутанных переменных являются признаком неэlegantности теории и намекают на то, что существует более простой путь.

Откуда берётся эта эстетика простоты<sup>1</sup>? Очевидно, что способность получения удовольствия от изящного решения задачи не является уделом одних только физиков, математиков и инженеров. Мой отец был

<sup>1</sup> Эти рассуждения применимы только к инженерным, математическим и физическим критериям простоты. Я не могу судить о простоте и сложности в музыке, поэзии или любом другом виде искусства.



сантехником с пятью классами образования, но он получал удовольствие от симметрии и геометрии совершенной водопроводной системы. Он испытывал профессиональную гордость, видя грамотно спроектированную систему с минимальным количеством труб и соединений, в которой идеально прямые трубы не нарушали геометрическую эстетику параллельных линий, прямых углов и симметрии. И причиной тому служили вовсе не деньги, которые он мог сэкономить, минимизируя количество использованных материалов: его чувство удовлетворения от гениальной простоты и элегантной геометрии водопровода ничем не отличалось от моего чувства гордости за аккуратно написанное уравнение.

Ещё одно свойство теории, особенно высоко ценимое физиками-теоретиками, — это однозначность. Что же является критерием однозначности теории? Во-первых, она не должна содержать никакой неопределённости в своих предсказаниях. Теория может предсказывать всё, что она способна предсказать, и ничего более. А во-вторых, теория должна быть, по выражению Стивена Вайнберга, «окончательной теорией». Она должна порождать особое чувство неизбежности — её предмет может быть описан только так и никак иначе. Самая лучшая теория должна быть не только теорией всего, но она должна быть *единственно возможной* теорией всего.

Комбинация элегантности, однозначности и возможности ответить на все вопросы, на которые только возможно ответить, делает теорию красивой. Однако я думаю, что физики в основном согласятся, что теория, удовлетворяющая всем перечисленным критериям, пока не создана и не следует ожидать, что окончательная теория природы будет совершенством красоты.

Если вы попросите физиков ранжировать теории по их эстетической привлекательности, то чистым победителем окажется общая теория относительности. Идея Эйнштейна основывается на элементарном факте, относящемся к гравитации, понятном даже ребёнку: сила тяжести ощущается нами точно так же, как и сила инерции. Эйнштейн предложил мысленный эксперимент в воображаемом лифте. Согласно Эйнштейну, человек, находящийся внутри лифта, не способен отличить эффекты, вызванные притяжением Земли, от эффектов, вызванных ускоренным движением лифта. Любой, кто пользовался скоростным

, помнит ощущение увеличивающейся тяжести при движении лифта вверх и ощущение уменьшения собственного веса, когда движущийся вверх лифт начинает замедляться. Эйнштейн вывел из этого простого наблюдения один из наиболее фундаментальных физических принципов — принцип эквивалентности между гравитацией и инерцией, или просто *принцип эквивалентности*. Из этого принципа следуют правила, описывающие все явления, связанные с гравитационным полем, а также уравнения неевклидовой геометрии пространства-времени. Вся теория записывается несколькими уравнениями — уравнениями Эйнштейна. Я нахожу это красивым.

Теория Эйнштейна подводит нас к ещё одному аспекту красоты для физиков. Я считаю красивым не только окончательный вид теории относительности, созданной Эйнштейном, но и тот путь, которым он пришёл к созданию своей теории, — путь, который начался с мысленного эксперимента, понятного даже ребёнку. А ещё я слышал от физиков утверждения, что если бы Эйнштейн не создал общую теорию относительности, то они или кто-либо ещё вскоре создали бы её в более современном, более технически совершенном виде. Но на мой взгляд, их теория была бы не столь эlegantна.

Интересно сравнить два возможных пути, которыми можно прийти к уравнениям Эйнштейна. В альтернативной истории физики могли бы построить теорию гравитации тем же способом, которым была построена электродинамика Максвелла. Теория Максвелла содержит восемь уравнений, решения которых описывают электромагнитные волны. Из этих же уравнений можно получить и обычные силы, действующие между магнитами и электрическими зарядами. Источником вдохновения для теоретиков послужили бы не физические явления, а система уравнений. Отправной точкой могло бы стать уравнение для гравитационных волн, аналогичное по форме уравнению, описывающему световые или звуковые волны<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Уравнения, описывающие распространение возмущений электромагнитного поля, очень похожи на уравнения, описывающие распространение звуковых волн, представляющих собой возмущения плотности среды, или на уравнения, описывающие распространение волны вдоль натянутой струны или верёвки. Все они носят общее название: волновые уравнения.

Подобно тому как свет излучается колеблющимся зарядом или звук — вибрирующим камертоном, гравитационные волны генерируются быстро движущимися массами. Несмотря на то что описывающие распространение гравитационных волн уравнения математически согласованны, при попытке описать взаимодействие этих волн с массивными телами возникает несогласованность, не встречающаяся в теории Максвелла. Упорные теоретики попытались бы устранить несогласованность, изменяя уравнения и добавляя в них новые члены. В конце концов им бы удалось сделать ряд последовательных приближений, каждое следующее лучше предыдущего, но на каждом этапе уравнения всё равно оставались бы несогласованными.

Согласованности удалось бы добиться только путём введения бесконечного числа членов. А самое главное, что после учёта всех дополнительных членов результат оказался бы эквивалентным уравнениям Эйнштейна! Серия последовательных приближений привела бы нас к окончательной теории, которая оказалась бы эквивалентной общей теории относительности. Размышлять об ускорении лифта не потребовалось бы. Достаточно было бы соединить требование математической согласованности с методом последовательных приближений. Кое-кто назвал бы такой путь элегантным, но вряд ли можно назвать его простым.

Чтобы показать элегантность уравнений, я напишу их в том удивительно простом виде, в котором их вывел Эйнштейн.

$$R_{mn} - \frac{1}{2}g_{mn} R = T_{mn}$$

Этот маленький прямоугольник с несколькими простыми символами содержит в себе все гравитационные явления: падающие камни, движение Луны и Земли, образование галактик и даже расширение Вселенной.

Подход, защищаемый модернистами, хотя и приводит к тому же самому результату, требует бесконечного количества последовательных приближений, и полученные ими уравнения выглядят совершенно неэлегантно.

Тем не менее я вынужден признать, что хотя «современный вывод» проигрывает в элегантности уравнениям Эйнштейна, он демонстрирует одну очень важную вещь, а именно однозначность теории. На каждом шаге аппроксимации новые члены, добавляемые для устранения несогласованности, однозначно определены, что означает, что и вся теория в целом однозначна: она не только описывает гравитацию, но и показывает, что это не может быть сделано другим способом.

Теория Эйнштейна также необычайно мощна. Она способна описать с высокой точностью широкий круг гравитационных явлений — от тяготения, удерживающего нас на поверхности Земли, до формирования чёрных дыр в центрах квазаров и гравитационных волн, возникающих в результате космических катастроф, таких как столкновения чёрных дыр. Элегантные уравнения, элемент однозначности и способность описать множество явлений делают общую теорию относительности красивой физической теорией из всех когда-либо созданных. Но как мы уже увидели, не только содержание теории — то, что она говорит нам о мире, — делает её красивой, но и форма, в которой записаны уравнения, и даже рассуждения, которые привели к её созданию.

Если победу на физическом конкурсе красоты одержала общая теория относительности, то приз за самое ужасное лицо достаётся ядерной физике. Ужасность ядерной физики не в том, что она лежит в основе кошмарных ядерных реакторов и грибообразных облаков. Это всё технология, а не физика. Ужас в том, что законы ядерной физики, во-первых, не понятны, а во-вторых, не лаконичны. Как результат мы не имеем ни элегантных уравнений, позволяющих ухватить суть, ни простых рассуждений, позволяющих выводить новые правила. Если бы правила гласили, что протоны и нейтроны притягивают друг друга с силой, подчиняющейся простому закону, то теория была бы элегантной, как атомная физика. Как и в случае ревизионистской теории относительности, каждое новое приближение к истине оказывается не окончательным. Однако вместо апеллирования к математической согласованности в теорию постоянно добавляются новые частные «правила большого пальца»<sup>1</sup> для приведения теории в соответствие с экс-

<sup>1</sup> Общее практическое указание (а не строгое правило), которое действует в большинстве ситуаций и основано на опыте. — *Примеч. пер.*

периментальными данными. Кроме того, эти правила большого пальца работают для одних ядер и не работают для других. Теория несёт на себе груз различных аппроксимаций, выведенных методом проб и ошибок, но, в отличие от ситуации с общей теорией относительности, этот груз не добавляет теории ни простоты, ни однозначности, ни признания. Большинство теоретиков соглашаются с тем, что уравнения ядерной физики не выглядят элегантными и их логика неполна.

Некоторые физики утверждают, что химия тоже не блещет красотой. Она полна узкоспециализированных рецептов, которые не отличаются универсальностью. Первые несколько строк периодической таблицы Менделеева выглядят достаточно просто, но по мере продвижения вниз по таблице приходится добавлять всё больше и больше новых правил. Правила, описывающие молекулярные соединения, являются приблизительными и содержат множество исключений. В одних случаях химия правильно предсказывает свойства соединений, в других — нет. Всякий раз, когда физики хотят дискредитировать какую-нибудь теорию за немотивированность или сложность, они сравнивают её с химией или, что ещё хуже, с поваренной книгой химика.

В ответ химики заявляют, что физика скучна и однообразна, а вот химия является дисциплиной, описывающей красоту и разнообразие окружающего мира, ведь прекрасный цветок — это в конечном счёте не что иное, как совокупность химических реакций. И это добавляет химическим реакциям эстетическую ценность<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Видимо, не все согласны с Уолтом Уитменом, написавшим:

«Когда я слушал учёного астронома  
И он выводил предо мною целые столбцы мудрых цифр  
И показывал небесные карты, диаграммы для измерения звёзд,  
Я сидел в аудитории и слушал его, и все рукоплескали ему,  
Но скоро — я и сам не пойму отчего — мне стало так нудно и скучно,  
И как я был счастлив, когда выскользнул прочь и в полном  
молчании зашагал одинокий  
Среди влажной таинственной ночи  
И взглядывал порою на звёзды».

(Перевод К. Чуковского)

Лично я предпочитаю эпитафию Ньютону от Александра Поупа:

«Был этот мир извечной тьмой окутан:  
"Да будет свет!" — И вот явился Ньютон».

Многие физики и химики находят красоту в том способе, которым очень простые объекты, такие как атомы, соединяются в сложные макроскопические узоры. Для таких явлений, наблюдаемых только благодаря коллективному поведению большого числа объектов, в данном случае — атомов, существует специальное название: *эмерджентность*. Эти коллективные явления можно вывести из законов поведения отдельных членов: например, одним из таких *эмерджентных* явлений, вытекающих из свойств молекулярных соединений, является жизнь. Другим примером эмерджентных явлений является образование снежинок или рост кристаллов. Ещё один пример коллективного поведения атомов, приводящего к способности двигаться без трения, — сверхтекучесть. Это так называемая эмерджентная красота.

Что ж, красота такого типа имеет столько же прав на существование, как и красота эlegantных физических законов. Но я говорю о другой красоте. Физики, изучающие элементарные частицы, ищут красоту в основных законах и уравнениях. Большинство из них обладают своего рода квазирелигиозной верой в богов простоты и однозначности. Насколько я могу судить, они считают, что в «самом низу всего» лежит красивая теория, один однозначный, мощный и общепризнанный набор уравнений, описывающих все явления, по крайней мере принципиально — даже если эти уравнения окажется слишком трудно решить. Эти главные уравнения должны быть простыми и симметричными. Проще говоря, простота означает, что уравнения можно записать в рамке такого размера.



Но прежде всего эти уравнения должны однозначно предсказывать Законы Физики, которые были установлены за последние несколько веков, в том числе и Стандартную модель физики элементарных частиц, список элементарных частиц, их массы, константы связи и силы взаимодействия. И не допускать возможности никаких других альтернативных правил.

## Происхождение мифов

Миф об однозначности и элегантности, вероятно, унаследован нами от древнегреческих интеллектуалов. Пифагор и Евклид верили в мистическую математическую гармонию Вселенной. Пифагор считал, что мир функционирует согласно математическим принципам, аналогичным тем, на которых построена музыка. Хотя связь между музыкой и физикой может показаться нам наивной и даже глупой, в пифагорейской вере нетрудно увидеть всё ту же любовь к симметрии и простоте, которая так вдохновляет современных физиков.

Евклидова геометрия имеет строгий эстетический вкус. Доказательства просты и элегантны, а количество аксиом минимально. Евклиду не понадобилось ничего, кроме пяти аксиом. Его геометрия обычно считается разделом математики, но древние греки не делали различий между математикой и физикой. Для них евклидова геометрия была теорией, описывающей реальный физический мир. Они могли не только доказывать теоремы, но и измерять свойства реального пространства, и результаты измерений обязательно (по словам древних греков) согласовывались с предсказаниями теорем. Например, если нарисовать треугольник с помощью карандаша и линейки, а затем измерить транспортиром три внутренних угла, то их сумма окажется равна 180 градусам — в полном согласии с одной из теорем. Греки верили, что любой реальный треугольник, построенный в реальном пространстве, обязательно согласуется с теоремой о сумме углов треугольника. Исходя из этого они делали определённые заявления о физическом мире, которые считали не только истинными, но и однозначными. Реальное пространство, как утверждали греки, соответствует аксиомам Евклида, и кроме такого пространства другого быть не может. По крайней мере, они так думали.

Позже Платон и Аристотель добавили особенный эстетический элемент в законы астрономии. Окружность была для них совершенной фигурой. Все точки окружности находятся на одинаковом расстоянии от центра, что придаёт окружности совершенную симметрию: ни одна другая фигура не обладает такой симметрией. Поэтому Платон, Аристотель и их последователи верили, что никакая другая фигура, кроме окружности, не может описывать движения планет. Они верили, что



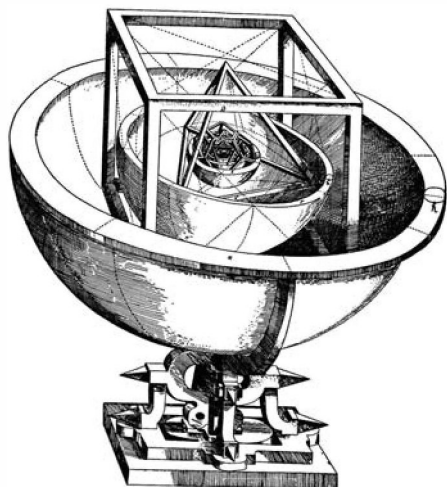
небеса сделаны из совершенных кристаллов, абсолютно прозрачны, идеально сферичны и вращаются с прецизионной точностью. Для них мир был устроен так и никак иначе.

Такая же элегантная теория была у греков и для земных явлений — она в чём-то напоминала воплощение мечты современных физиков о единой теории. Греки верили, что всё вокруг состоит из четырёх элементов: земли, воздуха, воды и огня. Каждый элемент занимает присущее ему место и стремится достичь этого места. Огонь лёгкий и поэтому стремится вверх. Земля, будучи самым тяжёлым элементом, стремится занять самое нижнее положение. Вода и воздух занимают места где-то между землёй и огнём. Четыре элемента и один динамический принцип: вы удивитесь, узнав сколько явлений можно объяснить при помощи такого набора. Единственное, что отсутствует в этой теории, — однозначность. Я не вижу, почему список четырёх основных элементов не может быть дополнен, скажем, красным вином, сыром и чесноком.

Средневековые астрономы, алхимики и химики бросили вызов греческой картине мира. Кеплер сбросил окружности, описывающие орбиты планет, с пьедестала, заменив их более сложными и менее симметричными эллипсами. Но Кеплер также верил в пифагорейскую математическую гармонию. В его времена были известны только пять больших планет: Венера, Марс, Юпитер, Сатурн и, разумеется, Земля. Кеплер был глубоко впечатлён тем фактом, что геометрия допускает существование только пяти правильных многогранников, пяти платоновых тел: тетраэдра, октаэдра, куба, икосаэдра и додекаэдра<sup>1</sup>. И он не устоял перед соблазном связать пять планет с пятью платоновыми телами и построил модель Вселенной, состоящую из пяти вложенных друг в друга правильных многогранников, с целью объяснить значения расстояний между Солнцем и планетами с помощью геометрических соотношений. Я не уверен, можно ли считать такую теорию элегантной, но она безусловно однозначна: существуют только пять платоновых тел, привязанных к пяти планетам. Хотя, с физической точки зрения, эта теория была, конечно же, полной ерундой.

<sup>1</sup> Правильным многогранником называется многогранник, все грани которого образованы одинаковыми правильными многоугольниками. Грани тетраэдра, октаэдра и икосаэдра образованы равносторонними треугольниками, грани куба — квадратами, а грани додекаэдра — пятиугольниками.





В то же самое время алхимики вынуждены были признать, что в природе существует гораздо больше четырёх элементов. К концу XIX столетия химики открыли уже почти сотню химических элементов, и природа потеряла часть своей красоты. Периодическая система внесла в химию некоторый порядок, но и он далёк от той простоты и однозначности, которые обеспечивала древнегреческая метафизика.

Но затем, в начале XX века, Бор, Гейзенберг и Шрёдингер открыли принципы квантовой механики и атомной физики, что позволило подвести под химию строгую теоретическую базу. Число фундаментальных элементов природы снова сократилось до четырёх, только теперь это были не древнегреческие вода, земля, огонь и воздух, а уже знакомые нам фотон, электрон, протон и нейтрон. Все свойства химических элементов теперь можно было (по крайней мере, в теории) вывести из свойств четырёх элементарных частиц. Простота, элегантность и однозначность снова оказались в наших руках. Основные принципы теории относительности и квантовой механики в сочетании с четырьмя элементами материи позволяли объяснить любые сколь угодно сложные химические реакции — лишь бы только нам хватило вычислительных мощностей для решения соответствующих уравнений. Наука оказалась очень близко к идеалу, к которому так стремились физики.

Но увы, не тут-то было. Новые элементарные частицы стали открываться оптовыми партиями: нейтрино, мюоны, так называемые странные частицы, мезоны и гипероны — ни одной из этих частиц не находилось места в простом порядке вещей. Они не играли существенной роли в описании материи, но факт их существования мучил воду. Физикам 1960-х годов уже не хватало латинских и греческих букв для обозначения новых элементарных частиц. Будучи молодым физиком, лелеявшим надежду найти красоту и элегантность в законах природы, я вместо этого находил удручающий беспорядок в моей любимой науке.

В 1970-х наконец-то забрезжил луч надежды. Вместо протонов, нейтронов и мезонов на роль элементарных частиц были назначены кварки, и одна квантовая теория поля, называемая квантовой хромодинамикой (или, сокращённо, КХД), смогла объяснить все свойства протонов, нейтронов, мезонов, атомных ядер и менее известных странных частиц (частиц, в состав которых входят странные кварки). Число основных элементов природы снова существенно сократилось. В то же время появилась возможность представить электроны и нейтрино как частицы-близнецы, связанные глубокой симметрией. В перетягивании научного каната снова начала побеждать команда простоты. Наконец, к середине 1970-х годов полностью сформировалась Стандартная модель, претендующая на описание всех известных явлений (по крайней мере, так утверждается), но при этом она содержала около 30 свободных параметров. Короче, состязание между элегантностью и неуклюжестью продолжается, и перспективы каждой из команд на окончательную победу пока туманны.

## Теория струн и развенчание мифа

Перейдём к теории струн. Красива она, как утверждают её сторонники, или уродлива, как считают критики? Прежде чем обсуждать эстетическую сторону теории струн, позвольте вкратце рассказать, зачем она вообще нам понадобилась. Если, как я уже говорил, Стандартная модель описывает все известные явления, зачем теоретикам понадобилось лезть дальше в математические дебри? Должен признаться, что

Стандартная модель описывает не все известные явления. В частности, она не описывает гравитацию. Гравитация является самой привычной нам силой, с ней мы сталкиваемся ежедневно, и, вероятно, гравитация также является самой фундаментальной силой во Вселенной. И вот представьте: для гравитации не нашлось места в Стандартной модели. Гравитон (квант гравитационного поля) не включён в список частиц Стандартной модели. Чёрным дырам — возможно, самым интересным объектам во Вселенной — не нашлось места в теории. И хотя классическая теория гравитации Эйнштейна является самой красивой из всех теорий, пока не видно способа втиснуть её в квантовый мир.

В большинстве случаев гравитация не играет никакой роли в физике элементарных частиц. Как мы увидим далее, гравитационное взаимодействие между двумя кварками на много порядков слабее всех других фундаментальных сил природы. Гравитация слишком слаба, чтобы играть сколько-нибудь заметную роль в экспериментах с элементарными частицами в обозримом будущем. Именно поэтому физики, изучающие элементарные частицы, традиционно игнорируют гравитационные эффекты.

Но существуют две причины стремиться к более глубокому пониманию связи между гравитацией и микроскопическим квантовым миром. Первая причина связана со строением элементарных частиц. Хотя гравитационное взаимодействие между электронами в атомах или между кварками в протонах пренебрежимо мало, оно может стать существенным на более малых расстояниях. Все силы растут с уменьшением расстояния, но гравитация растёт быстрее других. На планковских расстояниях гравитационное взаимодействие становится не только сильнее электромагнитного, но даже сильнее взаимодействия между кварками. Если парадигма «матрёшки» (все вещи состоят из ещё более мелких вещей) справедлива для любых расстояний, то вполне может оказаться, что обычные элементарные частицы состоят из ещё более мелких частиц, связанных вместе силой гравитации.

Вторая причина глубже понять связь между гравитацией и квантовой теорией имеет отношение к космологии. В следующей главе мы увидим, как гравитация управляет расширением Вселенной. Когда Вселенная была молодой и расширялась с умопомрачительной скоро-

стью, гравитация и квантовая механика вносили в этот процесс сравнимые по величине вклады. Отсутствие понимания связи между этими двумя величайшими теориями подрывает наши усилия добраться в изучении Вселенной до начала Большого взрыва.

Но есть и третья причина, толкающая физиков к объединению квантовой механики и общей теории относительности, — эстетическая. Для физиков, в отличие от поэтов, величайшее преступление против эстетики — несогласованность. Несогласованность теории является вопиющим посягательством на те общезначимые ценности, которыми мы дорожим, даже более вопиющим, чем уродливость теории. А на протяжении всего XX столетия гравитация и квантовая механика оставались несогласованными.

И вот пришла теория струн. Мы не станем вдаваться в детали теории струн до седьмой главы, но сейчас я должен сказать, что теория струн — это именно та теория, которая последовательно объединяет гравитацию и квантовую механику. Многие теоретики, в число которых вхожу и я, имеют сильное предчувствие, что теория струн — наша единственная надежда примирить эти два столпа современной физики. Что же в теории струн заставляет нас испытывать подобное предчувствие? Мы испробовали множество других подходов, но эти попытки терпели фиаско в самом начале. Например, была попытка построить на основе общей теории относительности квантовую теорию поля. Математики быстро обнаружили её несогласованность. Кроме того, даже если и удавалось написать осмысленные уравнения, они оставляли чувство эстетической неудовлетворённости. В каждой такой попытке гравитация оказывалась чужеродной добавкой, то есть гравитационное взаимодействие просто добавлялось в уже существующую теорию, например в квантовую электродинамику. Неудивительно, что подобные попытки терпели неудачу. Но теория струн — совершенно другая. Сосуществование квантовой механики и теории гравитации является абсолютно неизбежным условием математической согласованности. Теория струн *единственная* из всех создаёт впечатление настоящей теории квантовой гравитации. Это не мелочь, учитывая, что два гиганта — Общая теория относительности и квантовая механика — были в состоянии войны друг с другом большую часть XX века. Я бы сказал, что эта неизбежность прекрасна.

Помимо тесной связи с гравитацией, теория струн на первый взгляд обеспечивает и связь с обычной физикой элементарных частиц. Хотя мы и не понимаем, как именно Стандартная модель может быть включена в теорию струн, у последней есть все элементы, входящие в современную теорию элементарных частиц. Теория струн содержит частицы — фермионы и бозоны, — которые напоминают электроны, кварки, фотоны, глюоны и т. п. Помимо гравитационной силы, она описывает и силы, похожие на электромагнитные, и даже силы, аналогичные тем, что связывают кварки в протоны и нейтроны. А главное, ни один из этих элементов не вносится в теорию извне, так сказать, вручную: как гравитация, все они являются неизбежными математическими следствиями теории.

Следует отметить, что все следствия теории струн разворачиваются математически последовательным образом. С другой стороны, теория струн является очень сложной математической теорией и несёт с собой огромное количество возможностей потерпеть фиаско. Я имею в виду возможные внутренние несогласованности. Это как огромная, очень точная машина, состоящая из тысяч деталей. Если хотя бы одна деталь не подходит к остальным идеальным образом, машина остановится. Но детали подогнаны друг к другу порой вследствие настоящих математических чудес. Теория струн — это не только физическая теория, но и очень сложная математическая конструкция, послужившая источником вдохновения для целой армии чистых математиков.

Но красива ли теория струн? Удовлетворяет ли теория струн стандартам элегантности и однозначности, накладываемым физикой? Содержит ли она мало уравнений и просты ли они? И самое главное: однозначны ли Законы Физики, к которым приводит теория струн?

Элегантность требует, чтобы количество определяющих уравнений было невелико. Пять лучше, чем десять, а одно лучше, чем пять. В этом отношении теория струн является просто воплощением элегантности. За все годы развития теории струн ещё никому не удалось написать ни одного определяющего уравнения! Их количество в настоящее время равно нулю. Мы не только не знаем, каковы фундаментальные уравнения теории струн, но даже не знаем, существуют ли они вообще.

Но, в таком случае, какая же это теория, если она не имеет набора определяющих уравнений? На этот вопрос пока нет ответа.

Что касается второго вопроса — об однозначности Законов Физики, вытекающих из теории струн, — то здесь мы можем быть более определёнными. Несмотря на то что никто ещё не написал ни одного определяющего уравнения, методы теории являются очень строгими. Теория могла бы не выдержать множества математических проверок, но этого не произошло. Считается, что очень жёсткие математические ограничения приведут либо к полностью однозначной теории, либо, в крайнем случае, к теории, содержащей очень небольшое количество неоднозначностей.

В середине 1980-х годов среди струнных теоретиков царила эйфория: они считали, что напали на след, ведущий к окончательному ответу, к единой однозначной теории, способной объяснить, почему мир таков, как он есть. Верилось и в то, что глубинные и зачастую чудесные математические свойства теории гарантируют точное равенство нулю космологической постоянной.

Эпицентром событий являлся Институт перспективных исследований в Принстоне, служивший одно время домом Альберту Эйнштейну и Роберту Оппергеймеру и известный своей суперинтеллектуальной рафинированной атмосферой. А в самом центре центра эпицентра находились величайшие в мире матфизики во главе с Эдвардом Виттеном, семимильными шагами приближавшиеся к однозначному ответу. Так было когда-то.

Сегодня мы знаем, что успех, который «ждал нас за поворотом», оказался миражом. После того как мы лучше узнали теорию струн, случились три несчастья.

Несчастье номер один состояло в том, что постоянно открывающиеся новые возможности требовали постоянных математических усовершенствований, для того чтобы теория оставалась однозначной. В течение 1990-х годов количество новых вариантов описываемых теорией миров росло экспоненциально. Струнные теоретики с ужасом взирали на разворачивающийся перед ними грандиозный Ландшафт с огромным количеством долин, в которых можно было обнаружить какие угодно условия.

Несчастьем номер два стала тенденция теории порождать машины Руба Голдберга. В поиске подходящего ландшафта для Стандартной модели создавались конструкции невероятной сложности. По мере учёта всех требований в теорию приходилось добавлять всё больше и больше «движущихся частей», и теперь кажется, что ни одна из созданных моделей реальности не смогла бы получить одобрение Американского инженерного общества — в первую очередь это касается элегантности конструкции.

И наконец, последним ударом по большому месту стало то, что все потенциальные кандидаты на вакуум, подобный тому, в котором мы живём, содержали ненулевую космологическую постоянную. Надежда на какой-нибудь очередной волшебный математический фокус, гарантирующий нулевое значение космологической постоянной, начала быстро таять.

Если судить по обычным критериям однозначности и элегантности, то теория струн превратилась из красавицы в чудовище. И тем не менее чем больше я размышляю об этой печальной истории, тем больше у меня появляется оснований полагать, что теория струн всё же является тем ответом, который мы ищем.

## Элегантна ли природа?

Величайшая трагедия науки — убийство красивой гипотезы уродливым фактом.

— Томас Генри Хаксли

Теория струн не испытывает недостатка во врагах, которые скажут, что это чудовищное извращение. Среди них теоретики, занимающиеся конденсированными средами, считающие, что правильная теория — это теория, содержащая *эмерджентность*, или *возникновение*. Физика конденсированных сред изучает свойства обычного вещества, находящегося в твёрдом, жидком или газообразном состоянии. Согласно этой школе, пространство и время *возникают* из неких микроскопических объектов так же, как кристаллическая решётка или сверхтекучесть воз-



, мир мог возникнуть из настолько широкого набора начальных микроскопических условий, что нет никакого смысла пытаться идентифицировать конкретную микроскопическую деталь, которая привела к его возникновению. Вместо этого, говорят они, следует попытаться понять правила и механизмы самой эмерджентности. Другими словами, следует изучать физику конденсированных сред.

Проблема в том, что у нас не существует такой конденсированной среды, которая вела бы себя подобно Вселенной, управляемой квантовой механикой и общей теорией относительности. Позже, в главе 10, мы познакомимся с *голографическим принципом* и увидим, что точка зрения физиков конденсированных сред имеет право на существование. Гипотеза о том, что существует множество микроскопических отправных точек, которые могут привести к возникновению мира с гравитацией, может оказаться верной, но исходное состояние Вселенной не имеет ничего общего с обычным веществом, которое является предметом изучения физики конденсированных сред.

Ещё одним источником критики являются некоторые (конечно, не все) учёные, работающие в области высокоэнергетической экспериментальной физики, которых раздражает, что новые явления, описываемые теорией струн, слишком далеки от реального эксперимента — как будто бы теоретики в этом виноваты... Эти физики обеспокоены тем, что они не видят перспективы: смогут ли их эксперименты когда-нибудь дать ответы на вопросы, которые ставят струнные теоретики. Они считают, что теоретикам следует заниматься задачами, экспериментальная проверка которых стоит на повестке дня в ближайшем будущем. Это чрезвычайно близорукий взгляд. В нынешний век физики высоких энергий эксперименты стали настолько громоздкими и сложными, что порой постановка одного опыта может затянуться на десятилетие. Блестящие молодые физики-теоретики похожи на безумных учёных. Они рвутся в неизведанное, влекомые любопытством. И если они выходят в огромное море неизвестного, то пожелаем им семь футов под килем.



Большинство же по-настоящему хороших физиков-экспериментаторов не уделяют большого внимания тому, что думают теоретики. Они строят те экспериментальные установки, которые в состоянии построить, и ставят те эксперименты, которые в состоянии поставить. А в свою очередь большинство по-настоящему хороших теоретиков не уделяют большого внимания тому, что думают экспериментаторы. Они строят свои теории, основываясь на своей интуиции, и идут туда, куда их ведёт их интуиция. И те и другие надеются, что когда-нибудь их пути пересекутся, но о том, когда и как это произойдёт, можно только догадываться.

Наконец, есть и сторонники других теорий. По-другому и быть не может. Необходимо исследовать все возможные пути к истине, но, насколько я могу судить, ни одна из этих теорий не разработана достаточно хорошо. На текущий момент — это всё, что я могу о них сказать.

Зато чего я никогда не слышал, так это критики теории струн, обвинявшей бы её в крайней неэлегантности или существенной неоднозначности<sup>1</sup>. А между тем любое из этих обвинений могло быть совершенно правомерно брошено струнным теоретикам как свидетельство того, что их надежды на создание хорошей теории беспочвенны. Но, по-видимому, до последнего времени они слишком хорошо маскировали эту ахиллесову пяту своей теории. Я подозреваю, что теперь, когда она стала достоянием широкой научной общественности, в том числе и благодаря моим собственным лекциям и сочинениям, зануды в кулуарах начнут, ухмыляясь, заявлять во всеуслышание: «Ага! Мы давно это знали! Теория струн мертва».

Моё собственное предположение состоит в том, что неэлегантность и неоднозначность теории в конечном итоге следует рассматривать как её сильные стороны. Честный и непредвзятый взгляд на реальный мир не предполагает математического минимализма. Вот список масс элементарных частиц, входящих в Стандартную модель, выраженных в массах электрона. Все значения приблизительные.

---

<sup>1</sup> Это замечание было написано весной 1994 года, но уже год спустя, когда я закончил работу над «Космическим ландшафтом», стервятники несколько потихли.

Частица	Масса
Фотон	0
Глюон	0
Нейтрино	менее $10^{-8}$ , но не ноль
Электрон	1
u-кварк	8
d-кварк	16
Мюон	207
s-кварк	293
c-кварк	2900
Тау-лептон	3447
b-кварк	9200
W-бозон	157 000
Z-бозон	178 000
t-кварк	344 000

Мы не видим никакой очевидной закономерности кроме той, что массы увеличиваются по мере того, как мы спускаемся вниз по списку.

Числа не выглядят связанными ни с какими математическими константами типа  $\pi$  или квадратного корня из двух. Единственная наблюдаемая закономерность возникает исключительно из-за того, что я намеренно отсортировал частицы в порядке возрастания масс.

Эта дюжина с небольшим чисел является лишь верхушкой айсберга. Мы знаем со всей определённой, что Стандартная модель включает ещё как минимум 20 дополнительных независимых констант, отвечающих за разнообразные взаимодействия, что противоречит утверждению о простоте модели. И даже этот список далеко не исчерпывающий: в мире гораздо больше частиц и констант, чем в списке Стандартной модели. Теория гравитация и космология добавляют нам ещё ряд констант типа масс частиц, из которых состоит тёмная материя<sup>1</sup>. По мне-

<sup>1</sup> О тёмной материи пойдёт речь в главе 5.

нию физиков, особенно тех, кто ожидает открытия суперсимметрии, общее число фундаментальных констант должно превышать сотню, и никто не в состоянии придумать, как связать эти константы между собой. Весьма далёкие от эталона простоты и элегантности теоретические конструкции, время от времени создаваемые физиками для объяснения фундаментальных свойств природы, выглядят карикатурными сооружениями Руба Голдберга.

Несмотря на то что Стандартная модель является огромным шагом вперёд в объяснении свойств элементарных частиц, она не объясняет сама себя. Она довольно сложна, далеко не однозначна и, конечно же, неполна. Что же тогда особенного в нашей любимой Стандартной модели? Абсолютно ничего. Правда, есть одна особенность, отличающая Стандартную модель от  $10^{500}$  других возможных моделей: она допускает, а может быть, даже поощряет существование жизни.

Космологи не настолько заражены вирусом элегантности и однозначности, как струнные теоретики, возможно, потому, что они предпочитают смотреть на природу через объективы своих телескопов, а не сквозь дебри математических уравнений. Вот веночек замечательных совпадений, отмечаемых некоторыми из них.

- ◆ Вселенная — это тонко настроенный инструмент. Она расширялась с идеальной скоростью. Если бы её расширение было чересчур стремительным, то вещество рассеялось бы в огромном объёме, прежде чем получило бы шанс сформировать галактики, звёзды и планеты. С другой стороны, если бы расширение было медленным, то первоначального импульса не хватило бы для достижения Вселенной нынешних размеров и она схлопнулась бы обратно, как лопнувший воздушный шарик.
- ◆ Ранняя Вселенная была не слишком фрагментированной и не слишком однородной. Она имела нужную консистенцию, как правильно приготовленная овсянка. Если бы в начале своего существования Вселенная была более комковатой, то водород и гелий сконденсировались бы не в галактики, а в чёрные дыры. Вся материя упала бы в эти чёрные дыры и была бы похоронена под их горизонтами. С другой стороны, если бы ранняя Вселенная была слишком гладкой, в ней бы вообще не образовались неоднородности. Мир галактик, звёзд и планет не является закономерным результатом физических

процессов в ранней Вселенной. Он представляет собой очень редкое и счастливое исключение.

- ◆ Гравитация достаточно сильна, чтобы удерживать нас на поверхности Земли, однако не настолько сильна, чтобы создать избыточное давление в недрах звёзд, в результате чего те сгорали бы за несколько миллионов лет, а не за миллиарды, необходимые для возникновения жизни и эволюции, приводящей к возникновению разума.
- ◆ Микроскопические Законы Физики как будто специально подобраны таким образом, чтобы допускать существование атомных ядер и атомов, из которых построены гигантские молекулы живой материи. Кроме того, эти законы настроены так, чтобы углерод, кислород и другие необходимые для построения жизни элементы могли синтезироваться в недрах первого поколения звёзд и затем в результате взрывов сверхновых выбрасываться в космическое пространство.

Основные настройки природы выглядят слишком хорошо, чтобы быть правдой. Вместо того чтобы следовать эталонам математической простоты и элегантности, законы природы подобраны в первую очередь так, чтобы обеспечивать наше собственное существование. Как я уже неоднократно говорил, физики ненавидят эту идею. Но как мы увидим позже, теория струн представляется идеальной для объяснения, почему мир устроен таким образом.

Теперь можно вернуться к сложным научным вопросам. В следующей главе я расскажу об удивительных (удивительные — это даже слабо сказано) космологических исследованиях, которые заставили физиков и космологов прийти к новой парадигме. В первую очередь я расскажу о том, что мы узнали о самой ранней истории нашей Вселенной, как она пришла к своему нынешнему нестабильному состоянию, и открою вам шокирующие факты, касающиеся 120-го десятичного знака космологической постоянной.



## Глава 5

# ГРОМ С НЕБЕС

Я поражаюсь людям, которые хотят познать Вселенную, но при этом не способны найти дорогу вокруг Чайна-тауна.

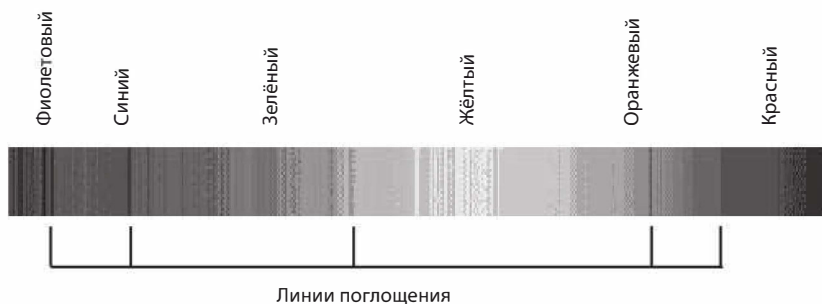
— Вуди Аллен

## Вселенная Александра Фридмана

Упоминание одна тысяча девятьсот двадцать девятого года заставляет вздрагивать тех, кто достаточно стар, чтобы помнить рушащиеся один за другим банки, эпидемию самоубийств на Уолл-стрит, крах ипотечного кредитования, безработицу. Это была Великая депрессия. Но не всё было плохо в этом году. В то время как фондовый рынок лопнул, как проткнутый воздушный шарик, в солнечной Калифорнии Эдвин Хаббл открыл *Большой взрыв* — взрыв, из которого родилась вся известная нам Вселенная. Вопреки тому, что ещё в 1917 году предполагал Эйнштейн, Вселенная меняется и расширяется со временем. По данным Хаббла выходило, что все далёкие галактики разбегаются от нас, как если бы они были выстрелены из гигантской пушки, способной стрелять во всех направлениях и из каждого места пространства одновременно. Хаббл обнаружил, что Вселенная не просто меняется, она расширяется, как надувающийся шар.

Хаббл использовал для измерения движения галактик давно известную технику. Свет от галактики направлялся в спектроскоп, который разлагал его в спектр. Исаак Ньютон делал то же самое ещё в XVII веке, пропуская солнечный свет через треугольную призму. Призма — это простейший спектроскоп, разлагающий солнечный свет на все цвета радуги. Ньютон справедливо заключил, что белый свет представляет собой совокупность красного, оранжевого, жёлтого, зелёного, голубого, синего и фиолетового цветов. Сегодня мы знаем, что каждому цвету спектра соответствует свет определённой длины волны.

Если внимательно посмотреть на спектр света звезды, то можно увидеть тонкие тёмные *спектральные линии*, расположенные поперёк радужной полоски.



Эти таинственные линии — более тёмные, чем остальной спектр, — называются *линиями поглощения*. Они указывают на то, что где-то между нами и источником света находится что-то, что поглощает свет строго определённой длины волны, не оказывая влияния на весь остальной спектр. Что же может быть причиной этого странного явления? Квантовое поведение электронов.

Согласно модели атома, придуманной Нильсом Бором, электроны в атоме располагаются на определённых дискретных орбитах. Ньютоновская механика разрешает электрону обращаться по любой орбите на любом расстоянии от ядра, но квантовая механика накладывает на движение электрона ограничения, подобные правилам движения транспортных средств по полосам. Двигаясь между полосами, транспортное средство нарушает правила дорожного движения; двигаясь между разрешёнными орбитами, электрон нарушает правила квантовой ме-

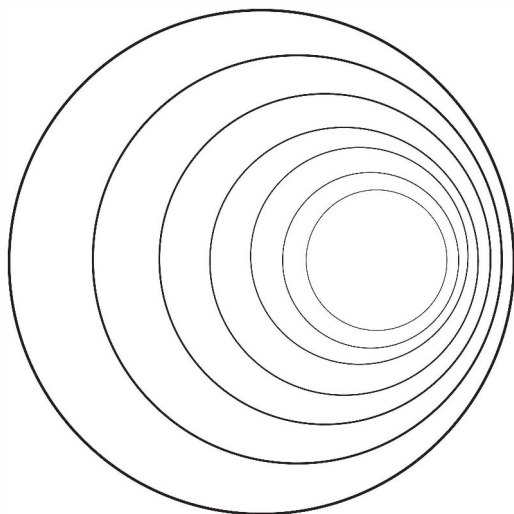
ханики. Каждой орбите соответствует своя энергия, поэтому при переходе электрона с одной орбиты на другую его энергия изменяется. Когда электрон перескакивает с более высокой орбиты на более низкую, он излучает фотон, уносящий избыток энергии. И наоборот, чтобы перескочить с более низкой орбиты на более высокую, электрону требуется поглотить фотон.

Обычно электрон находится на самой нижней из разрешённых орбит, не занятой другими электронами (вспомните принцип запрета Паули, не позволяющий двум электронам находиться в одном и том же квантовом состоянии). Но в случае столкновения атома с другой частицей электрон может получить часть энергии этого столкновения и перейти на новую орбиту, расположенную дальше от ядра. Атом в таком состоянии называется *возбуждённым*. Спустя короткое время электрон испускает фотон и возвращается на свою прежнюю орбиту. Свет, излучаемый в таком процессе, имеет строго определённую длину волны, зависящую от типа атома. Таким образом, каждый химический элемент имеет собственную уникальную «подпись» — набор спектральных линий, обусловленный квантовыми переходами электронов в атомах этого элемента.

Если фотон, падающий на атом, имеет энергию, соответствующую энергии разрешённого перехода в атоме, то может произойти обратный процесс: фотон будет поглощён, а электрон, получив дополнительную энергию, перейдёт на более высокую разрешённую орбиту. При прохождении света звезды через водород, из которого состоит звёздная атмосфера, атомы водорода поглощают фотоны, имеющие длину волны, соответствующую разности энергий между разрешёнными орбитами электронов, оставляя в спектре изучения звезды тёмные линии. Если в атмосфере звезды присутствуют гелий, углерод и другие химические элементы, то каждый из них оставит свою собственную уникальную подпись в виде набора тёмных линий в спектре. Изучая спектры излучения звёзд, учёные определяют их химический состав. Но в отношении задачи, которую решал Хаббл, нас интересует не химический состав звёзд, а их скорости относительно наблюдателя. Ключ к определению скоростей звёзд спрятан в зависимости расположения спектральных линий в свете звезды от скорости, с которой звезда приближается или удаляется от земного наблюдателя. Это ключ называется *эффектом Доплера*.

Если вы слышали сиренуполицейской машины, проносщейся мимо вас, значит, вы знакомы с эффектом Доплера. Звук высокого тона типа «ииниии» в момент проезда машины мимо вас переходит в более низкий звук «ууууу». При приближении машины звуковые волны, исходящие от неё, следуют более часто, а при удалении, наоборот, становятся более редкими. Поскольку длина волны и частота тесно связаны, вы слышите изменяющийся звук «иинииууууу». Более того, обладая музыкальным слухом, вы можете оценить, с какой скоростью движется автомобиль, на основании разности частот звучания сирены во время его приближения и удаления.

Но эффект Доплера способен не только развлекать пешеходов. Для астрономов он является не чем иным, как ключом к структуре и истории Вселенной. Эффект Доплера имеет место для всех типов волн: звуковых волн, волн в кристаллах и даже для волн на поверхности воды. Попробуйте пошевелить пальцами в воде, свесив руку за борт медленно движущейся лодки<sup>1</sup>. Вы увидите, что волны, распространяющиеся вперёд по направлению движения, образуют более тесную группу, чем волны, распространяющиеся назад.



Волны от источника, движущегося вправо

<sup>1</sup> Лодка должна двигаться медленнее, чем волны на поверхности воды.



К счастью для астрономов, свет, излучаемый движущимися объектами, тоже подвержен эффекту Доплера. Лимон, ракетой улетающий прочь от наблюдателя, изменит свой цвет в красную сторону и станет похожим на апельсин или даже помидор, если только он движется достаточно быстро<sup>1</sup>. Если же лимон полетит с такой же скоростью на вас, то сможет ввести вас в заблуждение, показавшись лаймом или гигантской черничной. Это происходит потому, что свет от источника, удаляющегося от наблюдателя, испытывает *красное смещение*, а свет приближающегося к наблюдателю источника — *фиолетовое смещение*. Точно так же как изменяется цвет лимона, изменяется и цвет галактик. Таким образом, измеряя величину смещения линий в спектре галактики, можно определить, с какой скоростью она движется относительно Земли.

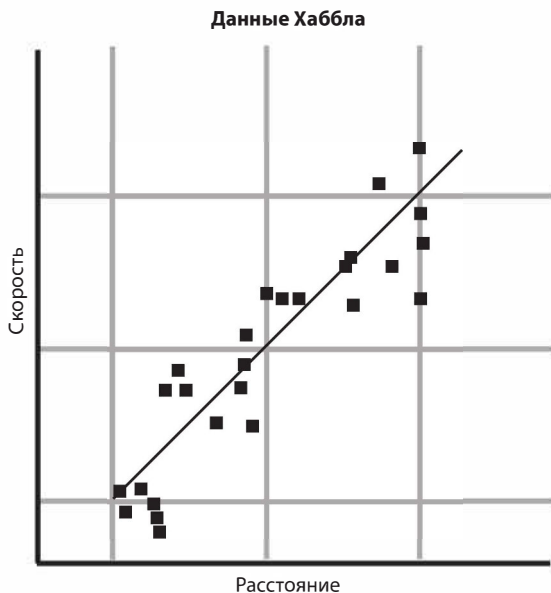
Хаббл использовал эффект Доплера для определения скоростей огромного количества галактик. Он сравнивал спектр света каждой галактики со спектром эталонного лабораторного источника. Если бы Вселенная, как полагал Эйнштейн, была статичной, то линии одних и тех же элементов в обоих спектрах полностью совпадали бы. Но то, что обнаружил Хаббл, удивило всех. Свет почти всех далёких галактик испытывал красное смещение. В этом не было никаких сомнений. Одни галактики двигались быстрее, другие медленнее, но все они, за исключением нескольких самых близких к нам, удалялись от Земли. Это не могло не озадачить Хаббла. Сделанное им открытие означало, что в будущем галактики должны разлететься на ещё большие расстояния, но ещё более неожиданным был логичный вывод, что в прошлом галактики находились гораздо ближе друг к другу, а в какой-то момент, возможно, даже составляли одно целое!

Хаббл также сумел грубо определить расстояния до различных галактик и обнаружил закономерность: чем дальше от Земли располагалась галактика, тем с большей скоростью она удалялась. Ближайшие галактики удалялись медленно, но самые далёкие неслись прочь от нас с умопомрачительной скоростью. На приведённом графике из статьи Хаббла по горизонтальной оси отложено расстояние до галактик, а по вертикальной — скорость удаления. Каждая галактика представлена

---

<sup>1</sup> Для заметного изменения цвета лимон должен двигаться со скоростью, составляющей существенную долю от скорости света.

на графике отдельным чёрным квадратиком. Хаббл нашёл удивительным, что все точки лежат вблизи прямой линии.



Это означает, что скорость удаления не просто зависит от расстояния, а зависит от него линейно. Галактика, находящаяся вдвое дальше от нас, удаляется с вдвое большей скоростью. Эта была новая неожиданная закономерность, новый космологический закон — закон Хаббла: *Галактики удаляются от нас со скоростями, пропорциональными расстояниям до них.* Или в более строгой формулировке: *Галактики удаляются друг от друга со скоростью, равной произведению расстояния между ними на постоянную величину — постоянную Хаббла<sup>1</sup>.*

На самом деле открытый Хабблом закон не был такой уж неожиданностью. Ещё в 1922 году русский математик Александр Фридман, изучив опубликованную в 1917 году работу Эйнштейна, написал статью, в которой высказал утверждение, что Эйнштейн ошибался, считая Вселенную статической. Если Вселенная изменяется со временем, то введения

<sup>1</sup> Использование для хаббловского коэффициента термина «постоянная» несколько сбивает с толку, потому что она изменяется со временем. В далёком прошлом постоянная Хаббла была гораздо больше, чем сейчас.

космологической постоянной для обеспечения её устойчивости не требуется. Вселенная Фридмана точно так же, как и вселенная Эйнштейна, представляла собой замкнутую и ограниченную 3-сферу, но она была не статичной, а расширялась с течением времени подобно наддуваемому воздушному шару. Возьмите воздушный шарик и нарисуйте на нём галактики, более или менее равномерно распределённые по поверхности. А теперь начните медленно надуть шарик. Вы увидите, как по мере того, как шарик увеличивается в размерах, увеличиваются и расстояния между любыми двумя нарисованными на поверхности шарика галактиками. Ни одна галактика не выглядит привилегированной, расположенной в центре расширения. С точки зрения наблюдателя, находящегося в любой галактике, все остальные галактики движутся прочь от него. Это ключевой момент Вселенной Фридмана.

Обратите особое внимание, что нарисованные на шарике галактики будут удаляться друг от друга тем быстрее, чем большее расстояние на поверхности шарика их разделяет. Причём скорости их удаления будут пропорциональны расстояниям между ними, то есть закон Хаббла соответствует закону расширения поверхности раздувающейся сферы. К несчастью, Фридман умер в 1925 году, не увидев ни открытия Хаббла, подтверждавшего его теорию, ни той роли, которую сыграла его работа в будущем развитии космологии.

Рассмотрим некоторые из положений фридмановской космологии.

## Космологический принцип и три геометрии

Только две вещи в мире бесконечны: Вселенная и человеческая глупость. Впрочем, насчёт Вселенной я не уверен.

— Альберт Эйнштейн

Пару лет назад меня пригласили в Южную Африку для чтения курса лекций в одном из университетов. Будучи там, мы с женой совершили поездку в Национальный парк Крюгер. Этот парк занимает огромные

просторы велда и служит домом для большинства крупных млекопитающих континента. Это было потрясающе. Каждое утро и каждый вечер мы садились в лендровер и отправлялись смотреть и фотографировать дикую природу. Мы видели бегемотов и носорогов, африканских буйволов и прайд львов, пожирающих антилопу, а также разъярённого слона. Но лично для меня самым сильным впечатлением оказался вид южного неба в тёмную безлунную ночь. Южное небо гораздо богаче северного, к которому я привык, а в парке Крюгер почти полностью отсутствует световое загрязнение. Вид млечного пути, протянувшегося через всё небо, был просто потрясающим. Но чувство необъятности нашей Галактики обманчиво. Вся она вместе со всеми видимыми звёздами является лишь крошечным островком в безбрежном океане пространства, однородно заполненного сотнями миллиардов галактик, которые можно увидеть только в крупные телескопы. И даже эта наблюдаемая часть Вселенной — лишь крошечный фрагмент гораздо большего космоса.

Согласно моему словарю, слово *однородный* означает *одинаковый по структуре или составу*. Применительно к овсяной каше слово «однородная» означает: «без комков». Конечно, если вы посмотрите на овсянку через увеличительное стекло, она вряд ли будет выглядеть однородной. Суть в том, что когда вы называете что-то однородным, необходимо сделать уточнение: на каком размере проявляется эта однородность. Хорошо перемешанная овсянка является однородной на размерах больше, чем четверть сантиметра. Пшеничное поле фермера Брауна в Канзасе однородно на характерных размерах больше, чем несколько метров.

Ну... не совсем так. Овсянка однородна на размерах от четверти сантиметра до размера кастрюли. Пшеничное поле фермера Брауна однородно на размерах больше нескольких метров, но меньше нескольких километров. На размерах больше нескольких километров сельская местность начинает напоминать лоскутное одеяло. Таким образом, правильнее будет сказать, что пшеничное поле фермера Брауна однородно на размерах от нескольких метров до километра.

Для невооружённого глаза африканское ночное небо выглядит крайне неоднородным. Млечный Путь узкой светлой полосой прорезает более тёмный фон. Невозможно, находясь в чаще, разглядеть за деревьями лес. Но взгляд через большой телескоп открывает нам мил-

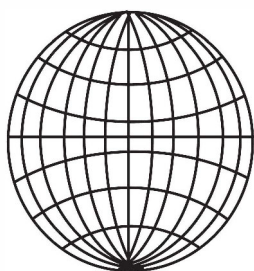
лиарды галактик, которые в целом равномерно распределены по наблюдаемой части Вселенной. Согласно астрономам, Вселенная выглядит однородной и *изотропной* на расстояниях от ста миллионов до как минимум пятнадцати миллиардов световых лет. Верхний предел в пятнадцать миллиардов световых лет, безусловно, занижен: он обусловлен всего лишь нашей неспособностью заглянуть дальше.

Возвращаясь к своему словарю, я нахожу в нём следующее определение слова «изотропный»: *одинаковый во всех направлениях; инвариантный относительно направления*. «Изотропный» не то же самое, что «однородный». Приведу пример. Однажды, во время погружения с аквалангом на одном из коралловых рифов в Красном море я увидел огромную стаю узких длинных рыб, однородно заполнявших большой объём. Но по какой-то необъяснимой причине, пока я находился слишком близко, все рыбы были повёрнуты в одну и ту же сторону. Косяк был однородным на определённом масштабе, но он определённо не был изотропным. Любой фрагмент косяка выглядел точно так же, как и любой другой фрагмент этого же косяка, но этого нельзя было сказать про направление, в котором смотрели рыбы.

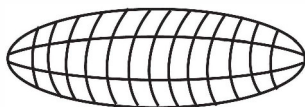
Космологи и астрономы предполагают, что Вселенная является однородной и изотропной: независимо от того, в каком месте Вселенной вы находитесь и в каком направлении смотрите, вы видите одно и то же. Я имею в виду не близлежащие детали, а крупномасштабные особенности Вселенной. Космологи называют это предположение «космологическим принципом». Конечно, от того, что мы назвали его принципом, оно автоматически не стало истинным. Первоначально это была просто гипотеза, но всё более тщательные и разнообразные наблюдения убедили астрономов и космологов, что Вселенная действительно однородна и изотропна на масштабах от нескольких сотен миллионов до, по крайней мере, нескольких десятков миллиардов световых лет. О свойствах Вселенной на ещё больших расстояниях мы ничего не можем сказать, потому что четырнадцать миллиардов световых лет — это предел наших наблюдательных возможностей. Независимо от того, насколько большой телескоп мы возьмём, мы не сможем увидеть объект на расстоянии больше четырнадцати миллиардов световых лет. Причина состоит в том, что возраст самой Вселенной составляет около четырнадцати миллиардов лет. За это время свет может

пройти расстояние не более четырнадцать миллиардов световых лет. Свет от более далёких объектов просто ещё не успел до нас добраться. На самом деле ставка на то, что Вселенная является однородной и изотропной на расстояниях, превышающих размеры наблюдаемой части Вселенной, может и сыграть, но, подобно сельской местности, Вселенная может оказаться похожей на больших расстояниях на лоскутное одеяло: лоскутное одеяло, сшитое из карманных вселенных.

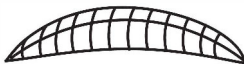
Пока же примем как рабочее предположение господствующую точку зрения, что космологический принцип справедлив вплоть до самых больших расстояний. Оно подводит нас к интересному вопросу: какая геометрия пространства совместима с космологическим принципом? Под геометрией пространства я имею в виду форму пространства. Начнём с двумерных примеров. 2-сфера является частным случаем геометрии. Помимо сферы пространство может иметь форму эллипсоида, груши и банана<sup>1</sup>.



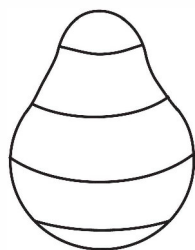
Сфера



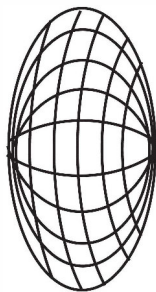
Вытянутый эллипсоид



Банан



Груша



Сплюснутый эллипсоид

<sup>1</sup> Под формой двумерного пространства я подразумеваю, конечно же, форму поверхности.

Из всех перечисленных объектов однородна и изотропна только сфера. Она, подобно окружности, обладает совершенной симметрией: каждая точка сферы ничем не отличается от другой точки сферы. Эллипсоид, хотя и не так совершенен, как сфера, всё ещё остаётся достаточно симметричной фигурой. Например, зеркальное отражение эллипсоида ничем не отличается от оригинала. Но уже далеко не каждый участок поверхности эллипсоида неотличим от других. Груша или банан ещё менее симметричны.

Одним из способов описания поверхности является указание её кривизны. Кривизна сферы абсолютно однородна. Говоря математическим языком, сфера является пространством с однородной положительной кривизной. Эллипсоид тоже обладает всюду положительной кривизной, однако его кривизна меняется от одного места поверхности к другому. Например, вытянутый эллипсоид, форма которого напоминает подводную лодку, имеет бóльшую кривизну на концах и меньшую посередине. Из всех примеров одна только сфера имеет всюду постоянную кривизну.

Сферы, эллипсоиды и поверхности фруктов замкнуты и ограничены — это означает, что они имеют конечную площадь, но не имеют краёв. Но следует признать, что никто не знает, конечна ли Вселенная, ведь до сих пор не нашлось космического Магеллана, который совершил бы круговселенское путешествие. Поэтому вполне возможно, что Вселенная продолжается неограниченно далеко, и в этом случае она бесконечна и безгранична.

В том случае, если мы считаем Вселенную бесконечной, возможны две однородные и изотропные геометрии Вселенной. Первая, очевидно, представляет собой бесконечное плоское пространство. Представьте себе бесконечный во всех направлениях плоский лист бумаги. На бесконечной плоскости нет никаких выделенных точек, о которых можно было бы сказать, что они находятся ближе к центру или ближе к краю. Но в отличие от сферы, плоскость не имеет кривизны, или, говоря математическим языком, кривизна плоскости равна нулю. Итак, мы знаем две однородные геометрии: сфера с положительной кривизной и плоскость с нулевой кривизной. Остаётся ещё третий вариант: *гиперболоид* с отрицательной кривизной. Чтобы вообразить поверхность с отрицательной кривизной, представьте себе кусок водопроводной

трубы, согнутый под прямым углом. С внешней стороны «локтя» поверхность металла имеет положительную кривизну, как сфера. Кривизна же поверхности на внутренней стороне изгиба отрицательна.

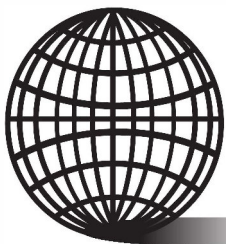


Конечно же, колено водопроводной трубы неоднородно. Внутренняя сторона колена геометрически не похожа на внешнюю, потому что их кривизны имеют разные знаки. Лучшим примером поверхности с отрицательной кривизной служит поверхность седла: представьте себе седло, поверхность которого неограниченно поднимается вверх спереди и сзади от седока и неограниченно спускается вниз справа и слева, — и вы получите представление о бесконечной поверхности, имеющей всюду отрицательную кривизну.

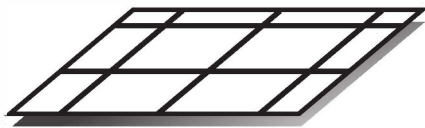
Все три поверхности — сфера, плоскость и гиперboloид — однородны. Более того, все три поверхности имеют аналоги в трёхмерном пространстве: 3-сфера, обычное трёхмерное евклидово пространство и более трудное для представления трёхмерное гиперболическое пространство.

Теперь, когда мы представляем себе три стандартных типа космологии, предположим, что каждая из поверхностей представляет собой резиновую плёнку (или резиновый шарик для случая сферы) с нарисованными на ней галактиками. Начав равномерно растягивать плёнку, мы убедимся, что расстояния между двумя любыми галактиками будут изменяться, следуя закону Хаббла. Теперь у вас есть примерное представление о трёх возможных однородных и изотропных космологических

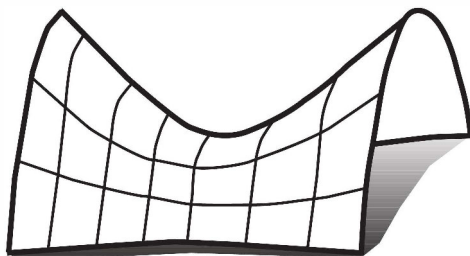




Положительная кривизна



Нулевая кривизна (плоское пространство)



Отрицательная кривизна

### Три геометрии

ских моделях. Космологи обозначают эти модели числом  $k$ , принимающим значения 1, 0 и  $-1$  соответственно для положительной кривизны (сферы), нулевой кривизны (плоскости) и отрицательной кривизны (гиперboloида).

Так всё же: конечна Вселенная, как предполагал Эйнштейн, или она безгранична и бесконечна и заполнена бесконечным числом звёзд и галактик? Этот вопрос мучил космологов на всём протяжении XX века, и ответ на него так и не был найден. В конце этой главы я расскажу об одном открытии и о том, как оно может повлиять на окончательный ответ.

## Три судьбы

Около месяца назад, когда я сидел дома и работал над этой книгой, меня отвлёк стук в дверь. На пороге стояли три очень аккуратно одетых молодых человека и протягивали мне книжицу религиозного содержания. Обычно я не утруждаю себя общением с бродячими проповедни-

ками, но, увидев название буклета, я не мог устоять перед соблазном задать им несколько вопросов. На титульном листе было написано: «Подготовился ли ты к концу Вселенной?» Когда я спросил у них, откуда они узнали подробности конца Вселенной, они ответили, что современные учёные подтвердили библейскую легенду об Армагеддоне и что конец Вселенной научно предопределён.

Это было, в общем, правдой. Современные учёные действительно предсказывают, что Вселенная — по крайней мере, та Вселенная, которую мы знаем, — рано или поздно завершит своё существование. Это предсказывают все разумные космологические теории. Когда и как это случится, зависит от исходных предположений, положенных в основу той или иной теории, но все теории сходятся в одном: по крайней мере в ближайшие десять миллиардов лет нам опасаться нечего.

По большому счёту, существуют два основных сценария конца света. Чтобы лучше понять их, представьте себе камень, брошенный вертикально вверх. Забудем про сопротивление воздуха и для пущей наглядности подбросим камень с поверхности маленького астероида. Судьба камня будет зависеть от того, достаточно ли притяжения астероида, чтобы удержать его около себя. В первом случае камень остановится в верхней точке своей траектории и упадёт обратно на поверхность астероида. Во втором случае он навсегда покинет астероид и улетит в мировое пространство. Исход зависит от того, больше или меньше *скорости убегания* начальная скорость камня. Скорость убегания, в свою очередь, зависит от массы астероида: чем больше масса, тем больше скорость убегания.

Согласно общей теории относительности<sup>1</sup>, судьба Вселенной очень напоминает судьбу этого камня. Галактики (и всё прочее вещество Вселенной) были выстрелены во все стороны в результате Большого взрыва и теперь разлетаются прочь друг от друга. Между тем гравитация стремится вернуть их обратно. Другими словами, Вселенная раздувается подобно воздушному шарик, но гравитация замедляет это расширение. Будет расширение продолжаться бесконечно или гравитация в конце концов остановит его и обратит вспять? Ответ на этот

<sup>1</sup> В настоящий момент я полностью игнорирую существование космологической постоянной. Как мы увидим позже, наличие ненулевой космологической постоянной в корне изменит наши выводы.

вопрос аналогичен ответу на вопрос о судьбе камня, брошенного с поверхности астероида. Если масса Вселенной окажется достаточной для того, чтобы остановить расширение, то после этого галактики начнут сближаться, пока не исчезнут в ходе страшного и горячего Большого коллапса. С другой стороны, если масса Вселенной недостаточно велика, чтобы остановить расширение, оно будет продолжаться до бесконечности. В этом случае конец Вселенной будет не столь драматическим — она превратится в чрезвычайно разреженную холодную материю.

И у Вселенной и у камня есть третья возможность. Если скорость камня в точности равна скорости убегания, то скорость его удаления будет уменьшаться, стремясь в пределе к нулю. То же можно сказать и о Вселенной. В этом случае она будет расширяться вечно со всё уменьшающейся и в конечном итоге стремящейся к нулю скоростью.

## Геометрия судьбы

Три возможные геометрии и три возможные судьбы — есть ли между ними связь? Да, есть. Теория гравитации Эйнштейна (без космологической постоянной) устанавливает связь между геометрией пространства и содержащимися в этом пространстве массами. Распределение масс в пространстве определяет его геометрию. Ньютоновское изречение «масса является источником гравитационного поля» в эйнштейновской теории гравитации следует заменить на другое: «масса искривляет пространство». В этом и кроется искомая связь между тремя геометриями и тремя судьбами. Детали этой связи описываются сложным тензорным исчислением и римановой геометрией, но итоговые выводы (без учёта космологической постоянной) оказываются достаточно простыми.

1. Если средняя плотность Вселенной достаточно велика, чтобы остановить расширение и обратить его вспять, то это приведёт к искривлению пространства и замыканию его в 3-сферу. В этом случае Вселенная оказывается замкнутой и ограниченной, и её судьба — финальное Большое схлопывание. На техническом жаргоне финальное состояние Вселенной в этом сценарии описывается термином

*сингулярность*. Указанный случай носит название *закрытой Вселенной*, или Вселенной с  $k = 1$ .

2. Если средняя плотность Вселенной меньше, чем необходимо для того, чтобы «закрыть» Вселенную, то она будет расширяться бесконечно. В этом случае искривление пространства приведёт к гиперболической геометрии. Гиперболическая Вселенная, как уже сказано, расширяется бесконечно. Такая Вселенная называется *открытой Вселенной*, или Вселенной с  $k = -1$ .
3. Наконец, если средняя плотность Вселенной такова, что Вселенная балансирует на острие ножа между открытой и закрытой, геометрия пространства соответствует плоскому евклидовому пространству, а сама Вселенная бесконечно расширяется со всё уменьшающейся скоростью, стремящейся со временем к нулю. Такая Вселенная называется *плоской Вселенной*, или Вселенной с  $k = 0$ .

Итак, что же нас ждёт?

Кто говорит, мир от огня  
Погибнет, кто от льда.  
А что касается меня,  
Я за огонь стою всегда.  
Но если дважды гибель ждёт  
Наш мир земной, — ну что ж,  
Тогда для разрушенья лёд  
Хорош,  
И тоже подойдёт.

Роберт Фрост, «Огонь и лёд»  
(перевод М. Зенкевича)

Когда я спросил трёх молодых миссионеров, какая же смерть нас ждёт: горячая или холодная, они ответили, что всё зависит от меня. Вполне вероятно, что меня ждёт горячая смерть, если я не изменю своё отношение к богу.

Физики и космологи не имеют определённого мнения в отношении вида окончательной расплаты. На протяжении десятилетий они пытались определить, какая из трёх судеб будет править бал последних дней Вселенной. Первый, наиболее очевидный способ выяснить это — на-

править наши телескопы во все уголки Вселенной и подсчитать полную массу всего, что можно увидеть: звёзд, галактик, гигантских пылевых облаков и прочей материи, какую только можно разглядеть непосредственно или вычислить её существование. Достаточно ли гравитационного притяжения всей этой материи, чтобы остановить расширение?

Мы знаем, с какой скоростью Вселенная расширяется сегодня. Хаббл установил, что скорости далёких галактик пропорциональны расстоянию до них, а коэффициентом пропорциональности является постоянная Хаббла. Это число является хорошей мерой скорости расширения: чем больше значение постоянной Хаббла, тем быстрее галактики удаляются друг от друга. Размерность постоянной Хаббла — скорость, делённая на расстояние. Астрономы обычно измеряют постоянную Хаббла в километрах в секунду на мегапарсек. Что такое километр в секунду, понятно любому. Один километр в секунду — это три скорости звука, или три Маха. Мегапарсеки менее известны широкой публике. Это единица расстояния, принятая в космологии. Один мегапарсек приблизительно равен трём миллионам световых лет или тридцати триллионам триллионов километров — чуть больше, чем расстояние до ближайшей к нам галактики Андромеды.

Значение постоянной Хаббла неоднократно измерялось и уточнялось за прошедшие годы и было предметом оживлённых дебатов. Астрономы соглашались с тем, что значение постоянной Хаббла лежит в диапазоне от 50 до 100 километров в секунду на мегапарсек, но только в самое последнее время её значение было более или менее точно определено в  $75 \text{ (км/с)/Мпк}$ . Смысл этого числа состоит в том, что галактики, отстоящие друг от друга на один мегапарсек, разлетаются с относительной скоростью в  $75 \text{ км/с}$ . Галактики, разделённые расстоянием в два мегапарсека, разлетаются с относительной скоростью  $150 \text{ км/с}$ .

По земным стандартам скорость в  $75 \text{ км/с}$  выглядит умопомрачительно высокой. Мне понадобилось бы всего десять минут, чтобы, двигаясь с такой скоростью, совершить кругосветное путешествие. Но с точки зрения физиков или астрономов это небольшая скорость. Например, наша Солнечная система движется вокруг центра Галактики с вдесятеро большей скоростью. А по сравнению со скоростью света  $75 \text{ км/с}$  — это просто улиточья скорость.

В соответствии с законом Хаббла галактика Андромеды должна удаляться от нас со скоростью 50 км/с, но в действительности она приближается к нам. Она находится слишком близко, чтобы хаббловское расширение превалировало над гравитационным притяжением между нашей Галактикой и галактикой Андромеды. Однако закон Хаббла никогда не рассматривался как точный закон, описывающий взаимное движение близкорасположенных галактик. Когда мы рассматриваем галактики, находящиеся достаточно далеко друг от друга, чтобы избежать взаимного притяжения, закон работает очень хорошо.

Несмотря на то что расширение Вселенной происходит медленно, данные наблюдений указывают на то, что её плотность недостаточна, чтобы повернуть расширение вспять.

Зная скорость расширения, несложно, используя уравнения Эйнштейна, вычислить значение средней плотности Вселенной, необходимое для того, чтобы остановить расширение. Это значение составляет  $10^{-25}$  кг на кубический метр. При такой средней плотности Вселенная будет балансировать на острие ножа между сферической и гиперболической геометриями.  $10^{-25}$  кг/м<sup>3</sup> — это примерно 50 протонов на кубический метр. Небольшого увеличения средней плотности будет достаточно, чтобы скрутить Вселенную в 3-сферу и повернуть историю от Большого взрыва к Большому сжатию. Если плотность в точности равна указанному выше критическому значению, то Вселенная будет плоской (то есть  $k = 0$ ).

Астрономы наблюдают материю в виде звёзд и газово-пылевых облаков, словом, всю материю во Вселенной, которая излучает или рассеивает свет. Если предположить, что Вселенная однородна, то можно подсчитать массу всей светящейся материи в окрестностях нашей галактики и определить среднюю плотность космического вещества. Она оказывается удивительно мала: всего один протон на кубический метр: в 50 раз меньше, чем необходимо для того, чтобы замкнуть Вселенную. Из наблюдений получается, что мы живём в открытой бесконечной Вселенной с отрицательной кривизной ( $k = -1$ ), и она будет продолжать своё расширение вечно.

Но космологи и астрономы всегда были очень осторожны в своих выводах. В отличие от физики, где ошибка в 50 раз является позором, в астрономии такая точность предварительной оценки до недавнего

времени была в порядке вещей. Оценка может запросто оказаться завышенной или заниженной в десять или даже в сто раз. Учитывая, что плотность может иметь любое значение, тот факт, что она оказалась так близко (по меркам астрономов) к критическому значению, заставил космологов отнестись к этому результату с подозрением. И они оказались правы в своей подозрительности.

Существует ещё один, более прямой и надёжный, способ определения массы галактики помимо оценки на основе количества излучаемого ею света. Для этого необходимо использовать ньютоновский закон всемирного тяготения. Давайте вернёмся к камню и астероиду. Но теперь, вместо того чтобы бросить камень вертикально вверх, запустим его по круговой орбите вокруг астероида. Гравитация астероида удерживает камень на орбите. Измерив скорость камня и радиус его орбиты, можно на основе закона всемирного тяготения определить массу астероида. Аналогичным образом, путём измерения скоростей звёзд, обращающихся на периферии галактики, астрономы могут вычислять массы галактик. И что же они видят?

Все галактики оказываются тяжелее, чем предполагалось. Грубо говоря, каждая галактика имеет массу, примерно в 10 раз большую, чем суммарная масса составляющих галактику звёзд и межзвёздных газово-пылевых облаков. Происхождение недостающих 9/10 массы остаётся загадкой. Почти наверняка эта масса принадлежит не обычной материи, состоящей из протонов, нейтронов и электронов. Космологи называют её *тёмной материей*<sup>1</sup>, поскольку она не излучает свет. Эта призрачная материя не только не излучает, но и не рассеивает свет и вообще никак не проявляет себя, кроме как своим гравитационным полем. Такая вот странная вещь — эта современная наука. Со времён Дальтоне вся материя считалась предметом изучения обычной химии. Но теперь дело поворачивается так, что 90 % всей материи во Вселенной оказывается тем, о чём мы ничего не знаем.

Пока астрономы медленно переваривали новые данные, пытались убедить себя в том, что тёмной материи на самом деле не существует, физики были заняты введением в теорию всё новых видов элементарных

---

<sup>1</sup> Не следует путать тёмную материю с тёмной энергией. Тёмная энергия — это проявление энергии вакуума.



частиц на все случаи жизни. Самым первыми были нейтрино, затем суперпартнёры, но ими, конечно же, не исчерпывается перечень гипотетических частиц, по той или иной причине вводимых в теорию. Никто не знает, что такое тёмная материя, но скорее всего, окажется, что она состоит из новых тяжёлых элементарных частиц, которые мы пока не обнаружили. Возможно, этими частицами будут неидентичные суперпартнёры — близнецы обычных частиц: бозонные партнёры нейтрино или даже фермионные партнёры фотонов. Не исключено, что мы обнаружим совершенно неожиданный класс элементарных частиц, о которых теоретики ещё даже не начали думать. Какими бы они ни были, они должны быть тяжёлыми, чтобы создавать достаточное гравитационное поле, но при этом не должны иметь электрического заряда, иначе они бы рассеивали или излучали свет. Это все, что мы пока знаем. Частицы тёмной материи должны окружать нас, беспрепятственно пролетая сквозь Землю и даже сквозь наши тела, но мы не в состоянии их видеть, чувствовать или обонять. Лишённые электрического заряда, эти частицы не способны напрямую взаимодействовать с нашими органами чувств. Вероятно, построив очень чувствительные детекторы, мы сможем узнать больше об этих загадочных объектах, но пока достаточно знать, что именно они делают галактики в 10 раз тяжелее, чем мы предполагали.

Вопрос о том, является ли Вселенная открытой и бесконечной или закрытой и конечной, как призрак преследует астрономов столько времени, сколько существует астрономия. Закрытая Вселенная с конечным количеством галактик, звёзд и планет ещё как-то интуитивно понятна, но открытая Вселенная практически непостижима. Имея в своём распоряжении достаточно материи, мы очень близко подошли к тому, чтобы «закрыть» Вселенную, — «танталически» близко. Изначально мы находились почти в двух порядках от критической плотности, теперь — менее чем в одном порядке: наблюдаемая средняя плотность Вселенной всего в пять раз меньше критической, но вместе с тем мы гораздо более уверены, что знаем практически обо всей массе, составляющей Вселенную. Могли ли мы недостаточно аккуратно измерить постоянную Хаббла? Если она на самом деле окажется в два или три раза меньше, то средняя плотность вещества будет уже очень недалеко от закрытия Вселенной. Слишком много зависит от ответа на



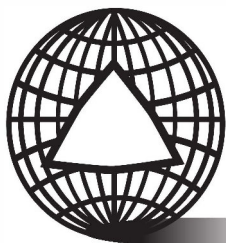
этот вопрос, поэтому хотелось бы закрыть все возможные дыры в рассуждениях.

Астрономы уточняют значение постоянной Хаббла на протяжении последних 80 лет, используя всё более и более сложные инструменты. Сегодня кажется весьма маловероятным, что истинное значение постоянной Хаббла может настолько отличаться от измеренного, чтобы позволить закрыть Вселенную. Остановившись на этом, мы могли бы заключить, что средняя плотность Вселенной недостаточна для того, чтобы закрыть её, — но мы рассмотрели ещё не все факторы.

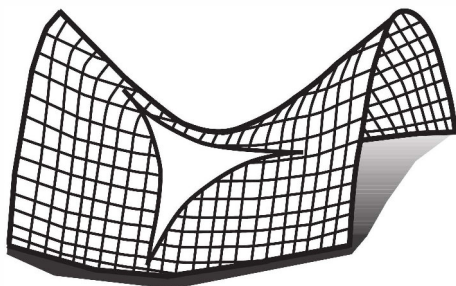
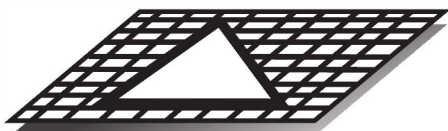
Существует другой способ определить, является Вселенная открытой, закрытой или плоской. Представьте себе очень большой треугольник в пространстве, треугольник космических масштабов. Чтобы быть уверенными, что его стороны являются прямыми, мы построим треугольник при помощи световых лучей. Космический геодезист может измерить углы треугольника, и если он не забыл евклидову геометрию, то сумма углов будет равна 180 градусам или двум прямым углам. Древние греки были в этом абсолютно уверены. Они не могли представить, что пространство может быть устроено каким-либо другим образом.

Однако современные геометры знают, что правильный ответ зависит от геометрии пространства. Если пространство плоское, как считал Евклид, то сумма углов треугольника действительно будет равна 180 градусам. С другой стороны, если пространство представляет собой сферу, то сумма углов треугольника окажется больше 180 градусов. Несколько сложнее представить себе треугольник в пространстве с отрицательной кривизной, сумма углов которого будет всегда меньше 180 градусов.

Отправка космических геодезических партий на миллиарды световых лет в разные углы огромного космического треугольника невозможно, и даже если бы мы смогли осуществить такой проект, он занял бы миллиарды лет, необходимых для достижения геодезистами конечных точек, и ещё столько же для получения от них результатов. Но изобретательность астрофизиков не имеет границ, и хотите — верьте, хотите — нет, они нашли способ выполнить необходимые измерения, не покидая Земли. Я вернусь к истории о том, как они это сделали, после того, как расскажу о *космическом микроволновом фоне*, или *реликтовом излучении*. Пока же скажу, что результаты их измерений свиде-



Треугольник на сфере

Треугольник на поверхности  
с отрицательной кривизной

Треугольник на плоскости

тельствуют о том, что пространство Вселенной, по-видимому, плоское! Углы треугольника складываются согласно Евклиду. Или, по крайней мере, их сумма не отличается от 180 градусов в пределах точности эксперимента.

А теперь, дорогой читатель, вы, наверное, уже сами поняли, что тут что-то глубоко неправильно. Судите сами: у нас есть два способа определить, является Вселенная открытой, закрытой или плоской, и два противоречащих друг другу ответа. Количество массы во Вселенной, по-видимому, в пять раз меньше, чем необходимо, чтобы закрыть Вселенную и даже чтобы сделать её плоской. Но космическая геодезическая съёмка оставляет мало сомнений в том, что геометрия Вселенной — плоская.

## Возраст Вселенной и старейшие звёзды

Представьте себе космический кинофильм, в котором перед зрителем разворачивается история Вселенной от момента её рождения в результате Большого взрыва до настоящего времени. Но вместо того, чтобы

смотреть этот фильм как принято — с начала до конца, мы запустили его задом наперёд. Вместо расширения Вселенной мы увидим на экране её сжатие. Галактики будут подчиняться обращённому закону Хаббла — их скорости по-прежнему будут пропорциональны расстоянию между ними, только вместо того, чтобы удаляться, они будут сближаться. Попробуем проследить за одной из удалённых галактик по мере её приближения к нам. Используя обращённый закон Хаббла, мы можем прикинуть её скорость. Допустим, галактика находится в одном мегапарсеке от нас. Закон Хаббла говорит, что в этом случае скорость, с которой галактика приближается к нам, составит 75 километров в секунду. Зная расстояние до галактики и скорость, с которой она приближается, можно без труда вычислить время, через которое она свалится нам на голову. Я сделаю это за вас. Ответ: через 15 миллиардов лет — в предположении, что скорость приближения галактики всё это время остаётся постоянной.

А что, если мы возьмём галактику, находящуюся на расстоянии не один, а два мегапарсека? Закон Хаббла говорит нам, что её скорость приближения будет вдвое больше, и она преодолет расстояние за те же 15 миллиардов лет. Таким образом, как мы видим, все галактики за 15 миллиардов лет сбегутся вместе и слипнутся в один недифференцированный комок.

Но галактики не движутся всё время с одной и той же скоростью, как мы предположили при нашем расчёте. При расширении Вселенной скорости галактик со временем уменьшаются из-за того, что гравитационное поле тормозит их движение. Значит, при просмотре нашего фильма задом наперёд движение галактик будет ускоряться, как и должно быть в действительности, ведь гравитационное поле тянет галактики друг к другу. Это означает, что до столкновения галактик пройдёт меньше времени, чем мы предположили. Когда космологи проделали более точные вычисления (для расширяющейся Вселенной), они пришли к выводу, что с момента, когда все галактики составляли единую плотную массу, прошло около 10 миллиардов лет. Это может означать, что всего 10 миллиардов лет назад водород и гелий начали образовывать первоначальные уплотнения, из которых в конце концов сформировались галактики. Следовательно, возраст Вселенной составляет 10 миллиардов лет.

Определение возраста Вселенной не обошлось без трудностей. Первоначально Хаббл недооценил расстояния между галактиками в десять раз и пришёл к выводу, что время, прошедшее с момента начала расширения, не превышает одного миллиарда лет. Но во времена Хаббла на основании содержания радиоактивных изотопов уже был определён возраст горных пород, самые древние из которых оказались старше двух миллиардов лет. Однако даже после уточнения шкалы расстояний всё равно оставалась одна досадная нестыковка. Астрофизики, изучавшие свойства звёзд в нашей Галактике, пришли к выводу, что старейшие из них старше Вселенной. Возраст самых старых звёзд составляет около 13 миллиардов лет, а Вселенной, как я уже говорил, — только 10 миллиардов. Выходило, что дети-звёзды на три миллиарда лет старше их матери-Вселенной!

Короче говоря, во Вселенной обнаружили три большие проблемы. Во-первых, противоречивые свидетельства относительно геометрии пространства: открытое оно, закрытое или плоское. Во-вторых, Вселенная оказалась моложе, чем самые старые звёзды. И в-третьих, мать всех проблем: отличается ли значение космологической постоянной от нуля, как первоначально считал Эйнштейн, и если нет, то почему? Зададим ещё один вопрос: связаны ли между собой эти проблемы? Разумеется, связаны.

## Решение

Одним из возможных решений перечисленных выше проблем может оказаться исправление общей теории относительности. И некоторые физики, ухватившись за это предположение, с энтузиазмом принялись вносить изменения в теорию, которые проявлялись бы в виде возникновения дополнительных сил на больших расстояниях. Лично я не нахожу ничего конструктивного в таких попытках. Обычно они чрезвычайно надуманные, часто нарушают фундаментальные принципы и, на мой взгляд, без них можно обойтись.

Можно ещё предположить, что астрономы слишком переоценивают точность получаемых ими данных. Вы можете делать ставки против экспериментальных данных, противоречащих общим ожиданиям.

Сырые данные почти всегда неточны, и дальнейшие эксперименты обычно подтверждают это. В этом случае я бы поставил против астрономических данных, а не против теории. Но, боюсь, я бы проиграл. По мере того как точность наблюдений растёт, новые результаты только подтверждают тот факт, что наблюдения противоречат теории. Что-то тут действительно глубоко неправильно.

Тем не менее есть одна возможность, которая не лежит на поверхности. А что, если значение космологической постоянной всё же отлочно от нуля? Что, если величайшая ошибка Эйнштейна на самом деле была одним из его величайших открытий? Может ли космологическая постоянная разрешить наши противоречия?

Когда мы вычисляли, достаточно ли наблюдаемой массы Вселенной, чтобы сделать её плоской или закрытой, мы полностью проигнорировали возможность существования энергии вакуума. В мире с ненулевой космологической постоянной это было бы ошибкой. Уравнения Эйнштейна говорят, что на кривизну пространства влияют *все* виды энергии. Энергия и масса эквивалентны, поэтому энергия вакуума тоже должна учитываться при расчёте средней плотности Вселенной. Обычная и тёмная материя вместе составляют около 30 % массы, необходимой, чтобы сделать Вселенную плоской или закрыть её. Очевидный выход — восполнить недостающие 70 % за счёт космологической постоянной. Это будет означать, что плотность энергии вакуума примерно в два с половиной раза больше суммарной плотности обычной и тёмной материи, или около 30 масс протона на кубический метр.

Поскольку космологическая постоянная добавляет силу отталкивания к закону всемирного тяготения, её наличие должно влиять на характер расширения Вселенной. В начальной фазе расширения влияние космологической постоянной практически не заметно, но по мере увеличения расстояния между галактиками сила отталкивания, создаваемая космологической постоянной, становится сопоставимой с силой притяжения. В конце концов космологическая постоянная способна привести к хаббловскому расширению Вселенной со всё увеличивающейся скоростью.

Обратим наш кинофильм вспять. Теперь галактики падают друг на друга, но сила отталкивания между ними ослабевает с уменьшением расстояния, а значит, наша оценка относительных скоростей галактик

окажется завышенной, особенно для конечной стадии падения. Если не учесть вклад энергии вакуума, оценка времени, необходимого для падения всех галактик в общую кучу, окажется заниженной. Другими словами, если бы в закон тяготения действительно входила космологическая постоянная, а мы бы не знали об этом, то наш расчёт привёл бы к возрасту Вселенной меньшему, чем на самом деле. И в самом деле, если мы добавим к общей массе Вселенной энергию вакуума, эквивалентную 30 массам протона на кубический метр, то вместо прежних 10 миллиардов лет получим оценку возраста Вселенной в 14 миллиардов лет. А этот возраст уже прекрасно согласуется с данными наблюдений, поскольку он на миллиард лет превышает возраст самых старых звёзд.

Эти доводы в пользу существования ненулевой космологической постоянной настолько важны, что я хочу их повторить. Итак, предположение о существовании небольшой космологической постоянной, добавляющей 70 % к энергии Вселенной, решает две крупнейшие загадки космологии. Во-первых, этой дополнительной энергии достаточно, чтобы сделать Вселенную плоской, что снимает противоречие между наблюдаемой нулевой кривизной пространства и тем фактом, что известной массы Вселенной недостаточно, чтобы сделать её плоской.

Второй парадокс, снимаемый космологической постоянной, — возраст самых старых звёзд, которые оказываются старше Вселенной. Удивительно, что добавка тех же самых семидесяти процентов энергии вакуума, которые необходимы для того, чтобы сделать Вселенную плоской, приводит к тому, что Вселенная оказывается на миллиард лет старше самых старых звёзд.

## Сверхновые I типа

В последние десятилетия нам удалось значительно повысить точность датировки основных событий в жизни Вселенной. Сегодня мы знаем историю Вселенной очень подробно. В этом нам помог особый класс событий, называемых вспышками *сверхновых I типа*. Вспышка сверхновой — это космический катаклизм, в ходе которого умирающая звезда коллапсирует под действием собственного гравитационного поля, превращаясь в нейтронную звезду и освобождая колоссальное

количество энергии. В максимуме вспышки сверхновая сияет, как целая галактика. Поэтому вспышки сверхновых легко регистрируются даже в самых удалённых галактиках.

Все сверхновые представляют интерес для науки, но вспышки сверхновых I типа имеют одну существенную особенность. Они происходят в тесных двойных системах, где один из компонентов представляет собой обычную звезду, а второй является белым карликом. Белый карлик — умирающая звезда, массы которой недостаточно, чтобы сколлапсировать в нейтронную звезду.

В тесной двойной системе часть вещества обычной звезды постепенно перетекает на белый карлик, медленно увеличивая его массу. Как только масса белого карлика достигнет определённого предела, при котором он уже не может оставаться стабильным, белый карлик коллапсирует в нейтронную звезду; этот процесс сопровождается вспышкой сверхновой I типа. Поскольку финальный коллапс и сопровождающая его вспышка происходят при достижении белым карликом строго определённой массы, считается, что энергия, выделяемая при вспышке, всегда одна и та же и не зависит от начальных масс белого карлика или его компаньона. Поэтому астрономы уверены, что все сверхновые I типа имеют одну и ту же светимость<sup>1</sup>. Это позволяет астрономам определять расстояния до сверхновых I типа с высокой точностью.

Скорость галактики, в которой вспыхнула сверхновая, можно определить по доплеровскому смещению спектральных линий. А зная точные расстояния до галактик и их скорости, мы можем с высокой точностью вычислить значение постоянной Хаббла. Но особенность далёких галактик состоит в том, что свет, который мы сегодня регистрируем на земле, был излучён ими в далёком прошлом. Если расстояние до галактики составляет 5 миллиардов световых лет, значит, мы видим эту галактику такой, какой она была 5 миллиардов лет назад.

---

<sup>1</sup> Светимость — это мера скорости, с которой объект отдаёт энергию в виде света. Светимость электрической лампочки измеряется в ваттах. Если два объекта имеют одну и ту же светимость, тот, который находится ближе, выглядит ярче. Путём измерения видимого с Земли блеска сверхновых I типа можно определить расстояния, на которых они находятся.



Когда мы измеряем постоянную Хаббла для такой галактики, мы получаем то её значение, которое было 5 миллиардов лет назад.

Исследуя галактики, находящиеся на различных расстояниях, мы тем самым изучаем историю изменения постоянной Хаббла. Иными словами, сверхновые I типа позволяют нам многое узнать об истории Вселенной на различных этапах её эволюции. А самое главное, это позволяет нам сравнивать историю реальной Вселенной с математическими моделями, включающими и не включающими космологическую постоянную. Результаты не оставляют сомнений: расширение Вселенной ускоряется под влиянием космологической постоянной. Для таких физиков, как я, это потрясающий поворот судьбы, способный радикально изменить наш взгляд на мир: после полувековых попыток объяснить, почему энергия вакуума должна быть равна нулю, вдруг узнать, что она не ноль! Первые сто девятнадцать десятичных знаков космологической постоянной оказываются равны нулю, и вдруг в сто двадцатом появляется отличная от нуля цифра. Ещё более интересно, что её значение оказалось почти тем, которое предсказал Вайнберг, основываясь на антропном принципе!

## Свет творения

Из-за того, что свет движется с конечной скоростью, большие телескопы, позволяющие заглянуть на огромные расстояния, показывают нам далёкое прошлое. Мы видим Солнце таким, каким оно было 8 минут назад, ближайшую звезду — такой, какой она была 4 года назад. Когда свет от ближайшей к нам галактики Андромеды, который мы видим сегодня, начал своё путешествие продолжительностью в два миллиона лет, наши далёкие предки только-только освоили прямохождение.

Самый древний свет, который мы регистрируем на Земле, начал своё путешествие 14 миллиардов лет назад. Этот свет возник, когда не существовало ещё не только Земли, но даже самых старых звёзд во Вселенной, а водород и гелий ещё не начали образовывать сгущения, из которых впоследствии сформировались галактики. Температура и плотность вещества Вселенной были в то время столь большими, что



Это был самый ранний момент творения, который мы способны увидеть, по крайней мере, используя электромагнитное излучение.

Представьте Вселенную в виде набора концентрических сферических оболочек, в самом центре которого находится Земля. Разумеется, никаких концентрических оболочек на самом деле нет, но ничто не запрещает нам разделить окружающее нас пространство таким способом. Каждая следующая оболочка находится от нас дальше предыдущей, и каждую следующую оболочку мы видим в более ранний момент времени, чем предыдущую. Проникая взглядом всё дальше и дальше, мы как бы видим историю Вселенной в виде запущенного задом наперёд кинофильма.

Чем дальше мы смотрим, тем более плотно населённая галактиками Вселенная предстаёт нашему взгляду. В запущенном задом наперёд вселенском кино вещество становится всё более плотным, будто бы гигантский поршень спрессовывает его всё сильнее и сильнее. Этим поршнем, разумеется, является гравитация. Кроме того, по мере сжатия меняются свойства материи: она становится всё горячее по мере того, как увеличивается её плотность. Сегодня средняя температура Вселенной всего 3 градуса выше абсолютного нуля, или  $-270$  °С. Но по мере того, как мы углубляемся в прошлое, температура Вселенной растёт — сначала до комнатной, потом до температуры кипения воды и, наконец, достигает температуры солнечной поверхности.

Температура Солнца настолько высока, что составляющие его атомы покидают солнечную фотосферу в результате интенсивного теплового движения. Атомные ядра при этой температуре остаются нетронутыми, но наиболее слабо связанные электроны отрываются от атомов и образуют вместе с потерявшими их ионами проводящий электричество газ, называемый *плазмой*<sup>1</sup>.

Электропроводящие материалы, как правило, непрозрачны. Свободно движущиеся электроны с лёгкостью поглощают или рассеивают свет. Именно интенсивное рассеяние света плазмой делает солнечную фотосферу непрозрачной. Однако по мере удаления от центра Солнца

<sup>1</sup> — это газ, состоящий из ионизованных атомов. Другими словами, часть электронов в плазме покидает свои атомы и ведёт самостоятельную жизнь.

наступает такой момент, когда температура и плотность солнечного вещества падают настолько, что вещество становится прозрачным. В этом состоит причина, по которой мы видим резкую границу солнечного диска.

Теперь отправимся в путешествие назад во времени и в глубины Вселенной, пока не достигнем оболочки, условия в которой сравнимы с условиями в солнечной фотосфере. Что же получается: самый древний свет, который мы регистрируем, излучается гигантской, похожей на солнечную поверхность, состоящей из горячей плазмы оболочкой, окружающей нас со всех сторон. Наблюдаемая сфера, соответствующая данному моменту, называется *поверхностью последнего рассеяния*. К сожалению, из-за непрозрачности плазмы это — самый удалённый объект, который можно наблюдать в электромагнитном спектре. Мы не можем заглянуть за эту поверхность, точно так же как не можем заглянуть внутрь солнечной фотосферы.

Непосредственно после Большого взрыва каждый кусочек поверхности последнего рассеяния был таким же горячим, как и поверхность Солнца. Естественно, возникает вопрос: «Почему, глядя на ночное небо, мы не видим окружающей нас сияющей сферы, состоящей из горячей плазмы?» Или, другими словами: «Почему всё ночное небо не светится так же ярко, как поверхность Солнца?» От ужасной перспективы быть зажаренными заживо нас спас эффект Доплера. Из-за хаббловского расширения плазма, излучающая этот свет, удаляется от нас с огромной скоростью. Используя закон Хаббла, мы можем рассчитать скорость удаления поверхности последнего рассеяния, и она окажется всего лишь на ничтожную величину меньше скорости света. Это означает, что испускаемый ею свет испытывает колоссальное красное смещение — далеко за инфракрасную часть спектра, в область микроволнового излучения. Здесь играет ключевую роль один из первых открытых квантово-механических законов: энергия фотона зависит от его длины волны, и фотон микроволнового излучения имеет в 1000 раз меньшую энергию, чем фотон видимого света. По этой причине фотоны, излучаемые поверхностью последнего рассеяния, достигают нас, имея не более  $1/1000$  своей первоначальной энергии. Они не регистрируются сетчаткой нашего глаза и могут быть обнаружены только при помощи радиотелескопов.

Существует ещё один способ понять, как происходит уменьшение энергии космического излучения к тому моменту, когда оно достигает нас. На поверхности последнего рассеяния было очень жарко: примерно так же жарко, как на поверхности Солнца. Излучённые этой поверхностью фотоны заполнили пространство, образуя своего рода фотонный газ, и он, как и все газы, расширяясь, охлаждается. Благодаря расширению Вселенной со времени Большого взрыва фотонный газ остыл настолько, что потерял большую часть своей энергии. Сегодня реликтовое излучение (микроволновый космический фон) очень холодное, его температура меньше чем на 3 градуса отличается от абсолютного нуля. Приведённые два объяснения потери мощности реликтовым излучением математически полностью эквивалентны.

Георгий Гамов — тот самый Гамов, который написал книгу «Раз, два, три ... бесконечность», вдохновившую столько детей моего поколения заняться наукой, был первым учёным, предложившим гипотезу Большого взрыва. Вскоре двое его молодых коллег, Ральф Альфер и Роберт Герман, выдвинули идею о реликтовом излучении, оставшемся от эпохи горячей Вселенной. Они даже предсказали температуру этого излучения — 5 градусов выше абсолютного нуля, что всего лишь на два градуса отличается от наблюдаемого значения. Но физики того времени не верили, что столь слабое излучение когда-либо удастся зарегистрировать. И они ошибались, ибо уже в 1963 году микроволновый космический фон был обнаружен.

В то время Принстонский космолог Роберт Дикке разрабатывал эксперимент, который позволил бы измерить космический микроволновый фон, оставшийся от Большого взрыва. Пока он строил свой детектор, двое молодых учёных из Лаборатории Белла провели именно тот эксперимент, который планировал Дикке. Арно Пензиас и Роберт Вильсон сканировали небо вовсе не в поисках реликтового излучения, а с исключительно утилитарными целями в ходе работы над телекоммуникационными технологиями. Им никак не удавалось идентифицировать странный микроволновый фон, который мешал работать системам связи. Согласно легенде, они предполагали, что источником фона является птичий помёт.

Принстонский университет и Лаборатория Белла находятся недалеко друг от друга в центральной части Нью-Джерси, и словно по воле

судьбы Дикке случайно узнал о проблемах Пензиаса и Вильсона и догадался, что они «слышат» микроволновое эхо Большого взрыва! Дикке связался с учёными из Лаборатории Белла и изложил им свою версию наблюдаемого явления. Впоследствии Пензиас и Вильсон получили за открытие микроволнового фона Нобелевскую премию. Это была действительно рука судьбы, потому что будь Принстонский университет и Лаборатория Белла дальше друг от друга, Дикке, возможно, закончил бы свой эксперимент и оказался первым, сделавшим это открытие.

Детектор Пензиаса и Вильсона был грубой громоздкой конструкцией, установленной на крыше Лаборатории Белла. Современные детекторы микроволнового излучения обладают высокой чувствительностью и сложными цепями обработки сигнала и устанавливаются, как правило, на космических аппаратах, находящихся далеко за пределами земной атмосферы. Эти детекторы способны избирательно улавливать реликтовое излучение, исходящее с одного направления, и с их помощью была построена детальная карта микроволнового фона.

Одной из самых ярких особенностей карты реликтового излучения является отсутствие на ней ярких особенностей. Реликтовое излучение в очень высокой степени изотропно. При взгляде на карту, кажется, что в начале времён Вселенная была почти идеально однородной и изотропной. Приходящее с поверхности последнего рассеяния реликтовое излучение практически одинаково в любой точке неба. Этот факт чрезвычайной степени изотропности реликтового излучения несколько озадачивает и требует объяснения.

Какой бы гладкой ни была Вселенная в это раннее время, она не могла быть идеально гладкой. В ней обязательно должны были присутствовать небольшие изначальные неоднородности, которые в последующем послужили затравками для формирования галактик. Если бы эти «зёрна» были слишком малы, галактики не смогли бы сформироваться, но если бы они были слишком велики, всё вещество сконденсировалось бы на них и рухнуло в чёрные дыры. Космологи абсолютно уверены, что под этим унылым однородным фоном скрываются семена будущих галактик. Более того, они даже вычислили, насколько велики должны быть первоначальные неоднородности, чтобы привести к возникновению наблюдаемых сегодня галактик: разница между ин-

тенсивностью микроволнового фона в разных направлениях должна быть примерно в сто тысяч раз меньше, чем его средняя интенсивность.

Каким же образом, спросите вы, зарегистрировать на Земле столь исчезающе малый контраст? Ответ в том, что нужно заниматься этим не на Земле. На Земле слишком большой уровень засорённости эфира всевозможными электрическими и радиопередающими устройствами. Правда, самые первые эксперименты по обнаружению вариаций фона реликтового излучения были всё же проведены на Земле, но детектор был помещён на стратостат, запускаемый с Южного полюса. Южный полюс хорошо подходит для этой цели по ряду причин, не последней из которых является то, что стратостат не улетит слишком далеко от точки запуска. Преобладающие ветра, конечно же, унесут стратостат в *кругосветное* путешествие, но это путешествие не будет очень длинным, если вы находитесь на Южном полюсе. Поэтому эксперимент был назван «Бумеранг»!

Высоко над Южным полюсом детекторы микроволнового излучения измеряли его интенсивность в двух направлениях и автоматически вычисляли разницу. Теоретики затаили дыхание — но никто не знал точно, выйдет ли что-нибудь интересное из этой затеи. Возможно, небо останется унылым, однородным и серым, и им придётся вернуться к чертёжным доскам и заняться редизайном теории формирования галактики. Все, кто имел хотя бы какой-нибудь интерес к космологии, ждали вердикта присяжных. Приговор оправдал все чаяния адвокатов. Теоретики были правы. Космическая овсянка действительно оказалась комковатой, и относительная величина этих комков была именно такой, какая предсказывалась:  $10^{-5}$  — одна стотысячная.

Космическое пространство — ещё лучшее место для измерения фона космического микроволнового излучения. Данные, полученные с орбитального космического аппарата Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, часто называемого WMAP (дабл-ю-мап), оказались настолько точными, что позволили не только подтвердить существование неоднородностей величиной в  $10^{-5}$ , но и привели к открытию колебательных движений огромных осциллирующих пузырей горячей плазмы, образующей поверхность последнего рассеяния.

Открытие этих огромных пузырей синхронно движущейся плазмы вовсе не было неожиданностью. Космологи давно предсказывали, что

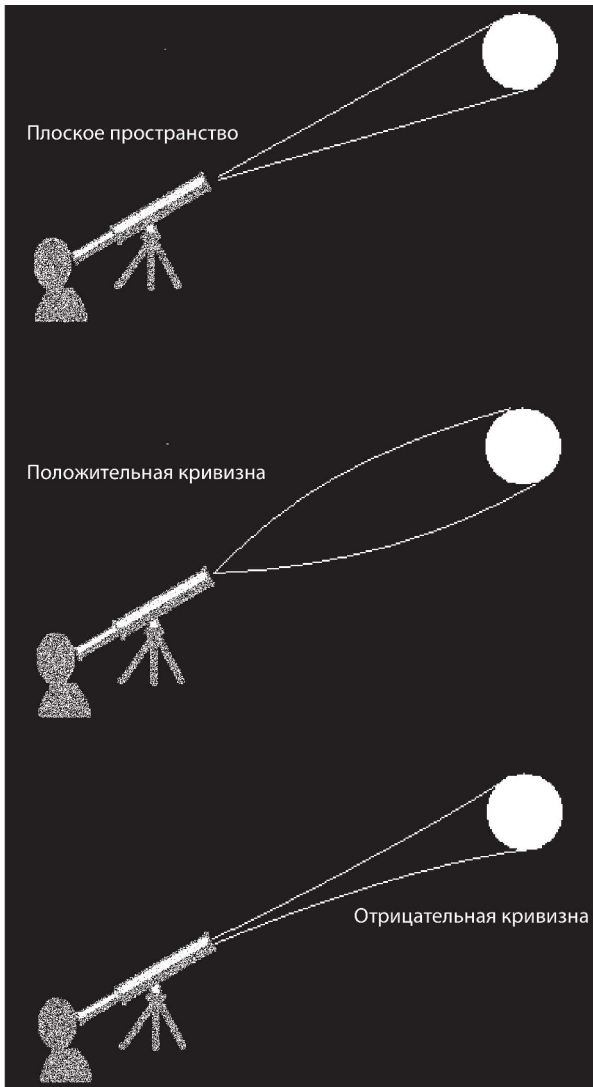
Вселенной приведёт к началу образования плазменных комков, вибрирующих подобно церковным колоколам. Всё начинается с маленьких сгустков, соединяющихся друг с другом по мере расширения. Затем они объединяются в ещё более крупные сгустки, осциллирующие с меньшей частотой и т. д., формируя прекрасно предсказуемую симфонию. Подробные расчёты показывают, что в каждый конкретный момент времени крупнейшие осциллирующие сгустки должны иметь строго определённый размер. Таким образом, когда WMAP «увидел» эти колеблющиеся капли, космологи уже представляли, какой размер должны иметь самые крупные из них.

Знания о размере крупнейших осциллирующих сгустков дали нам в руки выигрышный билет: теперь стало возможным построить гигантский космический треугольник и измерить кривизну пространства. Вот как это было сделано.

Предположим, что вы знаете размер объекта и расстояние до него. В этом случае вы можете предсказать, под каким углом будет виден этот объект на небесной сфере. Возьмём Луну. Диаметр Луны составляет около 3500 километров, а расстояние до Луны — 384 000 километров. Зная это, я без труда вычислю, что лунный диск будет виден на небе под углом примерно в полградуса. По удивительному совпадению Солнце в 400 раз больше Луны, но при этом оно находится в 400 раз дальше. В результате Солнце и Луна видны на небе как диски одинаковой величины под углом в полградуса. Если бы мы посмотрели с Луны на Землю, которая имеет диаметр 12 800 километров, то есть почти в четыре раза больше Луны, то увидели бы земной диск под углом примерно в два градуса.

Проделывая эти вычисления, я предположил, что пространство плоское. Представьте, что диаметр Луны — это одна из сторон треугольника. Две другие стороны образованы прямыми линиями, проведёнными от крайних точек диаметра Луны к наблюдателю.

Если пространство между Землёй и Луной плоское, то мои вычисления верны. Но если пространство искривлено, то ситуация меняется. Например, в случае положительной кривизны пространства угол, под которым будет видна Луна с Земли, окажется больше половины градуса, если же кривизна пространства отрицательна, то соответствующий угол будет меньше, чем полградуса.



Теперь предположим, что мы независимым способом измерили диаметр Луны и расстояние до неё. Тогда на основании видимого углового размера Луны можно сделать заключение о кривизне пространства. С очень высокой степенью точности пространство между Землёй и Луной оказывается плоским.



Вернёмся к нашим космическим геодезистам. Мы знаем, что наибольший размер осциллирующих пузырей в момент времени, соответствующий образованию реликтового излучения, составляет порядка 200 000 световых лет. Пузыри большего размера в тот момент ещё не начали образовываться.

Сегодня источник космического микроволнового излучения находится от нас на расстоянии около 10 миллиардов световых лет, но в то время, когда это излучение только начало своё путешествие, расстояние от того места, где мы сейчас находимся, до поверхности последнего рассеяния было в тысячу раз меньше, то есть 10 миллионов световых лет. Этого достаточно для вычисления угла, под которым должен наблюдаться диаметр наибольших пузырей WMAP, если пространство является плоским. Этот угол будет порядка двух градусов, то есть пузыри должны быть такого же углового размера, как Земля с Луны. Если же пространство не является плоским, то угловой размер пузырей покажет нам, в какую сторону оно искривлено.

Что же показали данные WMAP? Они показали правоту Евклида! Пространство — плоское.

Позвольте мне сделать небольшое лирическое отступление. Путём измерения треугольников на поверхности Земли можно показать, что она имеет форму сферы. Но на практике, до тех пор пока треугольники, которые мы строим, не слишком велики, мы обнаруживаем, что результаты наших измерений оказываются такими, как будто Земля плоская. Очевидно, что Колумб не мог бы убедить короля Испании в том, что Земля круглая, нарисовав несколько треугольников во дворе королевского дворца. Ему потребовалось бы построить треугольник со сторонами, по крайней мере, в несколько сотен километров, и даже тогда результаты измерений суммы углов отличались бы от 180 градусов на очень малую величину. Все, что мог сказать Колумб на основании своих геодезических изысканий, — это то, что Земля очень большая.

То же самое верно и в отношении космических геодезистов: всё, что они могут сказать, — это то, что Вселенная выглядит плоской на масштабах от 10 до 20 миллиардов световых лет. Это означает, что если Вселенная конечна, то она простирается гораздо дальше, чем мы можем видеть.



Итак, что же мы знаем? Обычной материи, образующей звёзды и газово-пылевые облака, недостаточно для того, чтобы сделать Вселенную плоской. По первоначальным данным её было в 50 раз меньше, чем нужно. Но космология уже давно стала точной количественной наукой, и по сегодняшним меркам обычная материя — это ещё не всё, что есть во Вселенной. Без других, скрытых от прямого наблюдения, форм материи Вселенная будет открытой и с отрицательной кривизной. Но количество материи во Вселенной примерно в 10 раз больше, чем мы непосредственно наблюдаем, и эта тёмная материя проявляет себя своим гравитационным полем. В состав тёмной материи могут входить новые элементарные частицы, которые вряд ли взаимодействуют с обычным веществом. Эти частицы должны заполнять галактики, беспрепятственно пролетая сквозь звёзды, планеты и даже сквозь нас. Но и их недостаточно, чтобы сделать Вселенную плоской или закрытой. Поскольку Вселенная плоская, то в ней должен присутствовать ещё один вид массы или энергии, пронизывающей всё пространство.

Возраст Вселенной оказывается слишком мал, если только история её расширения не отличается от вычисляемой на основе предположения, что в ней существует только обычная и тёмная материя. Единственное общепринятое на сегодня объяснение состоит в признании существования ненулевой космологической постоянной, ускоряющей расширение Вселенной. Совершенно неожиданно факт ускоренного расширения Вселенной был подтверждён наблюдениями вспышек сверхновых I типа, которые, как в пущенном задом наперёд кинофильме, разворачивают перед нами историю эволюции Вселенной. Самое лучшее объяснение парадокса возраста Вселенной состоит во введении в уравнения Эйнштейна космологической постоянной, значение которой совпадает с предсказанным Вайнбергом на основе антропного принципа.

Данные о космическом микроволновом фоне неопровержимо свидетельствуют, что ранняя Вселенная была чрезвычайно однородна. Кроме того, эти данные позволяют нам построить гигантский космический треугольник, результаты измерения которого говорят о том, что пространство Вселенной плоское. Из этого следует, что Вселенная гораздо больше, чем её наблюдаемая часть, и что её расширение ускоряется под влиянием очень малой космологической постоянной.

## Инфляция

В Соединённых Штатах стали привычными шутки на тему того, как коммунистическая пропаганда уверяла, что всё, что когда-либо было изобретено на земле, было изобретено в России: радио, телевидение, лампочка накаливания, самолёт, абстрактная живопись и даже бейсбол. Однако в области физики некоторые из этих шуток оказались правдой. Советские физики так долго пребывали в изоляции от остального научного мира, что многие из их чрезвычайно важных открытий остались неизвестными на Западе, например замечательная гипотеза о начале расширения Вселенной. Более четверти века тому назад молодой космолог Алексей Старобинский сформулировал теорию, называемую *инфляционной*. Инфляция — возможно, важнейшее космологическое открытие после Большого взрыва, но только несколько советских учёных в то время смогли оценить эту потрясающую идею. Никто в Соединённых Штатах ничего не знал об инфляционной теории, пока значительно позже молодой «пост-док» в моём университете не переоткрыл её.

Свежеиспечённый доктор философии Алан Гут, специалист в области высокоэнергетической теоретической физики, работал в то время в Стэнфордском центре линейного ускорителя (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC). Когда я впервые встретился с ним в 1980 году, он был ярким молодым физиком, написавшим несколько работ по текущим проблемам. В то время только несколько специалистов в области элементарных частиц разбирались в космологии. Я входил в их число, поскольку двумя годами ранее работал с Савасом Димопулосом над проблемой преобладания в природе частиц над античастицами. Мой друг Боб Вагнер тогда спросил меня, имеется ли у теории элементарных частиц какое-нибудь объяснение преобладания материи над антиматерией. У нас с Димопулосом была правильная идея, но мы были полными профанами в космологии, настолько, что путали размер горизонта с масштабным фактором. Это всё равно, как если бы автомеханик не мог отличить рулевого колеса от ведущего. Но под крылом Боба мы быстро ликвидировали свою безграмотность и в конце концов написали первую за пределами СССР статью о барионном синтезе. Вы будете смеяться, но барионный синтез тоже был открыт в СССР. И сделал это ещё за 12 лет до нас не кто иной, как Андрей Сахаров.

В общем, я уже кое-что знал о космологии, когда Алан пришёл в SLAC. Хотя мы и были дружны, я не знал, что он тоже ею интересуется. То есть я не знал этого, пока он не провёл семинар о чём-то, что он назвал «инфляционной космологией». Думаю, что я был одним из двоих или троих слушателей, кто смог по-настоящему оценить эту идею.

Алан дал ответ на один из сложнейших вопросов: «Почему Вселенная настолько огромная и плоская и настолько однородная?» Чтобы понять, в чём сложность этого вопроса, вернёмся к реликтовому излучению и посмотрим на две различные точки на небе. В те времена, когда реликтовое излучение рождалось горячей плазмой, эти две точки находились на определённом расстоянии друг от друга. Фактически если на небесной сфере эти точки разделяет угловое расстояние в несколько градусов, то в момент рождения реликтового излучения физическое расстояние между ними было настолько большим, что ни свет, ни любой другой сигнал не мог дойти от одной точки до другой. Вселенная в то время насчитывала около полумиллиона лет, так что если точки разделяло расстояние более полумиллиона световых лет, вещество в одной точке не могло взаимодействовать с веществом в другой. Но если вещество в этих точках никогда не взаимодействовало, то что сделало эти два места так похожими одно на другое? Иными словами, каким образом Вселенная ухитрилась стать настолько однородной, чтобы интенсивность реликтового излучения была почти одинаковой во всех направлениях?

Чтобы прояснить это место, вернёмся к аналогии, представляющей Вселенную в виде надувающегося воздушного шарика. Представьте себе шарик в сдутом состоянии, сморщенный, как чернослив. По мере надувания шарика морщины начинают расправляться. Первыми расправляются мелкие морщины, затем более крупные. Для разглаживания морщины заданного размера необходимо определённое время, требуемое для того, чтобы разглаживающая её волна прошла расстояние, равное размеру морщины. В случае Вселенной это время, которое требуется свету, чтобы преодолеть расстояние, равное размеру разглаживаемой неоднородности.

Если в эпоху генерации реликтового излучения большие морщины не успевали разгладиться, то мы должны видеть их отпечатки на небесной сфере в виде неоднородностей реликтового фона. Но мы не

Что же сделало Вселенную такой гладкой? Не скрывается ли за непрозрачной плазмой поверхности последнего рассеяния недоступная нашему взгляду длинная предыстория, в ходе которой были разглажены все морщины? Именно эту предысторию и описывает инфляционная теория.

Объяснение Аланом плоскости и гладкости ранней Вселенной оказалось очень простым (точно таким же, как и объяснение Старобинского). Вселенная была надута, как воздушный шарик, только это был не совсем обычный воздушный шарик. Обычный воздушный шарик, если его сильно надуть, лопнет. Вселенная Алана раздувалась *экспоненциально* и за очень короткое время стала невероятно огромной. Инфляционная стадия, образно выражаясь, предшествовала обычной космологии. К тому времени, как начался процесс, который мы называем Большим взрывом, Вселенная уже достигла невероятных размеров. И в процессе инфляционной стадии расширения все морщины и неоднородности разгладились настолько, что сделали Вселенную чрезвычайно гладкой.

Я знал, что эта идея очень хороша, но я даже не представлял, насколько она хороша. Я думаю, что даже Алан не догадывался, насколько она хороша. И уж конечно, никто не мог и предположить, что в течение последующих 25 лет инфляционная теория будет занимать центральное место в космологической «стандартной модели».

Чтобы понять механизм, ответственный за инфляционную стадию, следует разобраться, как ведёт себя Вселенная с положительной космологической постоянной. Вспомните, что положительная космологическая постоянная ответственна за появление отталкивающей силы, пропорциональной расстоянию. Эта сила заставляет галактики разбегаться друг от друга, а это происходит, только если шар, на котором они нарисованы, — то есть само пространство, — раздувается.

Энергия вакуума, или, что то же самое, масса вакуума, имеет необычные свойства. Плотность обычного вещества, такого, из которого состоят галактики, уменьшается по мере расширения Вселенной. Средняя плотность обычного вещества во Вселенной составляет примерно один протон на кубический метр. Предположим, что через какое-то количество миллиардов лет радиус Вселенной удвоился, в то время как общее количество протонов в ней не изменилось. В этом случае средняя плот-

Вселенной уменьшится в восемь раз. Если удвоить радиус Вселенной ещё раз, то среднее число протонов в кубическом метре уменьшится ещё в восемь раз и составит  $1/64$  от современной величины. То же самое верно и в отношении тёмной материи.

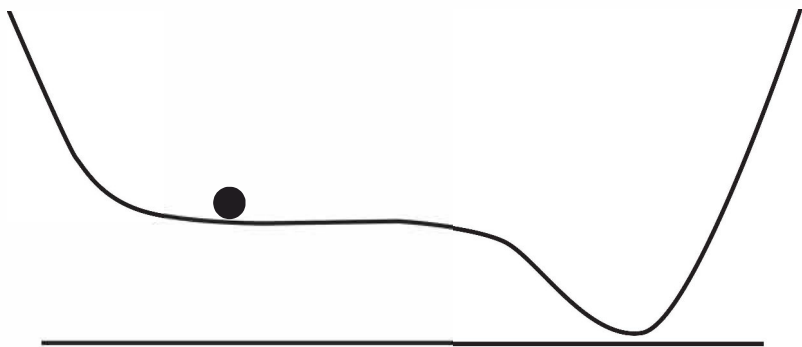
Но энергия вакуума ведёт себя совершенно по-другому. Она является свойством пустого пространства, и когда пустое пространство расширяется, оно остаётся всё тем же пустым пространством, и плотность энергии вакуума в нём не изменяется. Независимо от того, сколько раз вы удвоите размер Вселенной, плотность энергии вакуума останется той же самой и создаваемая ею сила отталкивания не уменьшится!

Обычная материя, напротив, редет и в конце концов перестаёт оказывать сколько-нибудь заметный эффект на замедление расширения. На определённом этапе расширения плотность всех видов энергии будет ничтожно мала, за исключением плотности энергии вакуума. Когда это произойдёт, не останется ничего, что могло бы противодействовать отталкивающей силе энергии вакуума, и Вселенная будет расширяться экспоненциально. Если бы космологическая постоянная была достаточно велика, чтобы удвоить размер Вселенной за одну секунду (сейчас это не так), через две секунды Вселенная стала бы уже вчетверо больше, через три секунды — в восемь раз больше, через четыре — в 16 раз, через пять — в 32 раза и т. д. Предметы, находившиеся рядом с нами, будут подобно ракетам разлетаться во все стороны со скоростью, во много раз превышающей скорость света.

Реальная Вселенная сейчас находится на самой ранней стадии такого экспоненциального расширения. Но это не должно слишком сильно вас беспокоить, потому что величина космологической постоянной такова, что размер Вселенной удвоится лишь в течение десятков миллиардов лет. Но представьте себе, что по неизвестной причине в очень ранней Вселенной космологическая постоянная была намного больше, чем сегодня, возможно, на сотню порядков. Это может выглядеть странным мысленным экспериментом, но вспомните, насколько трудно было понять, почему сегодня космологическая постоянная так смехотворно мала. А если сделать её на 100 порядков больше, то она приобретёт, по крайней мере с позиции физиков-теоретиков, своё нормальное значение.

Если космологическая постоянная в те доисторические времена была так велика, она должна была привести к тому, что размеры Вселенной удваивались за ничтожную долю секунды, а за одну секунду Вселенная должна была увеличиться от размеров протона до размеров, во много раз превышающих наблюдаемую ныне часть Вселенной. Это и есть та инфляция, которую описали Старобинский и Гут.

Читатель может задаться вопросом, на каком основании я столь лицемерно позволяю себе говорить о различных космологических постоянных в начале и в конце истории Вселенной, то есть в инфляционную эпоху и в нынешнюю. В конце концов, разве постоянная не должна быть постоянной? Давайте остановимся и вспомним о *ландшафте*. Космологическая постоянная в данном месте ландшафта является не чем иным, как высотой местности. Один рисунок фрагмента ландшафта объяснит это красноречивее тысячи слов<sup>1</sup>. На этом рисунке приведена очень упрощённая модель ландшафта, похожего на тот, что существует в нашей ближайшей окрестности. Маленький шарик представляет Вселенную, которая катится в поисках долины, где энергия вакуума является минимальной.



Относительно широкое и высокое плато, оканчивающееся глубокой долиной почти нулевой высоты (где и начинается инфляция Гута),

<sup>1</sup> На рисунке изображён одномерный ландшафт, хотя в действительности он, конечно же, многомерный. Представьте себе, что я изобразил одномерный срез намного более сложной многомерной картины. Ближайшей аналогией будет профиль высоты одномерной дороги, пересекающей реальную двумерную земную поверхность.

представляет неизвестное нам прошлое Вселенной, которая изображена в виде шарика. Как Вселенная оказалась на этом плато — отдельный вопрос. Плато очень пологое, поэтому первоначально Вселенная катится по нему очень медленно. Пока Вселенная остаётся на плато, плотность энергии вакуума (высота плато) остаётся практически неизменной. Иначе говоря, высоту можно рассматривать в качестве космологической постоянной.

Уверен, вы уже догадались, что по мере движения по плато Вселенная расширяется, поскольку энергия вакуума велика и положительна. Если плато достаточно плоское и Вселенная катится по нему медленно, она удвоит свои размеры много раз, прежде чем скатится вниз в долину. Это и есть эпоха инфляционного расширения, только в более современной форме, чем впервые описанная Старобинским и Гуттом. Если Вселенная удвоит свои размеры сто или более раз на протяжении этой стадии, то она вырастет до таких невероятных масштабов, что будет всюду гладкой и однородной, как того и требуют данные наблюдений реликтового излучения.

В конце концов скольжение по плато приведёт Вселенную на его край, откуда она скатится в долину, где и останется вплоть до настоящего времени. Если высота низшей точки долины не совсем нулевая, то в течение последующего длительного времени Вселенная будет иметь небольшую космологическую постоянную. Если по счастливому стечению обстоятельств космологическая постоянная в долине окажется достаточно мала и прочие фундаментальные константы тоже подобраны аккуратно, то в этом кармане сформируются галактики, звёзды и планеты и, возможно, возникнет жизнь. Если нет, то карман останется стерильным. Во всех известных мне космологических моделях присутствует этот процесс скатывания Вселенной из области с большой космологической постоянной в область с малой. Может ли кто-нибудь серьёзно сомневаться в том, что в истории и географии Вселенной есть что-то ещё, кроме этого краткого эпизода и этого крошечного кармана?

Но погодите! Кое-что неправильно в этой картинке. Если Вселенная на инфляционной стадии расширяется настолько сильно, то следует ожидать, что она будет невероятно однородной. Морщины расправятся настолько сильно, что не останется вообще никаких неоднородностей



фона реликтового излучения. Но мы уже знаем, что без небольших неоднородностей не смогли бы сформироваться галактики и Вселенная осталась бы гладкой на неопределённый срок. Мы, похоже, переложили гомогенизатора в нашу овсяную кашу.

Решение этой головоломки содержит столь радикальную и удивительную идею, что поначалу возникает соблазн отбросить её как «журавля в небе». Но она выдержала испытание временем и в настоящее время представляет собой один из краеугольных камней современной космологии. И опять честь первооткрывателя принадлежала молодому советскому космологу Вячеславу Муханову, изучавшему работы Старобинского. История повторяется: теория Муханова оставалась неизвестной за пределами СССР, пока её независимо не переоткрыли несколько групп, работавших в США.

Квантовая механика и её волнующие открытия обычно рассматриваются как нечто, описывающее явления микромира, но никак не мира галактик и явлений космического масштаба. И вот теперь выясняется, что если не все, то некоторые из галактик и других крупномасштабных структур являются остатками первичных квантовых флуктуаций, которые растянуты до космических масштабов неудержимо расширяющейся на инфляционной стадии Вселенной и усилены безжалостной гравитацией.

Представление Вселенной в виде точки на космическом Ландшафте слишком упрощённо. Как и все прочие квантовые поля, поле Хиггса тоже подвержено квантовой дрожи. Квантовая механика утверждает, что все поля флуктуируют в пространстве от точки к точке. Никакая инфляция не способна полностью сгладить квантовые флуктуации, которые присущи любому полю. Это верно и для нашего сегодняшнего вакуума, и было верно в эпоху быстрого экспоненциального расширения. Но быстрая инфляция делает с этими колебаниями нечто, что никогда не происходит (в заметной степени) в нашей сегодняшней медленно расширяющейся Вселенной, — она разглаживает старые морщины, но на их месте тут же возникают новые. Новые морщины возникают поверх старых и в свою очередь тоже растягиваются в течение всего времени расширения Вселенной. К моменту завершения инфляционной фазы, когда Вселенная начинает падать в долину, накопленные квантовые морщины формируют узор из вариаций плотности, из которого в конечном итоге образуются галактики.



Эти замороженные квантовые морщины отпечатываются на поверхности последнего рассеяния, приводя к наблюдаемым небольшим изменениям фона реликтового излучения. Обнаружение связи между квантовой теорией, описывающей микромир, и крупномасштабными астрономическими структурами макромира является одним из величайших достижений космологии.

Заканчивая эту главу, я хочу сформулировать два наиболее важных вывода, которые вытекают из космологических наблюдений в течение последнего десятилетия. Во-первых, мы узнали шокирующую новость: космологическая постоянная действительно существует. Её первые 119 десятичных знаков равны нулю, но в 120-м разряде появляются значащие цифры!

Во-вторых, выяснилось, что инфляционная теория имеет наблюдательное подтверждение в виде изменений космического микроволнового фонового излучения. Очевидно, что Вселенная в течение некоторого периода времени расширялась экспоненциально, а это, в свою очередь, означает, что вся Вселенная на много, много порядков больше, чем наблюдаемая нами её часть.

Эти два великих открытия выглядят весьма тревожными. Если мы запустим руку в мешок, наполненный случайными числами, и вытащим оттуда пригоршню фундаментальных физических констант, то среди них с почти стопроцентной вероятностью не окажется ни малой космологической постоянной, ни подходящего времени инфляционной фазы. Оба числа требуют невероятно точной настройки. Как мы уже видели ранее, Вселенная выглядит так, будто была специально спроектирована для нас.

Но об этом в следующей главе.



## Глава 6

# О МОРОЖЕНОЙ И ВАРЁНОЙ РЫБЕ

Очевидно, что при рассказе о физике аудитории, состоящей из нефизиков, всевозможные аналогии и метафоры часто оказываются поистине бесценными. Но для меня они также являются мощными мыслительными инструментами — моими собственными идиосинкратическими инструментами. Часто, чтобы убедить самого себя в справедливости какой-нибудь очень сложной точки зрения, я изобретаю аналогии, которые позволяют легко увидеть решение проблемы с неожиданного ракурса.

Антропный принцип создал больше путаницы и философских заблуждений, чем что-либо ещё, порождённое наукой в течение последнего времени. До сих пор идут непрекращающиеся споры о том, в чём состоит смысл этого принципа, как он должен применяться, когда его применение является оправданным, а когда нет, в каких случаях апелляция к антропному принципу разумна, а в каких бессмысленна. Для меня испытанный путь — найти знакомую аналогию, в которой можно извлечь здравый смысл из воздуха. Более десяти лет тому назад я придумал притчу, для того чтобы убедить самого себя в том, что антропный принцип может иметь хоть какой-нибудь смысл.

## Подарок для Тини

У известных физиков существует старая традиция организовывать на своё шестидесятилетие большую вечеринку, только эти вечеринки обычно продолжаются несколько дней и состоят из непрерывной череды физических семинаров — и проходят без музыки. На одной такой вечеринке моего старого друга Мартинуса Велмана я должен был прочитать лекцию. Голландец Тини, волосатый и бородатый, как сказочный людоед, напоминает гибрид Орсона Уэллса в роли Макбета и Саддама Хусейна. Недавно Тини вместе с Герардом 'т Хоофтом получил Нобелевскую премию за прояснение квантовой структуры электро-слабых взаимодействий.

Тини был одним из первых, кто признал существование проблемы энергии вакуума, и я собирался назвать свою лекцию: «Тини и космологическая постоянная». Мне хотелось поговорить об антропном принципе, о расчёте формирования галактик, выполненном Стивом Вайнбергом. Но помимо этого я хотел объяснить, каким способом можно придать антропному принципу научный смысл. А для этого, как всегда, я использовал аналогию.

Вместо того чтобы задаваться вопросом, почему космологическая постоянная так тонко настроена, я сформулировал аналогичный вопрос: почему так тонко настроена температура земной поверхности, на которой может существовать жидкая вода? Оба этих вопроса по сути об одном и том же: как так случилось, что мы живём в среде, свойства которой находятся в очень узком диапазоне, идеально приспособленном для нашего существования. Чтобы ответить на них, я предложил следующую притчу о мудрой рыбе<sup>1</sup>.

## История рыбы

Давным-давно на планете, полностью покрытой водой, обитала раса очень умных рыб. Эти рыбы могли жить только на определённой глубине, и никто из них никогда не видел поверхности моря или его дна.

---

<sup>1</sup> Эта история была позже опубликована в журнале *The New Scientist* 1 ноября 2003 года.

Но они были очень умными, а кроме того, очень любопытными. Время от времени рыбы задавались очень сложными вопросами о природе воды и о других не менее интересных вещах. Самые талантливые среди них именовались фишиками. Фишики были настолько умными, что за нескольких поколений пришли к пониманию многих явлений природы из области гидродинамики, химии, атомной физики и даже физики атомного ядра.

В конце концов некоторые из фишиков стали задаваться вопросом, почему законы природы такие, какие они есть. Их сложные технологии позволили изучать воду во всех её формах — в виде льда, пара и, разумеется, жидкого состояния. Но один вопрос постоянно ставил их в тупик. Они не могли понять, почему в то время как вода может существовать в разных состояниях при разных температурах от нуля до бесконечности, температура среды их обитания как будто специально настроена в таком узком диапазоне, в котором вода существует в жидкой фазе. Они пытались привлечь для объяснения разные идеи, включая различные типы симметрии, механизм динамической релаксации и т. п. Но безуспешно.

С фишиками была тесно связана ещё одна группа исследователей, именовавших себя осетрологами, также изучавшая водный мир. Осетрологов не столько интересовали обычные глубины, на которых обитали умные рыбы, сколько вопрос о существовании верхней границы их мира. Осетрологи знали, что большая часть их водного мира непригодна для разумной жизни, потому что изменение давления смертельно для их большего мозга. Если бы они попытались подняться наверх, то из-за уменьшения давления воды их мозг мог просто взорваться изнутри. Всё, что им оставалось, — это рассуждать.

Так случилось, что в те времена существовала одна осетрологическая школа, последователи которой сформулировали весьма радикальную идею (некоторым она показалась смешной) о тонкой настройке температуры. Они назвали эту идею ихтиотропным принципом. Ихтиотропный принцип утверждал, что причина того, что температура среды их обитания находится в диапазоне, соответствующем жидкой фазе воды, в том, что только в этом случае может существовать рыба, способная сформулировать этот принцип!

«Бредятина! — возмутились фишки, — это не наука. Это религия. Просто данность. Более того, если мы согласимся с вами, другие рыбы станут над нами смеяться, а то ещё, чего доброго, лишат нас финансирования». К тому же не все осетрологи понимали под ихтиотропным принципом одно и то же. Более того, было трудно найти двух осетрологов, которые соглашались бы друг с другом. Одни считали, что смысл ихтиотропного принципа в том, что рыба-ангел создала мир с единственной целью предоставить умным рыбам место для проживания. Другие утверждали, что квантовая волновая функция Водоверсума является суперпозицией всех значений температуры, а акт наблюдения, произведённый некими предками рыб, вызвал «редукцию волновой функции».

Небольшая группа осетрологов во главе с Андреем Большоголовым и Александром Глубокодумающим придерживалась и вовсе необычной гипотезы. Они считали, что за пределами верхней границы их водного мира существует колоссальное пространство. И в этом гигантском пространстве может существовать множество других миров, в каком-то смысле аналогичных их миру, но с самыми разнообразными условиями. Некоторые миры являются невероятно горячими. Настолько горячими, что ядра водорода, который, как известно, входит в состав воды, сливаются вместе, образуя ядра гелия, и от этого становится ещё горячее. Другие миры настолько холодны, что в них может существовать даже замороженный водород. И только очень небольшая часть миров находится в диапазоне температур, допускающих развитие жизни и появление рыб. Тогда никакой загадки в тонкой настройке температуры нет. Любой рыбовод знает, что большинство мест являются безрыбными, но кое-где условия оказываются благоприятными — в них-то рыба и водится.

Но фишки на это только вздыхали: «О господи, опять они со своими рыбацкими рассказами! Не обращайтесь на них внимания».

Конец.

Мою притчу ожидал оглушительный провал. В ходе семинара слышались громкие вздохи и стоны аудитории, и до конца вечеринки участники старались избегать меня. Тини тоже не впечатлился. Антропный принцип оказывает на большинство физиков-теоретиков такое же действие, так полный туристов джип на разъярённого слона.

## Антропные Ландшафты

Всякий, кто хоть что-нибудь смыслит в астрономии, не подумает усомниться в правоте осетрологов. История науки говорит нам, что существуют ситуации, в которых антропное (или ихтиотропное) объяснение имеет смысл. Но как узнать, когда это так? К каким случаям применима антропная аргументация, а в каких она неуместна? Нам необходимы какие-то руководящие принципы.

Начнём с очевидного: антропное объяснение факта  $X$  может иметь смысл, только если есть серьёзные основания полагать, что если бы  $X$  был иным, то существование разумной жизни было бы невозможно. Для умных рыб всё понятно: слишком жарко — и мы получаем рыбный суп; слишком холодно — и у нас склад мороженой рыбы. Вайнберг привёл аналогичные рассуждения в отношении космологической постоянной.

Если задуматься об условиях, необходимых для возможности существования жизни, то Ландшафт превращается в кошмарное минное поле. Я уже рассказывал, насколько фатальной является слишком большая космологическая постоянная, но существует и множество других опасностей. Требования, предъявляемые к вселенной, можно разделить на три категории. Законы Физики должны допускать существование органических соединений; основные химические вещества должны присутствовать в достаточном количестве; эволюция вселенной должна приводить к возникновению больших, гладких и долгоживущих, пригодных для жизни поверхностей (планет) с мягкими природными условиями.

Жизнь — это химический процесс. Что-то в природе атомов заставляет их собираться в самые причудливые конфигурации: гигантские молекулы жизни — ДНК, РНК, сотни белков и прочие. Хотя химия обычно рассматривается как отдельная научная дисциплина — она имеет собственные университетские факультеты и научные журналы, — на самом деле это раздел физики, который имеет дело с внешними атомными электронами. Эти *валентные* электроны, прыгая туда-сюда или обобществляясь между атомами, ответственны за удивительные способности атомов соединяться в разнообразные молекулы.

Как же получается, что Законы Физики позволяют таким потрясающе сложным структурам, как ДНК, существовать длительное время,

не разрушаясь при столкновении друг с другом или под действием иных внешних воздействий? В какой-то степени это просто везение.

Как мы помним из первой главы, Законы Физики начинаются со списка элементарных частиц: электронов, кварков, фотонов, нейтрино и прочих, каждая из которых обладает индивидуальными свойствами, такими как масса или электрический заряд. Никто не знает, почему список элементарных частиц именно такой или почему частицы обладают именно такими свойствами. Возможно бесконечное количество других списков, но Вселенная, содержащая в себе живых существ, представляет собой совсем не то, что можно было бы ожидать от случайного набора частиц со случайными свойствами. Удаление любой частицы из списка (электрона, кварка или фотона) и даже незначительное изменение её свойств приведёт к невозможности существования обычной химии.

Это очевидно в отношении электронов и кварков, из которых состоят атомы и атомные ядра, но, возможно, не столь очевидно в отношении фотона. Фотоны — это крошечные «пули», из которых состоит свет. Разумеется, без них мы не могли бы видеть, но ведь остаются слух и обоняние, так что, возможно, фотон не так важен, как электрон или кварки? Это большая ошибка. Фотоны являются клеем, скрепляющим атомы вместе.

Что удерживает валентные электроны на своих орбитах? Почему они не улетают прочь, говоря «Адью!» протонам и нейтронам? Ответ: сила электрического притяжения между разноимённо заряженными электронами и атомными ядрами. Электрическое притяжение отличается от притяжения между мухой и липкой лентой. Муха может быть очень крепко приклеена к липкой ленте, но раз от неё оторвавшись, даже очень лёгкая муха немедленно освободится от ленты. Муха улетит прочь и, если только она не настолько глупа, чтобы вернуться обратно, она будет полностью свободна. На физическом жаргоне силы, удерживающие муху на липкой ленте, называются *короткодействующими* — они не простираются на большие расстояния.

Короткодействующие силы не играют роли в удерживании электронов около ядер. Атом похож на миниатюрную Солнечную систему, и все валентные электроны похожи на наиболее удалённые от Солнца планеты, это своеобразные атомные Нептуны и Плутоны. Только силы,



способные действовать на больших расстояниях, могут удержать их от «отлёта» во «внешнее пространство».

*Дальнодействующие силы*, способные захватить частицу на большом расстоянии, являются редкостью. Из множества различных типов сил в природе только две являются дальнодействующими. С обеими этими силами мы хорошо знакомы, и лучше всего знакомы с гравитацией. Когда мы прыгаем вверх, земная гравитация тянет нас обратно. Она простирается на сотни миллионов километров, удерживая планеты на их орбитах вокруг Солнца, и на десятки тысяч световых лет, удерживая звёзды в галактиках. Именно сила такого типа необходима, чтобы удерживать в атоме внешние электроны. Разумеется, гравитация не годится на эту роль, потому что она слишком слаба, чтобы обеспечить устойчивость атома.

Вторым знакомым нам типом сил является сила притяжения между магнитом и железной скрепкой. Магниту не нужен непосредственный контакт со скрепкой, чтобы притянуть её. Сильный магнит притягивает скрепки даже на большом расстоянии, но на электроны в атоме действует кузина магнитной силы — дальнодействующая электрическая сила между заряженными частицами. Она похожа на силу гравитационного притяжения, но гораздо сильнее. Электрическое притяжение удерживает валентные электроны в атоме так же, как гравитация удерживает Плутон в Солнечной системе.

Как уже говорилось в главе 1, электрические силы между заряженными частицами переносятся фотонами, которыми частицы обмениваются между собой<sup>1</sup>. Сверхлёгкие фотоны (вспомните, что у них нет массы) способны перепрыгивать на большие расстояния, создавая дальнодействующие силы, привязывающие далёкие валентные электроны к ядру. Удалите фотон из списка частиц, и у вас не останется ничего, что удержало бы атом от распада.

Фотон — частица исключительная. Это единственная элементарная частица, помимо гравитона, не имеющая массы. Что бы произошло, если бы фотон не обладал такой исключительностью и имел массу? Теория Фейнмана говорит нам, как вычислить силу взаимодействия

<sup>1</sup> Эта тема ещё раз будет рассмотрена в главе 7 в контексте теории струн. Существование атомов, молекул и жизни полностью зависит от того интересного факта, что фотон не имеет массы.

, когда прыжки между ядрами и электронами совершают гипотетические массивные фотоны. Одним из следствий будет невозможность для тяжёлого фотона совершать далёкие прыжки. Даже если масса фотона будет составлять ничтожную часть от массы электрона, электрическое взаимодействие станет короткодействующим и не удержит далёкие валентные электроны.

Дальнодействие электрических сил не единственный фактор, важный для стабильности атомов. Сила взаимодействия также критична. Сила, удерживающая электрон в атоме, не очень велика по нашим повседневным стандартам. Она исчисляется миллиардными долями килограмм-силы. Что же определяет силу электрического взаимодействия между заряженными частицами? И снова теория Фейнмана даёт нам ответ. Ещё один, помимо частиц, компонент фейнмановских диаграмм — вершинная диаграмма. Вспомним, что каждая вершинная диаграмма имеет числовое значение — константу связи, — и для процесса испускания и поглощения фотона такой константой связи является постоянная тонкой структуры  $\alpha$ , равная приблизительно  $1/137$ . Малость  $\alpha$  является математическим обоснованием того, почему электрическое взаимодействие слабее своего ядерного коллеги.

Что бы произошло, если бы постоянная тонкой структуры превышала, скажем, единицу? Это привело бы сразу к нескольким катастрофам, одной из которых стала бы гибель атомных ядер. Ядерные силы, удерживающие нуклоны (протоны и нейтроны) вместе, похожи на силу, действующую на муху со стороны липкой ленты, — они сильные и короткодействующие. Само ядро похоже на липкий шар для мух. Каждый нуклон «приклеен» к своим ближайшим соседям, но если он сумеет «отклеиться», то свободно улетит прочь.

Ядерным силам противодействует электрическая сила отталкивания. Протоны имеют положительный электрический заряд и отталкиваются друг от друга, притягивая отрицательно заряженные электроны. Нейтроны электрически нейтральны и не играют роли в балансе электрических сил. Если ядро содержит около 100 протонов, то их суммарной силы электрического отталкивания достаточно, чтобы разорвать ядро на части.

Что произойдёт, если электрические силы станут такими же сильными, как и ядерные? Очевидно, что все составные ядра станут неста-

бильными, поэтому электрические силы должны быть слабее ядерных, чтобы по крайней мере ядра углерода и кислорода были стабильными. Почему же постоянная тонкой структуры мала?

Это не знает никто, но если бы она была больше, то некому было бы задавать этот вопрос.

Протоны и нейтроны больше не считаются элементарными частицами. Каждый из них состоит из трёх кварков. Существуют несколько различных типов кварков: *u-кварк*, *d-кварк*, *s-кварк*, *c-кварк*, *b-кварк* и *t-кварк*. Имена у них малозначашие<sup>1</sup>, но различия между типами кварков очень важны. Если пробежаться по списку масс элементарных частиц, приведённому в главе 3, то можно обнаружить, что массы кварков варьируются в очень широких пределах: от порядка 10 масс электрона для *u-кварка* до 344 000 масс электрона для *t-кварка*. Долгое время физики ломали голову, почему *t-кварк* такой тяжёлый, но недавно пришли к пониманию, что это не *t-кварк* аномально тяжёлый, а *u-кварк* и *d-кварк* абсурдно лёгкие, и тот факт, что они в 20 000 раз легче, чем такие частицы, как *Z-бозон* и *W-бозон*, нуждается в объяснении. Стандартная модель такого объяснения предоставить не может.

Таким образом, мы можем задаться вопросом, на что был бы похож наш мир, если бы *u-кварк* и *d-кварк* были гораздо тяжелее. И опять ответом будет катастрофа. Протон и нейтрон состоят из *u-* и *d-кварков* (частицы, состоящие из *s-*, *c-*, *b-* и *t-кварков*, не играют никакой роли в обычной физике и химии и представляют интерес исключительно для специалистов в области высокоэнергетической физики). Согласно кварковой теории протонов и нейтронов, ядерные силы (силы, действующие между нуклонами) можно описать при помощи обмена кварками<sup>2</sup>. Если кварки утяжелить, нуклонам будет труднее ими обме-

<sup>1</sup> В английском языке кварки носят названия *up* (верхний), *down* (нижний), *strange* (странный), *charmed* (очарованный), *bottom* (нижний) и *top* (верхний). В литературе встречаются варианты имён двух последних кварков: *beauty* (прекрасный) и *true* (правдивый). Часто кварки обозначаются первыми буквами их названий. В переводе во избежание путаницы используются однобуквенные названия кварков. — *Примеч. пер.*

<sup>2</sup> Более строго, сильное взаимодействие между нуклонами обеспечивается путём обмена пионами — частицами, состоящими из кварка и антикварка. Если массы *u-* и *d-кварка* увеличатся, то увеличится и масса пиона, что приведёт к резкому изменению сил, действующих между нуклонами.

, и ядерные силы практически исчезнут. Без сил, склеивающих нуклоны вместе, не будет атомных ядер, не будет тяжёлых элементов, соответственно не будет атомов и, как следствие, не будет химии и нас с вами. Нам в очередной раз повезло.

Вспомним теперь, что в терминах Ландшафта наша Вселенная лежит в долине, все свойства которой удивительно хорошо подогнаны для возможности нашего существования. Но средний стандартный регион Ландшафта может сильно отличаться от нашей долины. Постоянная тонкой структуры там запросто может быть больше, чем у нас, фотоны — обладать массой, кварки — быть тяжелее, и более того, электроны, фотоны или кварки могут и вовсе отсутствовать в списке элементарных частиц. Любое из этих отличий сделает наше существование невозможным.

Даже если все стандартные частицы будут присутствовать в списке, иметь «правильные» массы и взаимодействовать с «правильными» силами, этого недостаточно для существования обычной химии. Необходимо ещё, чтобы электроны были фермионами. Следствием из того факта, что электроны являются фермионами, является невозможность нахождения в одном и том же квантовом состоянии более одного электрона — свойство, необходимое для существования химии. Если на электроны не будет действовать принцип запрета Паули, то все электроны в атоме «свалятся» на самую нижнюю орбиту, откуда их будет крайне тяжело выбить. Та химия, которая царит в нашем мире, полностью определяется принципом запрета Паули. Если электроны вдруг неожиданно станут бозонами, жизнь, основанная на химических соединениях углерода, станет невозможной. Как вы видите, мир, в котором возможна известная нам химия, далеко не универсальное явление.

Физики часто используют слова в ином смысле, нежели принято в обычной жизни. Когда мы говорим, что что-то существует, мы обычно подразумеваем, что это что-то может быть обнаружено где-то во Вселенной. Например, если я скажу, что существуют чёрные дыры, вы можете спросить: «Где можно найти хотя бы одну из них?» Чёрные дыры существуют в обычном смысле: это реальные астрономические объекты, которые находятся, например, в центрах галактик. Но предположим, я сообщаю вам о существовании миниатюрных чёрных дыр размером не больше пылинки. Вы снова можете задать резонный во-

прос: «Где они находятся?» На этот раз я мог бы ответить, что я не знаю ни одной такой чёрной дыры. «Стоп! — воскликнете вы. — Кончайте вешать мне лапшу на уши! Вы же только что заявили, что они существуют!»

Когда физики (особенно теоретики) говорят, что что-то *существует*, они имеют в виду положительный ответ на вопрос, может ли это что-то *теоретически* существовать. Другими словами, в их понимании этот объект существует в виде решения уравнений в их теории. Согласно этому критерию, существуют идеальные бриллианты размером в несколько сотен километров. Точно так же существуют и планеты, состоящие из чистого золота. Они могут или не могут быть реально обнаружены, но их существование разрешено законами физики.

Дальнодействующее электрическое взаимодействие и короткодействующее сильное взаимодействие между фермионами приводит к *существованию* сложных атомов типа углерода, кислорода или железа. Это прекрасно, но я говорю об их существовании в теоретическом смысле. «Что же необходимо, — спросите вы, — чтобы сложные атомы существовали в нашем обыденном смысле? Что нужно, чтобы эти атомы реально образовывались во Вселенной в огромных количествах?» Ответ на этот вопрос не так прост. Сложные атомные ядра не образовывались в сколько-нибудь заметных количествах при столкновениях частиц на ранней горячей стадии эволюции Вселенной.

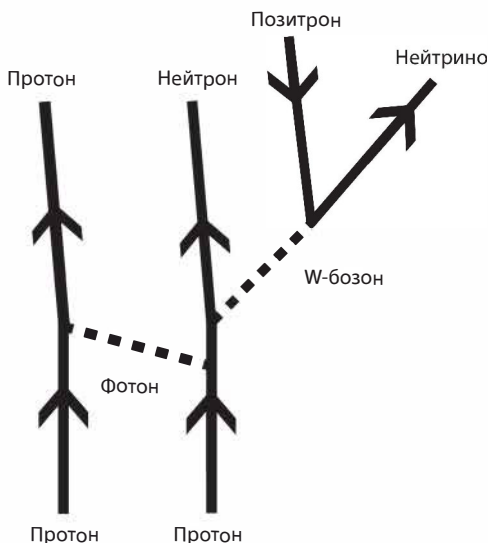
В первые минуты после Большого взрыва не было ни атомов, ни атомных ядер. Горячая плазма состояла из протонов, нейтронов и электронов, заполняющих всё пространство. Высокая температура препятствовала соединению нейтронов в более тяжёлые ядра. Когда Вселенная немного остыла, протоны и нейтроны начали образовывать так называемые первичные элементы<sup>1</sup>. Но если не брать в расчёт ничтожное количество тяжёлых ядер, основную массу составили два простейших химических элемента: водород и гелий.

Кроме того, как обнаружили ещё средневековые алхимики, не так просто превращать один элемент в другой. Так откуда же тогда взялись углерод, кислород, азот, кремний, сера, железо и другие знако-

<sup>1</sup> Когда я говорю «элементы», я имею в виду атомные ядра. Электронами они обзавелись гораздо позже.

мые нам химические элементы? В очень горячей ядерной печи в недрах звезды можно делать то, чего не удалось добиться ни одному алхимику, — превращать одни химические элементы в другие. Процесс приготовления новых элементов называется ядерным синтезом. Именно такой процесс служит источником энергии для термоядерного оружия. Синтез приводит к соединению ядер водорода и нейтронов во всех возможных комбинациях и перестановках. Результатом этих ядерных реакций стали знакомые нам химические элементы.

Цепочка ядерных превращений в звёздах, начинающаяся с лёгких элементов и заканчивающаяся ядрами железа, очень сложна. Я приведу пару примеров, чтобы проиллюстрировать, как это происходит. Наиболее известным примером является реакция синтеза, которая превращает водород в гелий. Здесь впервые вступает в игру слабое взаимодействие (диаграммы с участием  $W$  и  $Z$ -бозонов). Первым шагом является столкновение двух протонов<sup>1</sup>. При столкновении двух протонов может произойти множество разных событий, но среди фейнмановских диаграмм для Стандартной модели можно найти одну, которая даёт на выходе протон, нейтрон, позитрон и нейтрино.



<sup>1</sup> Водород является простейшим химическим элементом — его ядро состоит из одного-единственного протона.

луж -то по недрам звезды электрон, и они взаимоуничтожаются, превращаясь в фотоны, которые в конце концов вносят вклад в общую тепловую энергию звезды. Нейтрино свободно ускользает из звезды, уносясь со скоростью, почти равной скорости света. На месте реакции остаются склеенный друг с другом протон и нейтрон, образующие ядро изотопа водорода, называемого дейтерием.

Следующий, третий протон, встречаясь с ядром дейтерия, прилипает к нему. Ядро, состоящее из двух протонов и одного нейтрона, является изотопом гелия, называемого «гелий-три» ( ${}^3\text{He}$ ), но это ещё не тот гелий, который мы используем для надувания воздушных шаров. Знакомый нам гелий называется «гелий-четыре» ( ${}^4\text{He}$ ).

История продолжается: два ядра  ${}^3\text{He}$  сталкиваются. Вместе они содержат четыре протона и два нейтрона. Но четыре протона и два нейтрона не могут образовать стабильное ядро, поэтому два лишних протона покидают место столкновения, а оставшиеся два протона и два нейтрона образуют ядро гелия-четыре.

## Немного астрофизики

Большинство ядерных реакций, происходящих в недрах звёзд, идут по схеме столкновения протона с уже существующим ядром, что увеличивает атомный вес ядра на одну единицу. Иногда протон превращается в нейтрон, испуская позитрон и нейтрино. Иногда нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино. Во всех случаях исходные ядра водорода и гелия шаг за шагом превращаются в недрах звёзд в более тяжёлые элементы.

Но что хорошего в том, что сложные элементы образуются во внутренних областях звёзд? Разумеется, научные фантасты без труда придумают какую-нибудь экзотическую форму жизни, построенную из бушующей плазмы и процветающую при температуре в несколько миллионов градусов, но обычная жизнь нуждается в более прохладной среде. К сожалению, углерод и кислород остаются запертыми в звёздных недрах в течение всей жизни звезды.

Но ведь звёзды не вечны ...



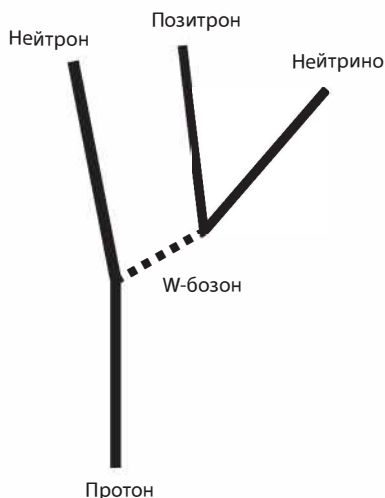
В конце концов все звёзды, и наше Солнце не исключение, исчерпывают свои запасы ядерного горючего. После этого звезда начинает сжиматься под собственным весом. До исчерпания запасов топлива тепло, освобождающееся в ходе ядерных реакций, поддерживает звезду в равновесии. С одной стороны, тепловая энергия раскалённой плазмы стремится разорвать звезду на части, с другой — гравитация пытается сжать звезду в сверхплотное состояние. Звезда светит, а значит, теряет тепло, которое, однако, непрерывно восполняется за счёт ядерных реакций. Но когда ядерное топливо кончается, ничто не мешает гравитации сделать своё чёрное дело.

Существуют три варианта окончания жизни звезды. Относительно лёгкие звёзды типа нашего Солнца умирают, сжимаясь до состояния белого карлика, состоящего из более-менее обычной материи — протонов, нейтронов и электронов, — но атомные ядра и электроны в веществе белого карлика спрессованы гораздо плотнее, чем в обычном веществе. Принцип запрета Паули не даёт электронам находиться в одном и том же состоянии, и при увеличении плотности вещества они вынуждены увеличивать свои скорости. Это создаёт дополнительное давление, которое предотвращает дальнейшее сжатие. Если бы все звёзды заканчивали свою жизнь белыми карликами, то тяжёлые элементы так и оставались бы запертыми в их недрах.

Но во Вселенной есть звёзды во много раз тяжелее Солнца. Сила тяготения, сжимающая их, настолько велика, что процесс катастрофического сжатия не может остановить уже ничто, и они превращаются в чёрные дыры. Достать химические элементы из чёрной дыры ещё проблематичнее, чем из белого карлика.

Но, к счастью, имеется и третий, промежуточный вариант. Звёзды, масса которых лежит в некотором диапазоне, уже достаточно тяжелы, чтобы их сжатие не остановилось на формировании белого карлика, но недостаточно массивны, чтобы сколлапсировать в чёрную дыру. На каком-то этапе сжатия такой звезды её плотность достигает плотности атомного ядра, при этом электроны начинают «вдавливаться» в протоны, превращая их в нейтроны. В итоге звезда превращается в сверхплотный шар, состоящий из нейтронов, — *нейтронную звезду*. Примечательно, что заметную роль в этом процессе играет слабое взаимодействие. Протон, превращаясь в нейтрон, испускает две

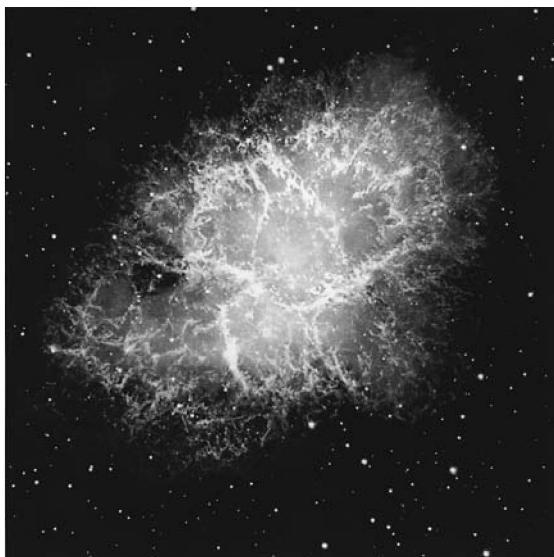




частицы — позитрон и нейтрино. Позитрон быстро аннигилирует с ближайшим электроном, а нейтрино навсегда покидает место катастрофы.

Я недаром упомянул катастрофу, потому что высвобождающаяся в описанном процессе энергия столь велика, что какое-то непродолжительное время светимость звезды оказывается сравнимой со светимостью целой галактики, состоящей из сотен миллиардов звёзд. Астрономы называют такое явление взрывом, или вспышкой, *сверхновой*.

В повседневной физике и химии нейтрино не играют существенной роли. Они могут свободно проникать сквозь гигантскую толщу вещества, например сквозь слой свинца толщиной в несколько световых лет. Солнечные нейтрино свободно проходят сквозь Землю, сквозь еду и напитки на нашем столе, сквозь наши тела, не оказывая на них никакого воздействия. Но наше существование целиком определяется существованием нейтрино. Нейтрино, высвобождающиеся при взрыве сверхновой, несмотря на свою почти полную беспомощность, столь многочисленны, что создают чудовищное давление, размётывающее неуспешнее сжаться в нейтронное ядро вещество звезды во все стороны. Это приводит к тому, что часть вещества звезды вместе с накопившимися в нём за время её жизни химическими элементами выбрасывается в межзвёздное пространство.



Крабовидная туманность, являющаяся остатком сверхновой, вспыхнувшей в 1054 году

Наше Солнце — относительно молодая звезда. Возраст Вселенной составляет около 14 миллиардов лет, в то время как Солнце образовалось не более пяти миллиардов лет назад. К тому времени уже успело родиться и умереть первое поколение звёзд, наполнивших Вселенную тяжёлыми элементами, из которых сформировалась наша Солнечная система. И нам действительно повезло, что в мире существуют неуловимые нейтрино — существуют в обычном, житейском смысле этого слова.

Существует множество вариантов, при которых всё на ядерной кухне могло бы пойти наперекосяк. Если бы в природе отсутствовали слабые взаимодействия или если нейтрино были бы слишком тяжёлыми, то протоны не смогли бы превращаться в нейтроны в процессе ядерного синтеза. Синтез углерода крайне чувствителен к свойствам ядра  $^{12}\text{C}$ . Одним из крупных научных событий XX века стало предсказание космологом Фредом Хойлом одного из таких свойств, исходя только лишь из факта нашего существования. В начале 1950-х годов Хойл заявил, что существует «бутылочное горло» в цепочке синтеза тяжёлых элементов в звёздах. Оно не позволяло продвинуться в синтезе элементов дальше

гелия-4. Синтез следующих элементов обычно идёт путём присоединения протона к существующему ядру, но стабильного ядра с атомной массой 5 не существует, и выходит, что не существует простого способа получить химические элементы тяжелее гелия.

Но раз нет простого пути, пойдём сложным. Пусть два ядра гелия-4, столкнувшись, образуют ядро с атомной массой 8. Это ядро является изотопом бериллия. Если спустя небольшое время с ядром бериллия-8 столкнётся ещё одно ядро гелия-4, то они образуют ядро с атомной массой 12, а это — хорошо известный нам углерод, являющийся основой органической химии. Тем не менее в этой красивой схеме есть серьёзный изъян.

Бериллий-8 — очень нестабильный изотоп. Он распадается настолько быстро, что не успевает дожидаться, пока с ним столкнётся ядро гелия-4, если только не произойдёт чудо. Таким чудом могло бы стать наличие у атома углерода возбуждённого состояния, так называемого *резонанса*, причём энергия этого возбуждённого состояния должна иметь строго определённую величину — 7,82 МэВ. В этом случае вероятность захвата ядром бериллия-8 ещё одного ядра гелия-4 возрастает во много раз, что оказывается достаточным для продолжения цепочки синтеза более тяжёлых элементов. И представьте себе: в скором времени у ядра углерода-12 действительно было открыто возбуждённое состояние, и его энергия оказалась в точности равной предсказанной Хойлом! Окажись энергия этого состояния чуть больше или чуть меньше, и синтез ядер тяжелее гелия стал бы невозможным, а вместе с ним стало бы невозможным и возникновение жизни.

Энергия хойловского резонанса углерода очень чувствительна к значению некоторых фундаментальных констант, в том числе — к значению постоянной тонкой структуры. Измените величину постоянной тонкой структуры всего на несколько процентов, и углерода во Вселенной не будет, а без углерода не будет жизни<sup>1</sup>. Именно это имел в виду

---

<sup>1</sup> Степень чувствительности возможности синтеза углерода к значениям различных констант была предметом широкого обсуждения. Одни полагали, что диапазон безопасного изменения констант составляет единицы процентов, другие, в числе которых был Стивен Вайнберг, считали, что константы можно изменять на десятки процентов, но все соглашались с тем, что возможность синтеза углерода требует достаточно точной настройки фундаментальных констант.

Хойл, когда говорил, что «всё выглядит так, будто некий суперинтеллект играет с физикой, а также с химией и биологией».

Синтез — синтезом, но очевидно, что никакого синтеза у нас не будет, если во Вселенной не будет звёзд. Вспомним, что совершенно однородная Вселенная не способна породить звёзды и галактики. Их существование зависит от наличия на самом раннем этапе эволюции Вселенной небольших неоднородностей, сгустков и комков. Контраст плотности в ранней Вселенной составлял порядка  $10^{-5}$ , но что бы произошло, если бы он оказался немного большим или меньшим? Если бы степень комковатости была в десять раз меньше, то есть  $10^{-6}$ , то галактики оказались бы слишком маленькими, а звёзды чересчур редкими. Взрывы сверхновых также происходили бы гораздо реже, и к настоящему времени большая часть Вселенной представляла бы собой чрезвычайно разреженные облака водорода и гелия. Если уменьшить контраст плотности ещё чуть-чуть, то образование галактик и звёзд станет вообще невозможным.

А если увеличить начальную комковатость, скажем, в 100 раз? Тогда Вселенная наполнится гигантскими монстрами, которые проглотят всё вещество задолго до того, как из него успеют сформироваться первые звёзды. Не беспокойтесь, я ещё не сошёл с ума. Гигантскими монстрами я метафорически называю гигантские чёрные дыры. Помните, что сила гравитационного притяжения пропорциональна произведению взаимодействующих масс? Если вариации плотности будут слишком большими, то гравитация очень быстро соберёт вещество в области с повышенной плотностью, которые через короткое время провалятся под горизонт. Даже увеличение первоначального контраста плотности всего в 10 раз, до  $10^{-4}$ , создаст угрозу для возникновения жизни, поскольку плотность звёзд в Галактике будет слишком велика и это повысит вероятность катастрофического столкновения Солнца с другой звездой.

Таким образом, исходная степень неоднородности Вселенной порядка  $10^{-5}$  имеет важное значение для возникновения жизни. Но может быть, такое значение контраста плотности с лёгкостью возникает естественным путём? Конечно, нет! Необходимо очень точно подогнать исходные параметры раздувания Вселенной, чтобы получить желаемый результат. Опять проделки хойловского суперинтеллекта?

И это ещё не всё. Законы Физики элементарных частиц требуют, чтобы каждой частице соответствовала античастица. Каким же образом во Вселенной возник такой большой перевес материи над антиматерией? Мы, физики, предполагаем, что произошло следующее.

Когда Вселенная была молодой и горячей, она была заполнена плазмой, содержащей почти равное количество материи и антиматерии. Дисбаланс был крайне мал. На каждые 100 000 000 антипротонов приходился 100 000 001 протон. В процессе охлаждения Вселенной частицы и античастицы аннигилировали друг с другом, превращаясь в фотоны. Сто миллионов антипротонов нашли сто миллионов партнёров и совершили массовое самоубийство, оставив после себя 200 000 000 фотонов и единственный живой протон. Из этих немногочисленных выживших и состоит всё вещество современной Вселенной. Если сегодня взять кубический метр межгалактического пространства, он будет содержать в среднем 1 протон и 200 000 000 фотонов. Если бы на начальном этапе не было этого небольшого дисбаланса между веществом и антивеществом, некому было бы сегодня читать эту книгу.

Ещё одним важным условием для возникновения жизни является чрезвычайная слабость гравитационного взаимодействия. В повседневной жизни гравитация не кажется нам слабой. Чем старше мы становимся, тем больше хлопот доставляет нам сила тяжести. Я до сих пор слышу причитания моей бабушки: «Ой-вей, я чувствую, что вешу тысячу фунтов!» Но я не припомню, чтобы она когда-либо жаловалась на величину электромагнитного или сильного взаимодействия. Тем не менее если вы сравните величины электромагнитного и гравитационного взаимодействия между протоном и электроном, то увидите, что электрическое притяжение примерно в  $10^{41}$  раз сильнее гравитационного. Откуда взялось такое огромное соотношение? Физики имеют кое-какие соображения на этот счёт, но я по секрету скажу вам, что на самом деле никто не знает причин такого гигантского различия между величиной электромагнитного и гравитационного взаимодействий, несмотря на важное значение этого различия для нашего существования<sup>1</sup>. К чему бы привело небольшое увеличе-

---

<sup>1</sup> Физики называют это *проблемой калибровочной иерархии*, но удовлетворительного решения её до сих пор не существует.

ние силы гравитационного взаимодействия? Ответ вы уже многократно слышали: некому было бы задавать подобные вопросы. Увеличение температуры и давления в недрах звёзд из-за необходимости противостоять более сильной гравитации, стремящейся сжать звезду, привело бы к слишком быстрому расходованию ядерного горючего. Звёзды жили бы слишком мало, не оставляя времени для развития жизни на обращающихся вокруг них планетах. Хуже того, Вселенная быстро наполнилась бы звёздными трупами — чёрными дырами, которые высосали бы из неё остатки вещества, обрекая процесс возникновения жизни на неудачу ещё до его начала. Слишком сильное гравитационное взаимодействие может даже остановить хаббловское расширение, стянув Вселенную обратно в то состояние, из которого она возникла.

Насколько серьёзно следует относиться к этому набору счастливых случайностей? Дают ли они веские основания для принятия антропного принципа? На мой взгляд, всё это впечатляет, но не настолько, чтобы, не раздумывая, кинуться в объятия антропного объяснения. Ни одно из этих совпадений, за исключением слабости гравитации, не требует особо точной настройки соответствующих констант. И даже слабость гравитации имеет вполне рациональное объяснение, связанное с магией суперсимметрии. Взятые все вместе, эти совпадения могут показаться маловероятной массовой аварией, но иногда случаются и массовые аварии.

Однако малость космологической постоянной — это совпадение совсем иного рода. Чтобы сделать первые 119 десятичных знаков вакуумной энергии нулями, нужно нечто большее, чем простая случайность. Космологическая постоянная оказалась не просто очень мала. Если бы она была, например, равна нулю, ещё можно было бы подвести под это значение какую-нибудь разумную математическую или физическую базу. Событием, обрушившимся на наши головы, как тонна кирпичей, стало открытие, показавшее, что 120-й десятичный знак отличен от нуля. Перед этим загадочным фактом оказалась бессильна вся наша математическая магия.

Но даже космологической постоянной не удалось бы склонить для меня чашу весов в пользу антропного принципа, если бы не открытие гигантского ландшафта, которое принесла нам теория струн.

## Когда антропный принцип имеет смысл?

Предположим, что мы с вами являемся партнёрами в деле создания пригодных для жизни Вселенных. Ваша задача — придумать все необходимые ингредиенты и представить эскизный проект. Моя — найти на Ландшафт место, удовлетворяющее техническому заданию. Итак, вы придумываете конструкцию, а я отправляюсь исследовать Ландшафт. Если бы Ландшафт содержал лишь несколько долин, я бы почти наверняка не нашёл среди них подходящей. И на ближайшем совещании по проекту я бы доложил, что ваш проект никуда не годится, потому что найти долину, удовлетворяющую его требованиям, невозможно.

Но будучи немного знакомым с теорией струн, вы могли бы поставить моё суждение под сомнение, спросив: «Уверены ли вы, что обшарили каждый уголок в каждой долине? Вы исследовали все  $10^{500}$  долин? Среди такого количества возможностей обязательно должно обнаружиться то, что мы ищем. Не тратьте время, перебирая наиболее часто встречающиеся, похожие друг на друга варианты, ищите что-нибудь уникальное».

Это подводит нас к новому критерию приемлемости антропного объяснения. Количество математически согласованных возможностей должно быть настолько велико, чтобы даже очень маловероятные варианты могли найтись по крайней мере в нескольких долинах.

Этот критерий имеет смысл применять только в контексте точной теории Ландшафта. Чтобы далеко не ходить за примером, вернёмся к нашим рыбам. Осетрологи, апеллируя к ньютоновскому закону всемирного тяготения, могли бы заявить, что его уравнения допускают существование круговых орбит планет на любом расстоянии от звезды. Планеты, находящиеся на очень далёких орбитах, слишком холодны, вода и даже метан там превращаются в лёд. Планеты, орбиты которых расположены слишком близко к звезде, слишком горячи, и вода там мгновенно закипает. Но где-то между этими крайними случаями должна существовать орбита, где температура на планете идеально подходит для существования жидкой воды. Теория даёт так много решений, что среди них обязательно найдётся то, которое нас удовлетворит.

Строго говоря, планета может вращаться вокруг звезды не на любом расстоянии. Солнечные системы во многом похожи на атомы: солнце



и планеты напоминают атомное ядро и электроны. Как первым понял Нильс Бор, электроны могут находиться только на определённых орбитах, разрешённых законами квантовой механики. То же относится и к планетам. Но к счастью, количество возможных орбит настолько велико и они настолько плотно расположены, что для практических целей можно считать их распределение по расстоянию от звезды непрерывным.

Осетрологам недостаточно знать, что их требования к существованию жизни математически согласованы. Они должны быть уверены, что Вселенная достаточно велика и разнообразна, чтобы в действительности содержать почти всё, что теоретически может существовать. Наблюдаемая часть Вселенной содержит  $10^{11}$  галактик, в каждой из которых существует не менее  $10^{11}$  планет. Итого мы имеем  $10^{22}$  возможностей удовлетворить специальным требованиям для существования жидкой воды. При таком обилии планет наверняка найдутся обитаемые.

Приведу ещё несколько соображений.

Для антропного объяснения факта  $X$  мы должны иметь серьёзные основания полагать, что если бы  $X$  был иным, то существование жизни нашего типа было бы невозможным. Именно это показал Вайнберг в отношении значения космологической постоянной.

Даже если  $X$  представляется совершенно невероятным, достаточно богатый ландшафт с огромным количеством долин может содержать долину, в которой  $X$  — обычное явление. Вот где проявляются удивительные следствия теории струн. Ландшафт уже всюду изучается в университетах США и Европы, и большинство научных результатов указывают на существование невообразимого разнообразия долин, число которых, скорее всего, превышает  $10^{500}$ .

И последнее по счёту, но, конечно же, не по важности: космология, построенная на основе теории струн, должна естественным образом привести нас к Супермегаверсуму, настолько огромному, что любой возможный регион Ландшафта будет представлен в нём по крайней мере одной карманной вселенной. Теория струн в сочетании с идеей инфляции выглядит подходящим решением для нашего проекта. Но об этом — в следующих главах.

Антропный принцип — это бельмо на глазу теоретической физики. Многие физики очень экспрессивно реагируют на его упоминание.

Причину такой реакции понять нетрудно. Антропный принцип угрожает господствующей парадигме, утверждающей, что все наши знания о природе могут быть полностью выражены языком математики. Обоснованы ли их аргументы? Более того, имеют ли они смысл?

Давайте посмотрим на некоторые из их возражений с точки зрения умных рыб. Утверждение, что антропный принцип — это не наука, а религия, — очевидный выстрел мимо цели. По мнению Андрея и Александра, нет никакой необходимости в божественном вмешательстве для тонкой настройки мира в интересах своих творений. Во всяком случае, большинство мест в нашем мире являются весьма негостеприимными и гораздо более смертоносными, чем когда-либо могли вообразить себе фишки. В действительности ихтиотропный принцип, в той форме, в которой его предложили Андрей и Александр, полностью исключает любую мистику из «фишического» описания мира.

Более актуальным является возражение, что, апеллируя к антропному принципу, физика теряет свою предсказательную силу. В какой-то степени это верно, если мы претендуем на предсказание температуры нашей планеты, количества солнечного света, которое она получает, точной продолжительности года, высоты приливов, солёности океана и т. п. Но отвергать ихтиотропное объяснение некоторых свойств окружающей среды на том только основании, что при этом теряется предсказательная сила, нерационально. Требование абсолютной предсказательной силы имеет под собой эмоциональную основу, не имеющую ничего общего с объективными фактами планетарной науки.

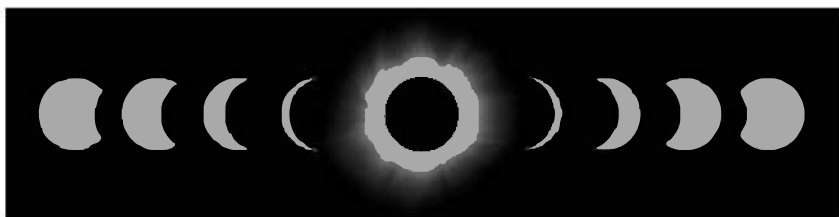
Сетования о том, что умная рыба отказывается от традиционных путей поиска научного объяснения, выражают психологический дискомфорт, но очевидно не имеют под собой научных оснований. В какой-то момент требования фишиков превращаются в религиозный догмат.

Из всех критических замечаний, которые я слышал в отношении антропного принципа, я могу отнести к серьёзным научным аргумен-

ам только одно. Оно принадлежит двум моим близким друзьям, Тому Бэнксу и Майку Дину, не разделяющим мои идеи<sup>1</sup>.

Вот что они говорят.

Предположим, что в природе существует некая тонкая настройка, не имеющая антропоного значения. Например, Солнце и Луна имеют на небосводе один и тот же видимый размер. Во время солнечных затмений лунный диск почти точно закрывает солнечный. Это очень удачное совпадение для солнечной астрономии: оно позволяет астрономам производить наблюдения, которые в противном случае потребовали бы серьёзных ухищрений. Например, они могут изучать во время затмения солнечную корону. Они также могут точно измерить угол, на который гравитационное поле Солнца отклоняет свет, проходящий вблизи солнечной поверхности. Но эта необыкновенно точная настройка не имеет никакого значения для возможности жизни на Земле. Более того, вполне вероятно, что у большинства обитаемых планет нет спутников, видимый диаметр которых на небе так точно соответствует видимому диаметру звезды. Вероятность найти среди обитаемых миров планету с таким удачным расположением спутника и звезды крайне мала. Так что если мы не верим в неожиданные совпадения, объяснение нашего мира должно представлять собой нечто иное, нежели случайный выбор, подчиняющийся только антропным ограничениям.



<sup>1</sup> К тому времени, что я закончил писать «Космический ландшафт», Дин стал одним из главных сторонников антропоного принципа и считает, что некоторые особенности природы с большой вероятностью носят характер внешней причины и могут быть поняты только с позиции антропоного принципа. Бэнкс же по-прежнему настроен скептически.

Совпадение видимых размеров Солнца и Луны не представляет собой серьёзной проблемы. Точность этого совпадения не является феноменальной. Разница в средних видимых размерах составляет около одного процента. Один процент совпадений бывает в одном случае из ста. Вероятность такого события больше, чем вероятность попасть в автомобильную аварию. Но что, если бы видимые размеры Солнца и Луны совпадали с точностью до одной триллион триллион триллионной? Такое совпадение выглядело бы настолько маловероятным, что потребовало бы объяснения. И для этого объяснения пришлось бы привлечь что-то ещё в дополнение к антропному принципу. Это ставит под сомнение идею, что необъяснимые уникальные особенности Вселенной имеют что-либо общее с возможностью возникновения в ней жизни.

Существует по крайней мере одна очень необычная особенность Законов Физики, которая выглядит как очень тонкая настройка и при этом не требует антропного объяснения. Она имеет отношение к протону, но сначала рассмотрим свойства его почти близнеца — нейтрона. Нейтрон является примером нестабильной частицы. Не связанные внутри ядра нейтроны живут около 12 минут, прежде чем распасться. Разумеется, нейтрон имеет массу, или, что эквивалентно, энергию, которая не может исчезнуть просто так. Энергия — это величина, которую физики считают сохраняющейся. Это означает, что общее количество энергии никогда не может измениться. Примером ещё одной строго сохраняющейся величины является электрический заряд. Когда нейтрон распадается, его должно заменить что-то с той же суммарной энергией и электрическим зарядом. В природе нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино. Начальные и конечные энергия и электрический заряд в этой реакции одни и те же.

Почему нейтрон распадается? А если бы этого не происходило, то логичным был бы вопрос, почему он не распадается? Как однажды заметил Мюррей Гелл-Манн, цитируя Теренса Уайта: «Все, что не запрещено, то обязательно». Этой фразой Гелл-Манн хотел выразить одну особенность квантовой механики, являющуюся следствием квантовых флуктуаций: всё, что не запрещено законами природы, рано или поздно происходит.

А что относительно протонов? Может быть, они тоже распадаются, и если да, то на что они распадаются? Самым простым вариантом может

Фотон не имеет заряда, протон и позитрон имеют одинаковые заряды. Поэтому нет причин, которые могли бы помешать протонам распадаться на фотоны и позитроны. Не существует никакого физического принципа, который бы запрещал это. Большинство физиков считают, что если предоставить протону достаточно времени, он в конце концов распадётся.

Но если протон может распадаться, это означает, что могут распадаться и все атомные ядра. Мы знаем ядро атома водорода как самое стабильное из всех известных нам атомных ядер. Время жизни протона должно во много раз превышать возраст Вселенной.

Должна быть причина, по которой протон живёт так долго. Может быть, эта причина имеет антропный характер? Конечно, наше существование налагает определённые ограничения на время жизни протона. Оно, очевидно, не может быть слишком малым. Предположим, что протон жил бы один миллион лет. Тогда мне не пришлось бы беспокоиться о том, что за время моей жизни распадётся слишком много протонов, но поскольку возраст Вселенной составляет более 10 миллиардов лет, то если бы протон жил только один миллион лет, все протоны распались бы задолго до моего рождения. Таким образом, антропное ограничение на время жизни протона намного превышает продолжительность человеческой жизни. Протон должен жить по крайней мере 14 миллиардов лет.

На самом деле, с позиции антропного принципа, время жизни протона должно намного превышать возраст Вселенной. Предположим, что время жизни протона составляет 20 миллиардов лет. Распад нестабильных частиц — непредсказуемое событие, которое может произойти в любое время. Говоря, что время жизни протона составляет 20 миллиардов лет, мы имеем в виду среднюю статистическую продолжительность жизни, но при этом какие-то протоны распадутся в течение одного года, а какие-то доживут до триллиона.

Наше тело состоит из приблизительно  $10^{28}$  протонов. При средней продолжительности жизни протона в 20 миллиардов лет примерно  $10^{18}$  протонов человеческого тела распадутся в течение одного года<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Разница между двадцатью и десятью миллиардами лет не принципиальна для нашей дискуссии. Если бы время жизни протона составляло 10 миллиардов ( $10^{10}$ ) лет, это означало бы, что один из десяти миллиардов протонов распался

Это очень незначительная часть ваших протонов, поэтому нет нужды беспокоиться, что вы распадётесь вслед за ними, но каждый протон, распадаясь, рождает высокоэнергетические частицы: фотоны, позитроны и пионы. Эти частицы, пролетая через человеческое тело, оказывают такое же воздействие, как радиация, — убивают живые клетки. Если в течение года в человеческом теле распадутся  $10^{18}$  протонов, это, безусловно, убьёт человека. Таким образом, антропное ограничение на время жизни протона оказывается гораздо более сильным, чем кажется на первый взгляд. Насколько мы можем судить, время жизни протона должно не менее чем в миллион раз превышать время жизни Вселенной, то есть составлять не менее  $10^{16}$  лет, — только так можно избежать угрозы для существования жизни. На антропных основаниях следует исключить из списка пригодных для жизни долин Ландшафта все, где время жизни протона составляет меньше  $10^{16}$  лет.

Но нам известно, что протон живёт значительно дольше  $10^{16}$  лет. В цистерне с водой содержится примерно  $10^{33}$  протонов, и если мы ожидаем увидеть один распад протона в течение года, время жизни протона должно составлять  $10^{33}$  лет. В надежде зафиксировать распад протона физики построили огромные подземные цистерны с водой, оборудованные фотоэлектрическими датчиками. Сложные современные детекторы способны обнаружить вспышку света от единственной распавшейся частицы. Но пока всё тщетно. За всё время этих экспериментов не зафиксировано ни одного распада протона. Это свидетельствует о том, что время жизни протона существенно превышает  $10^{33}$  лет, но причина такой долговечности протона неизвестна.

Проблему усугубляет тот факт, что мы не знаем ни одной причины, по которой ландшафт теории струн не мог бы содержать долин, в которых Законы Физики пригодны для жизни, но где протоны живут только  $10^{16}$ – $10^{17}$  лет. Потенциально количество таких долин может значительно превышать количество долин, более благоприятных для жизни.

---

ся бы в течение года. Если мы умножим одну десятиллиардную на  $10^{28}$  протонов, из которых состоит человеческое тело, то получим число протонов, распадающихся в нём за один год, —  $10^{28}/10^{10} = 10^{18}$ .

Всё это вызывает серьёзную озабоченность, но, скорее всего, не остановит работу над теорией. К сожалению, мы не обладаем достаточной информацией о Ландшафте, чтобы оценить, какой процент его обитаемых долин содержит столь долгоживущие протоны. Но основания для оптимизма есть. Стандартная модель без дополнительных модификаций не допускает распада протона. Этот запрет не имеет ничего общего с антропным принципом. Это просто математическое свойства стандартной модели, запрещающее распад протона. Если типичная обитаемая долина требует чего-то, похожего на Стандартную модель, стабильность протона может прилагаться к ней в качестве бонуса.

Но нам известно, что Стандартная модель неполна. Она не включает гравитацию. Несмотря на то что Стандартная модель очень хорошо описывает поведение элементарных частиц, она должна быть заменена другой, более полной. Есть много претендентов на замену Стандартной модели. Например, теория под названием Теория великого объединения, которая, несмотря на претенциозное название, видится весьма перспективной. Простейшее обобщение Стандартной модели на Теорию великого объединения даёт оценку времени жизни протона порядка  $10^{33}$ – $10^{34}$  лет.

Существуют и другие расширения Стандартной модели, которые не так хорошо разработаны. Одно из них, основанное на суперсимметрии, приводит к значительно меньшему времени жизни протона и требует корректировки. Необходимо получить гораздо больше информации, прежде чем мы сможем делать далеко идущие выводы. К счастью, эксперименты в области физики элементарных частиц в ближайшем будущем, я надеюсь, смогут пролить свет как на справедливость Стандартной модели, так и на причины необычной стабильности протона. Оставайтесь с нами — продолжение через несколько лет.



## Философские возражения

В аннотации к статье «Научные альтернативы антропного принципа» физик Ли Смолин<sup>1</sup> пишет:

*«В работе подробно объясняется, почему антропный принцип не может дать каких-либо фальсифицируемых предсказаний и поэтому не может быть частью науки».*

Во введении к статье он продолжает: *«... я намеренно выбрал такое провокационное название, чтобы выразить то чувство разочарования, которое я испытывал на протяжении многих лет, наблюдая, как здравомыслящие люди, многие из которых являются уважаемыми и вызывающими восхищение учёными, поддерживают подход к космологической проблеме, ненаучность которого видна невооружённым глазом. Я имею в виду, конечно, антропный принцип. Называя его ненаучным, я имею в виду вполне конкретную вещь, которая является неотъемлемым атрибутом любой гипотезы или теории, претендующей на право считаться научной. Эта вещь называется фальсифицируемостью. Согласно [философу] Попперу, теория является фальсифицируемой, если на её основе можно получить однозначные предсказания для постановки экспериментов, возможные отрицательные результаты которых в принципе могли бы рассматриваться в качестве опровержения по крайней мере одного положения этой теории».*

Ричард Фейнман однажды заметил: *«Философы много говорят о том, что абсолютно необходимо для науки, и это всегда, насколько можно видеть, довольно наивно и, вероятно, неверно».* Фейнман имел в виду среди прочих и Поппера. Большинство физиков типа Фейнмана обычно не жалуют философию своим вниманием, если только они не пытаются использовать её для доказательства ненаучности чужой теории.

Честно говоря, я бы предпочёл избежать философского дискурса, порождаемого антропным принципом. Но проповеди всяких попперацци в сводках новостей и в интернет-блогах о том, что научно, а что

<sup>1</sup> Если у кого-то создалось впечатление, что мы со Смолиным враги, то это вовсе не так. На самом деле Смолин — мой хороший друг, вызывающий у меня большое восхищение. Но по этому конкретному вопросу наши мнения кардинально расходятся.

ненеучно, стали настолько агрессивными, что я счёл необходимым ответить на это. Моё мнение о ценности строгих философских правил в науке совпадает с мнением Фейнмана. Позвольте мне процитировать фрагмент одной дискуссии с сайта edge.org. Это короткие сообщения, написанные в ответ на работу Смолина. Аргументы Смолина я также привожу, поскольку они продуманны и интересны.

В течение всей моей многолетней карьеры учёного я слышал обвинения в нефальсифицируемости в отношении такого количества важных и интересных идей, что начал склоняться к уверенности, что нет для теории большей заслуги, чем подвергнуться подобной критике. Я приведу несколько примеров:

«Из психологии. Вы, наверное, думаете, что все соглашаются с утверждением, что у каждого человека есть скрытая эмоциональная жизнь. Б. Ф. Скиннер с этим не согласен. Он был гуру научного направления, называемого бихевиоризмом, отрицающим всё, что не может быть непосредственно наблюдаемо, как ненаучное. Единственным предметом психологии, согласно бихевиористам, является внешнее поведение. Заявления об эмоциональном внутреннем мире пациента были исключены как нефальсифицируемые и ненаучные. Большинство из нас сегодня могли бы заявить, что это глупый экстремизм. Современная психология глубоко интересуется эмоциями и их развитием».

«Из физики. В первые дни кварковой теории многие её противники обвиняли теорию в нефальсифицируемости. Кварки постоянно связаны друг с другом в протоны, нейтроны и мезоны. Они не могут быть разделены и зарегистрированы индивидуально. Они, если можно так сказать, постоянно скрыты за вуалями различного рода. Большинство физиков, критиковавших идею кварков, имели свои собственные представления об элементарных частицах, в которые кварки просто не вписывались. Но сегодня уже никто не сомневается в теории кварков, несмотря на то что до сих пор никому так и не удалось зарегистрировать свободный кварк. Сегодня кварковая модель — это часть фундамента современной физики».

«Ещё одним примером является инфляционная теория Алана Гута. В 1980 году казалось невозможным заглянуть в эпоху инфляционного расширения и увидеть прямые доказательства этого явления. Непро-

нищаемая завеса под названием “поверхность последнего рассеяния” предотвращала любые попытки увидеть инфляционный процесс. Многих из нас сильно беспокоило отсутствие хорошего способа проверки инфляционной теории. Некоторые, обычно авторы конкурирующих гипотез, утверждали, что инфляционная теория нефальсифицируема и поэтому ненаучна».

«Я могу представить себе гвардейцев Ламарка, критикующих Дарвина: “Ваша теория нефальсифицируема, Чарльз. Вы не можете отправиться назад во времени, на миллионы лет, в течение которых действует естественный отбор. У вас всегда будут только косвенные доказательства и нефальсифицируемые гипотезы. Напротив, наша ламаркистская теория является *научной*, потому что она фальсифицируема. Всё, что мы должны сделать, — это выделить популяцию, особи которой будут проводить каждый день по несколько часов в тренажёрном зале, поднимая тяжести, и через несколько поколений их дети станут рождаться с уже накачанными мускулами”. Ламаркисты были правы: их теория легко фальсифицируема — слишком легко. Но это не делает её лучше, чем теория Дарвина».

«Есть люди, утверждающие, что мир был создан 6000 лет назад сразу со всеми геологическими образованиями, распространённостью изотопов и костями динозавров. Почти все учёные тычут пальцем в труды Поппера и заявляют: “Не фальсифицируемо!” И я готов с ними согласиться. Но ведь и противоположная точка зрения, утверждающая, что Вселенная не была создана таким образом, — она тоже нефальсифицируема. Кстати, именно это и говорят креационисты. Строгий критерий фальсифицируемости делает научный и креационистский подход одинаково ненаучными».

Абсурдность этой позиции, я надеюсь, понятна читателю.

«Хорошая научная методология не является абстрактным набором правил, продиктованным философами. Она обусловлена и определяется самой наукой и учёными, которые эту науку создают. То, что могло представлять научное доказательство для физика 1960-х годов, а именно обнаружение изолированной частицы, не подходит для современного специалиста по квантовой хромодинамике, который не может надеяться на обнаружение свободного кварка. Давайте не будем

ставить телегу впереди лошади. Наука — это лошадь, которая тянет телегу философии».

«В каждом конкретном случае, который я описал — кварки, инфляция, дарвиновская эволюция, — обвинители делали ошибку, недооценивая человеческую изобретательность. Всего через несколько лет после создания теория кварков была косвенно подтверждена с высочайшей точностью. Понадобилось 20 лет, чтобы появились наблюдения, подтверждающие теорию инфляции. И 100 лет пришлось ждать экспериментального подтверждения идей Дарвина (кое-кто считает, что решающая проверка дарвинизма ещё впереди). Мощные методы исследования, ставшие доступными биологам спустя столетие, были просто немислимы во времена Дарвина. Станет ли когда-нибудь возможной проверка теории вечной инфляции и Ландшафта? Я, разумеется, думаю, что да, хотя, как и в случае с кварками, это окажутся только косвенные подтверждения, опирающиеся на чисто теоретические выкладки в большей степени, чем нам бы того хотелось».

После того как был написан этот материал, я вспомнил о ещё нескольких примерах чрезмерного попперизма. Наиболее ярким примером является теория S-матрицы<sup>1</sup>, господствовавшая в 1960-х годах, утверждающая, что поскольку элементарные частицы слишком малы, то любая теория, которая пытается описать их внутреннюю структуру, является нефальсифицируемой и потому ненаучной. Опять же никто сегодня уже не воспринимает это всерьёз.

Показательный пример из конца XIX века связан с одним из знаменитых учёных — Эрнстом Махом. Мах был физиком и философом. Его работы вдохновляли Витгенштейна и логических позитивистов. В то время, когда он активно занимался научной деятельностью, гипотеза молекулярного строения вещества всё ещё оставалась недоказанной гипотезой, и так продолжалось вплоть до 1905 года, в котором Эйнштейн опубликовал свою знаменитую работу о броуновском движении.

Несмотря на то что Больцман уже показал, что свойства газов могут быть объяснены атомистической теорией, Мах настаивал на том, что до сих пор никому не удалось доказать реальность атомов. Он допускал, что атомистическая теория могла служить полезной математической

<sup>1</sup> См. главу 7.

моделью, но упорно утверждал, что невозможность фальсификации подрывает её статус настоящей научной теории.

Фальсификация — это, на мой взгляд, отвлекающий манёвр, но подтверждение — уже совсем другая история (возможно, это то, что на самом деле имел в виду Смолин). Под подтверждением я имею в виду прямые положительные доказательства гипотезы, а не отсутствие опровергающих её данных. Теория вечной инфляции, описанная в главе 11, и существование множества карманных вселенных не могут быть подтверждены таким же способом, каким умные рыбы могли бы подтвердить свою версию ихтиотропного принципа. Не нарушая законы природы, осетрологи способны построить заполненные водой сверхпрочные корабли, подняться в них на поверхность океана и наблюдать другие планета, звёзды и галактики. Возможно, им даже удалось бы посетить эти небесные тела и подтвердить существование огромного разнообразия различных условий. К сожалению, есть непреодолимые препятствия (см. главу 12) для осуществления подобной программы исследований в отношении карманных вселенных. Принципиальным моментом является существование космических горизонтов, отделяющих нас от других карманов. В главах 11 и 12 мы обсудим горизонты и вопрос, являются ли они действительно непреодолимым барьером для получения информации. Но критики, безусловно, правы в том, что в обозримом будущем мы застряли в нашем собственном кармане без какой бы то ни было возможности непосредственного наблюдения других вселенных. Как в случае с кварками, подтверждение не будет прямым и будет опираться преимущественно на теоретические доказательства.

Что касается строгих философских правил, было бы верхом глупости отказываться от какой-либо идеи только потому, что она нарушает чьи-то философские изречения о фальсифицируемости. Как правильно отвечать критикам, когда происходит нечто подобное? Я думаю, единственное, что нужно сказать, — что мы делаем всё возможное, чтобы найти объяснения закономерностям, которые наблюдаем в окружающем мире. Время отделит хорошие теории от плохих, и они станут частью науки. Плохие теории займут своё законное место на свалке истории. Как подчеркнул Вайнберг, у нас нет никаких объяснений малости космологической постоянной, кроме антропной аргументации.

Станет ли антропный принцип частью науки или будет списан в утиль? Ни строгие философские правила, ни учёные не смогут помочь ответить на этот вопрос. Подобно тому, как генералы всегда готовятся к прошедшей войне, философы всегда разбираются только в прошлых научных революциях.

В завершение этой главы я хотел бы обсудить одно из наиболее популярных возражений против антропного принципа. Его суть в том, что антропный принцип не является неверным, он является просто глупой тавтологией. *«Конечно же, мир должен быть таким, чтобы в нём была возможна жизнь. Жизнь — это наблюдаемый факт. И, разумеется, там, где нет никакой жизни, некому наблюдать Вселенную и задавать эти дурацкие вопросы. И что из этого следует? То, что антропный принцип не сообщает нам ничего нового, кроме факта нашего собственного существования».*

Введём новый принцип — я назову его *головотропным*. Головотропный принцип предназначен для ответа на вопрос: «Как так получилось, что мы оказались обладателями такого большого и мощного мозга?» Вот как звучит ответ:

«Законы биологии требуют наличия существа с чрезвычайно развитым мозгом объёмом не менее 1400 кубических сантиметров, потому что без наличия такого мозга некому будет даже поинтересоваться, каковы законы биологии».

Это звучит чрезвычайно глупо, хотя и является правдой. Однако головотропный принцип в реальности представляет собой стенографическую запись более длинной и более интересной истории. Даже двух возможных историй. Первая история — про креационистов.

Бог сотворил человека для того, чтобы человек восхвалял и поклонялся Богу. Забудем эту историю. Задача науки состоит в том, чтобы опровергать подобные истории.

Другая история гораздо более сложная и, я надеюсь, интересная. Она имеет несколько особенностей. Прежде всего, она рассказывает о том, что Законы Физики и химии разрешают существование компьютероподобных нейронных сетей, способных проявлять интеллект. Другими словами, ландшафт биологических конструкций содержит небольшое количество очень специфических конструкций, которые мы называем разумными. Это не тривиально.

— механизма превращения этого эскизного проекта в опытную работающую модель. Тут-то на сцену и выходит Дарвин. Случайные ошибки копирования совместно с естественным отбором приводят к появлению дерева или куста, ветви которого заполняют все доступные ниши, в том числе и нишу существ, выживаемость которых определяется их умственными способностями. Как только кто-то понял этот механизм, вопрос «Почему я просыпаюсь по утрам с таким большим мозгом?» получает точный головотропный ответ: «Потому что только большой мозг задаёт вопросы».

Антропный принцип может звучать так же глупо. «Законы Физики должны допускать существование жизни, потому что если бы они не допускали существования жизни, то не существовало бы никого, кто мог бы задать вопрос, почему Законы Физики допускают существование жизни». Критики правы — это звучит глупо, это простая констатация очевидного факта (мы существуем, поэтому законы природы должны допускать наше существование) без описания какого-либо механизма, влияния выбора Законов Физики на наше существование. Но если воспринимать антропный принцип как стенографическую запись истории существования фантастически богатого ландшафта и описание механизма его заселения (см. главу 11) карманными вселенными, то он уже не выглядит тривиальным. В нескольких последующих главах я представлю вам доказательства того, что наша лучшая математическая теория предоставляет нам именно такой ландшафт.





## Глава 7

# МИР НА РЕЗИНКАХ

Огромное количество счастливых совпадений, описанное в предыдущих главах, включая невероятно тонкую настройку космологической постоянной, даёт нам веские основания прислушаться к антропным аргументам, по крайней мере не отвергать их с порога. Но одни упомянутые совпадения не убедили бы меня занять решительную позицию по этому вопросу. Успех инфляционной теории (инфляция подразумевает гигантскую Вселенную) и открытие небольшой плотности энергии вакуума сделали антропный принцип привлекательным, но лично для меня «соломинкой, сломавшей спину верблюда» было осознание того, что теория струн двигалась в, казалось бы, порочном направлении. Вместо приближения к единой уникальной системе физических законов она породила постоянно растущую свалку машин Руба Голдберга. Я чувствовал, что цель достижения единого уникального струнного мира постоянно отступает подобно миражу и что теоретики, ищущие такой уникальный мир, обречены на неудачу.

Но я ощущал экстраординарную возможность извлечь пользу из приближающейся катастрофы: теория струн могла бы дать нам своего рода технический каркас, в котором антропный принцип обрёл бы смысл. Единственная проблема состояла в том, что хотя теория струн и предоставляла массу возможностей, она не была *достаточной* теорией. Я спрашивал своих друзей: «Уверены ли вы, что число многообразий Калаби — Яу составляет лишь несколько миллионов?» Если

отойти от математического жаргона, то суть моего вопроса сводилась к следующему: «Уверены ли вы, что количество различных вариантов вакуума в теории струн (или, что то же самое, количество различных долин Ландшафта) исчисляется несколькими миллионами?» Несколько миллионов возможностей, когда вы пытаетесь объяснить сокращение 120 десятичных знаков, — это меньше, чем капля в море.

Но все изменилось в 2000 году, когда молодой «пост-док» Рафаэль Буссо из Стэнфордского университета вместе со своим старым другом Джо Полчински из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре опубликовали статью, в которой объясняли, как количество возможных вакуумов может стать настолько большим, что легко покроет все варианты подгонки 120-значного числа. Вскоре мои стэнфордские коллеги Шамит Качру, Рената Каллош, Андрей Линде и индийский физик Сандип Триведи подтвердили этот вывод. Это-то мне и было нужно. Я пришёл к выводу, что исключительно рациональное объяснение тонкой настройки природы при помощи теории струн и некоторых антропных аргументов вполне возможно. Я написал статью под названием «Антропный ландшафт теории струн», чем разворошил осиное гнездо, которое гудит до сих пор. Итак, я начинаю первую из трёх глав (7, 8 и 10), посвящённых рассказу о теории струн.

## Адроны

«Три кварка для мистера Марка», — писал Джеймс Джойс. «Три кварка для протона, три кварка для нейтрона и кварк с антикварком для мезона», — заявил Марри Гелл-Ман. Марри, носившийся со словами как с фетишами, обогатил словарь физики высоких энергий такими терминами, как «кварк», «странность», «квантовая хромодинамика», «алгебра токов», «восьмеричный путь» и другие. Я не уверен, принадлежит ли ему также и термин «адрон»<sup>1</sup>. Первоначально адроны определялись как нечто, сочетающее в себе некоторые свойства нуклонов (протонов и нейтронов). Сегодня же мы имеем точное определение

<sup>1</sup> Термин «адрон» был предложен в 1962 году советским физиком Л. Б. Окунем на Международной конференции по высокоэнергетической физике в ЦЕРНе. — *Примеч. пер.*

адрона как частицы, состоящей из кварков и глюонов. Другими словами, это частицы, которые являются предметом описания квантовой хромодинамики (см. главу 1).

Что же означает слово *адрон*? Слово *ádrón* в переводе с греческого означает «мускулистый» или «крепкий». При этом слово «крепкий» относится не к самой частице — разбить протон гораздо проще, чем, например, электрон, — а к силам, действующим между адронами. Одним из наиболее ранних достижений физики элементарных частиц было обнаружение четырёх типов взаимодействий между ними. Основным различием этих взаимодействий является сила, с которой частицы действуют друг на друга. Самым слабым типом взаимодействий между частицами является *гравитационное*. Следующим по силе идёт так называемое *слабое взаимодействие*, затем — давно знакомое нам *электромагнитное* и, наконец, *сильное взаимодействие*, называемое иногда *ядерным*.

Вам может показаться странным, что наиболее известное из всех взаимодействий — гравитация — является самым слабым. Но задумайтесь на мгновение. Гравитации требуется задействовать всю массу Земли, чтобы держать нас на её поверхности. Сила, с которой взаимодействует с Землёй средний человек, стоя на её поверхности, составляет всего 70 килограммов. Разделите эту силу на количество атомов в теле человека, и станет очевидным, что сила, приходящаяся на один атом, ничтожна.

Но если электрические силы настолько сильнее гравитационных, почему же они не выкидывают нас прочь с поверхности Земли или, наоборот, не размазывают по ней? Гравитационные силы, действующие между любыми двумя объектами, всегда являются силами притяжения (если не учитывать отталкивающую составляющую, за которую ответственна космологическая постоянная). Каждый электрон и каждое атомное ядро нашего тела притягивают каждый электрон и каждое атомное ядро Земли. Это приводит к появлению ощутимой суммарной силы притяжения, несмотря на то что силы, действующие между отдельными частицами, крайне малы. В противоположность гравитации электрические силы зависят от знака зарядов и могут быть как силами притяжения, так и отталкивания. Разноимённые заряды, например электрон и протон, притягиваются, а одноимённые, скажем два электро-

на или два протона, — отталкиваются. Но и наше тело, и вся Земля состоят из положительных и отрицательных зарядов, число которых практически одинаково, в результате чего электрические силы притяжения полностью компенсируют силы отталкивания. Но предположим, что мы временно удалили все электроны из наших тел и из всех атомов Земли. Оставшиеся положительные заряды будут отталкиваться с силой, во много раз превосходящей силу их взаимного гравитационного притяжения. На сколько превосходящей? Примерно в  $10^{40}$  раз — единица и сорок нулей! Под действием такой силы вы будете мгновенно выкинуты с поверхности Земли практически со скоростью света. По правде говоря, такое никогда не может случиться. Положительные заряды в наших телах будут отталкиваться друг от друга настолько сильно, что мы будем мгновенно разорваны в пух и прах. И то же самое произойдет с Землей.

Электрические силы не являются ни самыми сильными, ни самыми слабыми из негравитационных сил. Большинство обычных частиц взаимодействуют посредством так называемого *слабого взаимодействия*. Хорошим примером являются нейтрино, участвующие только в слабых (не считая гравитационных) взаимодействиях. Слабые силы на самом деле не так уж и слабы, но они действуют только на очень малых расстояниях. Два нейтрино должны оказаться невероятно близко друг от друга, чтобы провзаимодействовать, — примерно на расстоянии одной тысячной диаметра протона. Если они находятся на таком расстоянии, то величина слабого взаимодействия между двумя нейтрино будет примерно такой же, как и величина электромагнитного взаимодействия между двумя электронами, но в обычных условиях сила слабого взаимодействия составляет лишь небольшую часть от силы электромагнитного. Слабые силы настолько малы, что рождаемые в недрах Солнца нейтрино легко проходят сквозь всю толщу Солнца и сквозь Землю без сколько-нибудь заметного возмущения. На самом деле они могут пройти через слой свинца толщиной в один световой год.

Наконец, мы подошли к самому сильному из всех взаимодействий, которые удерживают вместе частицы, составляющие атомное ядро. Ядро состоит из электрически нейтральных нейтронов и положительно заряженных протонов. В ядре нет никаких отрицательных зарядов. Почему же оно не взрывается? Потому что протоны и нейтроны при-

тягиваются друг у друга с силой, примерно в 50 раз превышающей их электростатическое отталкивание. Кварки, составляющие отдельные протоны, притягиваются друг к другу с ещё большей силой. Почему же протоны и нейтроны наших тел не притягиваются с такой же огромной силой к протонам и нейтронам Земли? Потому что ядерные силы, так же как и слабые, являются короткодействующими. Они способны преодолеть электрическое отталкивание протонов, только когда протоны находятся близко друг от друга. Стоит частицам удалиться одна от другой более чем на пару диаметров протона, и сильное взаимодействие становится незначительным. В основе сильного взаимодействия лежат силы, действующие между кварками — элементарными частицами, из которых состоят адроны.

Я часто испытываю дискомфорт, своего рода смущение, когда мне приходится рассказывать о физике элементарных частиц «мирянам». Со стороны она выглядит мусорной свалкой, разнородной коллекцией фундаментальных частиц, массы которых не подчиняются никаким закономерностям; и, управляя всем, торчит четвёрка сил некстати, в причинах коих сил ни смысла нет, ни стати. Является ли Вселенная «элегантной», как утверждает Брайан Грин? Насколько я могу судить, нет. Во всяком случае, глядя на Законы Физики элементарных частиц. Но в контексте бесконечного разнообразия Мегаверсума существует некоторая закономерность: все силы и большинство элементарных частиц являются абсолютно необходимыми. Стоит хотя бы немного изменить любой из законов или любое из свойств любой частицы, и жизнь в том виде, в каком мы её знаем, станет невозможной.

## Происхождение теории струн

Теоретическая физика высоких энергий в 1960-х годах оперировала весьма необычной идеологией. В чём-то эта идеология созвучна идеям физиолога Б. Ф. Скиннера, гуру *бихевиоризма*, утверждавшего, что только внешнее поведение человека может служить объективным материалом для изучения человеческого мышления. Согласно Скиннеру, физиолог не должен иметь дела с внутренним психическим состоянием человека. Он зашёл настолько далеко, что утверждал, будто такой

, как внутренний психологический мир, вообще не существует. Задача физиолога состоит в наблюдении, измерении и фиксации внешнего поведения субъекта без каких бы то ни было попыток судить о его внутренних чувствах, мыслях или эмоциях. Для бихевиориста человек представляет собой чёрный ящик, преобразующий сигналы от органов чувств на входе в поведение на выходе.

Физический бихевиоризм называется *теорией S-матрицы*. В начале 1960-х, когда я ещё был студентом, многие продвинутые теоретики в Беркли считали, что физики не должны пытаться объяснить внутреннее устройство адронов, а вместо этого рассматривать набор законов адронной физики как чёрный ящик, называемый *матрицей рассеяния*, или просто S-матрицей. Подобно бихевиористам, защитники S-матрицы требовали, чтобы теоретическая физика строго ограничивалась областью экспериментальных данных и не занималась спекуляциями относительно ненаблюдаемых (как тогда считалось) явлений, будто бы имеющих место на абсурдно малых расстояниях, например внутри протона.

На вход чёрного ящика подавался специфический набор частиц, сталкиваемых друг с другом. Это могли быть протоны, нейтроны, мезоны и даже атомные ядра. Каждая частица характеризовалась импульсом, спином, электрическим зарядом и другими индивидуальными свойствами. Эти частицы исчезали внутри метафорического чёрного ящика, а затем на выходе регистрировался другой набор частиц — результат столкновения, опять же каждая со своими индивидуальными свойствами. Догма Беркли запрещала заглядывать внутрь чёрного ящика в попытке узнать устройство его механизма. Всё, что мы имели, — только исходный и конечный наборы частиц. Этот подход полностью соответствовал тому, чем занимались экспериментаторы на ускорителях, имея пучки высокоэнергетичных частиц на входе и данные детекторов, регистрирующих продукты столкновений, на выходе.

S-матрица — это просто таблица квантово-механических вероятностей. Вы имеете входные данные, а S-матрица сообщает вам вероятности того, что вы можете получить на выходе. Таблица вероятностей зависит от направлений и энергий входящих и выходящих из чёрного ящика частиц, и, согласно превалирующей идеологии середины

-х годов, теория элементарных частиц должна быть строго ограничена изучением зависимости  $S$ -матрицы от этих переменных. Всё остальное было запрещено. Идеологи решили, что они лучше знают, как лучше для науки, и превратились в стражей научного пуризма. Теория  $S$ -матрицы была здоровым напоминанием о том, что физика является эмпирической наукой, но, как и в случае с бихевиористами, философия  $S$ -матрицы завела их слишком далеко. По мне, это всё походило на засовывание удивительного цветного мира в серый унылый стерилизатор бухгалтерских таблиц. И я взбунтовался. Но у меня не было подходящей для бунта теории.

В 1968 году молодой итальянский физик Габриэле Венециано жил и работал в Израиле в институте Вейцмана. Он не был идеологически подкован в вопросах теории  $S$ -матрицы, но его занимала одна имеющая отношение к  $S$ -матрице математическая задача. Существовали определённые технические требования, которым должна удовлетворять  $S$ -матрица, но никто до того времени не мог написать ни одного удовлетворяющего этим требованиям математического выражения. Венециано пытался найти хотя бы одно. Его попытка завершилась блестящим успехом. Он получил чрезвычайно аккуратный результат, известный сегодня как «амплитуда Венециано». Но это не было изображением внутреннего строения каких-то частиц или визуализацией процессов столкновения. Амплитуда Венециано была красивым математическим выражением — элегантно математической таблицей вероятностей.

Процесс открытия теории струн, который в определённом смысле все ещё продолжается, изобилует поворотами судьбы, предательствами фортуны и интуитивными озарениями. Моё собственное участие в нём началось где-то в конце 1968 или в начале 1969 года. Я начал уставать от проблем элементарных частиц; особенно досаждали мне адроны, концепция которых, казалось, мало что может предложить в плане новых глубоких принципов. Я нашёл метод  $S$ -матрицы скучным и начинал подумывать о том, чтобы заняться соединением квантовой механики и гравитации. Соединение общей теории относительности с принципами квантовой механики казалось гораздо более интересной задачей, несмотря на то что все имевшиеся экспериментальные данные касались исключительно адронов. Но как раз в это время меня посетил



в Нью-Йорке мой израильский друг Гектор Рубинштейн, который был чрезвычайно воодушевлён работой Венециано.

Сначала я не особо заинтересовался. Адроны были тем, о чём я хотел забыть, но из вежливости я согласился выслушать Гектора.

Гектор был настолько возбуждён, объясняя мне идеи итальянца, что я не вполне улавливал детали. Насколько я мог понять, Венециано придумал формулу для описания того, что произойдёт при столкновении двух адронов. Наконец, Гектор записал уравнение Венециано на доске в моем офисе. Это был финальный аккорд. Уравнение оказалось чрезвычайно простым и имело некоторые особенности, показавшиеся мне подозрительно знакомыми. Я, помню, спросил Гектора, не представляет ли это уравнение описание какой-то очень простой квантово-механической системы, потому что оно выглядело так, будто бы имело отношение к гармоническим осцилляторам. Гектор не знал, какая физическая картина могла бы стоять за этим уравнением, поэтому я просто записал его на листке бумаги, чтобы не забыть.

$$A = g \frac{\Gamma(1 - \alpha(s)) \Gamma(1 - \alpha(t))}{\Gamma(2 - \alpha(s) - \alpha(t))}$$

Я был достаточно заинтригован, чтобы отложить размышления о квантовой гравитации и дать адронам ещё один шанс. Как оказалось, мне не суждено было вернуться к гравитации в течение последующих лет. Я несколько месяцев обдумывал это уравнение, прежде чем увидел то, что стояло за ним в действительности.

Термин *гармонический осциллятор* применяется физиками ко всему, что способно вибрировать, дрожать, колебаться или вообще совершать периодические движения туда-сюда. Ребёнок, качающийся на качелях, и грузик, колеблющийся на пружине, являются примерами типичных гармонических осцилляторов. Вибрирующая скрипичная струна или даже воздух, через который проходит звуковая волна, — это тоже гармонические осцилляторы. Если колеблющаяся система очень мала, например если это атом или молекула, то её поведение определяется законами квантовой механики, и энергия такого осциллятора может изменяться только дискретными порциями. Я упомянул гармонический осциллятор в беседе с Гектором, потому что уравнение Венециано

-механического

гармонического осциллятора. Я представил себе адрон в виде двух грузиков, соединённых пружиной, совершающих гармонические колебания, сближаясь и удаляясь. Я играл с запретным плодом, пытаюсь изобразить внутреннее устройство элементарной частицы, и отдавал себе в этом отчёт.

Танталовы муки, которые я испытывал от ощущения близости ответа и невозможности его ухватить, сводили меня с ума. Я испробовал все варианты квантово-механических осцилляторов, пытаюсь подобрать такой, который вписался бы в уравнение Венециано. Мне удалось написать уравнения, очень похожие на уравнения Венециано, описывающие разные варианты моделей грузиков на пружинках, но все они не годились. В течение этого периода я потратил много часов собственного времени, работая на чердаке своего дома. Возвращаясь оттуда усталым и раздражительным, я ругался с женой и игнорировал детей. Мне не удавалось выкинуть это уравнение из головы даже во время обеда. И вдруг, в один из вечеров, без всякой уважительной причины на меня на чердаке снизошло озарение. Я не знаю, что вызвало к жизни эту мысль: ещё минуту назад я представлял себе пружину и вдруг увидел вместо неё эластичную струну, натянутую между двумя кварками и имеющую много различных мод колебаний. В одно мгновение я понял, что весь трюк состоит в том, чтобы заменить математическую пружину непрерывной натянутой струной. На самом деле слово *струна* тогда не пришло мне на ум. Я подумал о *резиновом кольце*. Если разрезать резиновое кольцо, оно превратится в резинку с двумя свободными концами. На каждый из концов я мысленно поместил по кварку, точнее, кварк на один конец и антикварк на другой.

Я быстро сделал несколько расчётов в своей записной книжке для проверки идеи, хотя уже знал, что это будет работать. Это было потрясюще просто. Уравнение Венециано для  $S$ -матрицы оказалось точным описанием столкновения двух резинок. Почему эта мысль раньше не приходила мне в голову?

Ничто не приносит такую радость, как новые открытия. Это случается нечасто даже у величайших физиков. Вы говорите себе: «Сейчас я — единственный человек на планете, который это знает. Скоро об

этом узнает и остальная часть мира, но на данный момент я — *единственный*». Я был молод и неизвестен и жаждал славы. Но я не был *единственным*.

Примерно в то же самое время один физик из Чикаго проделал те же самые вычисления. Ёитиро Намбу был намного старше меня и уже давно являлся одним из самых выдающихся физиков в мире. Он родился в Японии и пришёл в Чикагский университет молодым физиком сразу после Второй мировой войны. Намбу был звездой и обладал репутацией человека, способного разглядеть некоторые вещи намного раньше всех остальных. Позже я узнал, что ещё один физик в Дании обдумывал весьма схожие идеи. Я не буду отрицать, что был разочарован, узнав, что я не одинок в своей «резиновой» теории, но мысль о том, что я оказался в одной компании с Великим Намбу, тешила моё самолюбие.

Современная теория струн занимается недостижимой унификацией квантовой механики и гравитации, о которую тщетно физики бились своей коллективной головой на протяжении большей части XX века. Другими словами, это теория о том, что представляет собой мир в сказочно крошечном масштабе планковских размеров —  $10^{-33}$  сантиметра. Как я уже рассказал, она началась с гораздо более скромной задачи — описания внутренней структуры адронов. В следующей главе мы увидим, как теория струн переродилась в гораздо более глубокую фундаментальную теорию, но давайте начнём с её более ранней инкарнации.

Адроны являются очень маленькими объектами, они примерно в сто тысяч раз меньше атомов. Диаметр адрона составляет порядка  $10^{-13}$  сантиметра. Для того чтобы удержать кварки на таких малых расстояниях, требуются колоссальные силы. Адронные струны — резинки в моём воображении — хотя и микроскопически малы, тем не менее невероятно прочны. Если бы было возможно прикрепить один конец мезона (одного из типов адронов) к автомобилю, а другой к подъёмному крану, то адронная струна, удерживающая кварки в мезоне, легко выдержала бы вес автомобиля. Относительно масштабов, достижимых в сегодняшних экспериментах, адронные струны не слишком малы. Современные ускорители позволяют исследовать материю на в сто, а то и в тысячу раз меньших расстояниях. Просто для сравнения по-

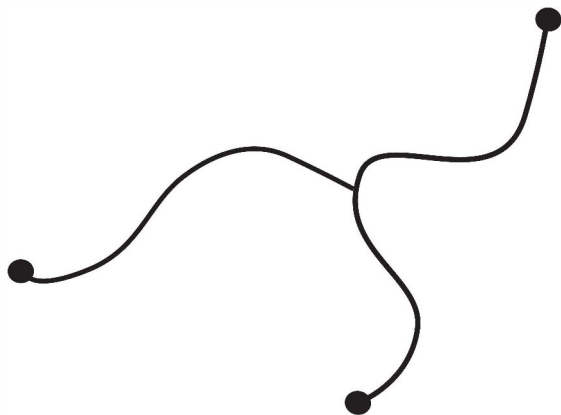
звольте мне забежать вперёд паровоза и показать, что представляет собой прочность струны в её современной инкарнации. Для того чтобы удерживать частицы на расстоянии порядка планковской длины, струна должна быть примерно в  $10^{40}$  раз сильнее, чем адронная струна. Одна-единственная струна была бы способна выдержать вес всей нашей Галактики, если мы могли бы каким-то образом сумели сосредоточить всю массу Галактики вблизи поверхности Земли.

Все адроны подразделяются на три семейства: барионы, мезоны и глюболы. Наиболее известными адронами являются нуклоны — обычные протоны и нейтроны. Они принадлежат к первому семейству — барионам<sup>1</sup>. Все барионы состоят из трёх кварков. Кварки соединяются друг с другом, как предполагается, тремя струнами на манер боласа гаучо: три струны соединены концами в центре, а к свободным концам прикреплены три кварка. Единственное, что неверно в аналогии с боласом, — это то, что адронные струны, в отличие от верёвок, эластичны, они могут *растягиваться* подобно идеальной резиновой нити. Но поскольку обычные протоны и нейтроны представляют собой самую низкоэнергетическую конфигурацию «боласа», то их можно рассматривать как три кварка, соединённых очень короткими *нерастяжимыми* нитями.

Кварки на концах струн могут двигаться множеством способов. Например, «болас» может вращаться вокруг центральной точки, где соединяются концы струн, и в этом случае центробежная сила будет растаскивать кварки в разные стороны. Вращение требует энергии (вспомните  $E = mc^2$ ), а это значит, что вращающийся адрон будет тяжелее невращающегося. На физическом жаргоне частица, обладающая дополнительной внутренней энергией, называется *возбуждённой*. Кварки могут образовать возбуждённое состояние адрона и не вращаясь. Примером такого состояния могут служить колебательные движения кварков в направлении центра. Вдобавок и сами струны могут вибрировать наподобие гитарных. Все эти движения или, по крайней мере, косвенные свидетельства таких движений регулярно наблюдаются

<sup>1</sup> Префикс «бари» по-гречески означает «тяжёлый». Когда придумывались имена элементарных частиц, нуклоны и их близкие родственники были самыми тяжёлыми из известных частиц. Слово «мезон» указывает на что-то среднее. Мезоны легче нуклонов, но гораздо тяжелее электронов.

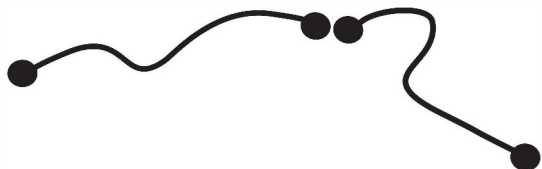
в реальных экспериментах с нуклонами. Барions действительно ведут себя как эластичный *квантовый* болас.



Что же означает в данном случае «квантовый»? Квантовая механика подразумевает, что энергия (масса) любой колебательной системы может добавляться или отниматься только неделимыми дискретными порциями. На заре экспериментальной адронной физики исследователи не предполагали, что различные квантовые состояния осциллирующей системы представляют собой один и тот же объект, поэтому они давали каждому энергетическому уровню собственное имя, принимая эти уровни за разные элементарные частицы. Протоны и нейтроны являются барионами с наименьшей внутренней энергией. Более массивные состояния получили замысловатые имена, многие из которых уже ничего не говорят современным молодым физикам, поскольку для них это не более чем возбуждённые состояния нейтрона и протона. Поняв суть, физики навели, наконец, порядок в существовавшем до этого зоопарке частиц.

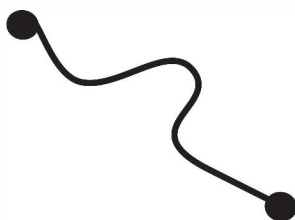
Следующим у нас идёт мезон — частица, которую я изучал на чердаке моего дома в 1969 году. Мезоны устроены гораздо проще, чем барионы. Каждый мезон состоит из кварка и антикварка, соединённых одной струной. Подобно барионам мезоны обладают вращательными и колебательными квантовыми состояниями. Расчёт, который я сделал тогда на чердаке, описывал основной процесс взаимодействия между двумя мезонами-струнами.

При столкновении двух мезонов может произойти несколько различных событий. Поскольку квантовая механика предсказывает только вероятности событий, невозможно заранее предсказать, по какому пути будет разворачиваться история столкновения. Самым вероятным и самым неинтересным вариантом будет прохождение мезонов друг сквозь друга, несмотря на то что при этом и струны, соединяющие кварки и антикварки, тоже пройдут друг сквозь друга. Но существует другая, более интересная возможность: мезоны могут слиться вместе, образовав новый мезон, в котором кварк и антикварк соединены более длинной струной.



Представьте каждую струну в виде группы танцоров, взявшихся за руки, чтобы образовать цепочку. У танцоров, находящихся на конце цепочки, одна рука свободна, а у танцоров в середине цепочки обе руки заняты. На рисунке изображены две цепочки, летящие друг к другу. Единственный способ, которым они могут провзаимодействовать, состоит в том, что танцор на конце одной цепочки возьмёт за свободную руку танцора на конце другой. После этого обе группы танцоров образуют единую цепочку. В этой конфигурации танцоры качаются друг относительно друга в сложном танце, до тех пор пока где-то в середине цепочки один из танцоров не отпустит руку своего соседа. Тогда цепочка снова распадётся на две независимых цепочки, и они продолжат своё движение в новом направлении, удаляясь друг от друга. Более точное, но менее наглядное описание выглядит так: кварк на конце одной струны соединяется с антикварком на конце другой. При этом кварк и антикварк аннигилируют, как и любые другие частицы и античастицы, оставляя после себя одну более длинную струну с оставшимися кварком и антикварком на концах.

Возникающая в результате слияния двух мезонов струна, как правило, оказывается в возбуждённом состоянии, включающем как вращательные, так и колебательные моды. Но спустя некоторое время



струна, подобно цепи танцоров, распадается надвое, образуя на свободных концах кварк и антикварк. В итоге мы имеем процесс, в ходе которого две струны соединяются в одну, которая затем снова распадается надвое.

Задача, которую я решил на чердаке, формулировалась следующим образом: предположим, что два мезона (две струны) до столкновения двигались с заданной энергией во встречных направлениях. Какова квантово-механическая вероятность того, что образовавшаяся после столкновения новая пара мезонов будет разлетаться в некотором заданном направлении? Задача выглядит ужасно сложной, и это просто математическое чудо, что она может быть решена.

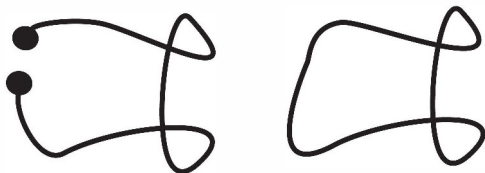
Математическая задача описания идеального резинового шнура была решена ещё в начале XIX века. Колеблющуюся струну можно рассматривать как совокупность гармонических осцилляторов — по одному для каждого отдельного типа (моды) колебаний. Гармонический осциллятор — одна из немногих физических систем, которые могут быть полностью проанализированы с помощью очень простой математики уровня средней школы.

Добавить квантово-механическое описание, чтобы превратить струну в квантовый объект, тоже не составляет труда. Все, что необходимо помнить, — это что уровни энергии любой квантово-механической колебательной системы обладают дискретными значениями энергии (см. главу 1). Этих простых соображений достаточно, чтобы понять свойства одной колеблющейся струны, но описание двух взаимодействующих струн гораздо сложнее. Для этого мне пришлось разработать собственные правила с нуля, что сделало возможным локализовать сложное описание только для бесконечно малого времени, в течение которого происходит объединение струн. Как только это произойдёт, две струны снова становятся одной, описываемой простой математикой.



Чуть позже струна рвётся, и этот процесс снова требует сложного описания, но опять же лишь для короткого промежутка времени. Таким образом, я сумел с большой точностью описать процесс объединения двух струн и последующего распада получившейся струны. Результат своих математических расчётов я сопоставил с уравнением Венециано, и они согласовались с идеальной точностью.

Барион представляет собой три струны, соединённые «звездой», мезон — одну открытую струну, но что такое глюбол? Начнём с цепочки танцоров. Допустим, танцоры, двигаясь в своём сложном танце, изогнули цепочку так, что два крайних танцора оказались рядом друг с другом. Не понимая, что они принадлежат к одной и той же цепочке, они могут взяться за руки. В результате получается замкнутый круг танцоров без свободных концов. То же самое может произойти и с колеблющимся мезоном. Предположим, что в процессе колебаний и вращений концы мезонной струны случайно оказались друг возле друга. Кварк на одном конце видит антикварк на другом и, не догадываясь, что его коллега принадлежит тому же самому мезону, хватается за него, как змея собственный хвост. В результате получается глюбол: замкнутая струна, не имеющая на своих концах кварков. Большинство мезонов и барионов было известно задолго до создания теории струн, но глюболы были предсказаны ею, так сказать, с чистого листа. И если сегодня вы посмотрите на список известных частиц, то глюболы и их массы будут перечислены в нём наряду с барионами и мезонами.



Мезон превращается в глюбол

Глюболы, мезоны и барионы являются сложными объектами, которые могут вращаться и колебаться множеством способов. Например, струна, соединяющая концы мезона, может вибрировать, как пружина или даже как скрипичная струна; он может даже вращаться вокруг

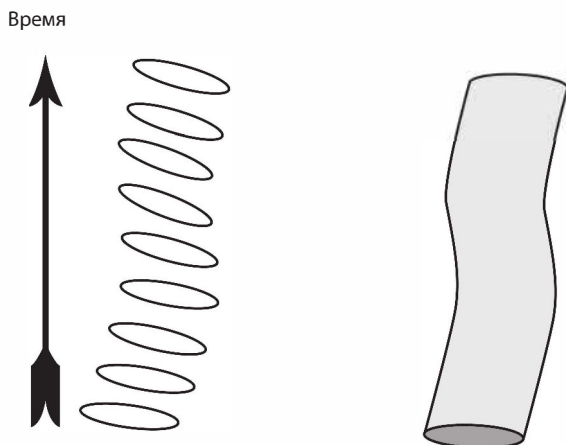
своей середины, растягиваясь под действием центробежной силы и образуя своеобразный адронный пропеллер. Эти возбуждённые состояния адронов соответствуют известным объектам, часть которых была обнаружена в экспериментах ещё в 1960-х.

Связь теории адронных струн с Законами Физики, и в частности с их формулировкой в терминах фейнмановских диаграмм, отнюдь не очевидна. Одним из способов визуализации теории струн является генерализация фейнмановских диаграмм путём замены точечных частиц струнами. Фейнмановские диаграммы состоят из основных элементов, которые мы уже рассматривали в главе 1: вершин и пропагаторов. Пропагаторы и вершины хороши для представления бесконечно малых *точечных частиц* квантовых полей. Например, вершина сама по себе является точкой, в которой сходятся траектории частиц. Если же сами частицы не являются точками, то не совсем понятно, что означает точка встречи их траекторий. Как же придать смысл пропагаторам и вершинам для струн? Когда мы имеем дело с *точечной частицей*, мы представляем её движение в виде линии в пространстве-времени. В каждый момент времени частица представляется точкой, но в результате движения эта точка разворачивается в кривую линию. Великий Минковский назвал траекторию движения частицы в пространстве-времени *мировой линией*, и этот термин прочно вошёл в науку.



Теперь представим себе, как могла бы выглядеть история струны в пространстве-времени. Возьмём замкнутую струну, не имеющую концов. В каждый конкретный момент времени такая струна будет представляться в пространстве замкнутой кривой. Представьте себе, что эту струну освещает стробоскоп. Во время первой вспышки мы увидим кольцо. При следующей вспышке мы увидим то же самое кольцо, только в другом месте. В конечном итоге мы увидим набор колец, отображающий последовательные положения струны.

Но в действительности время течёт непрерывно, и чтобы составить полную историю движения струны, нужно заполнить промежутки между её последовательными изображениями. В результате получится трубка, проходящая через пространство-время: двумерная цилиндрическая поверхность.

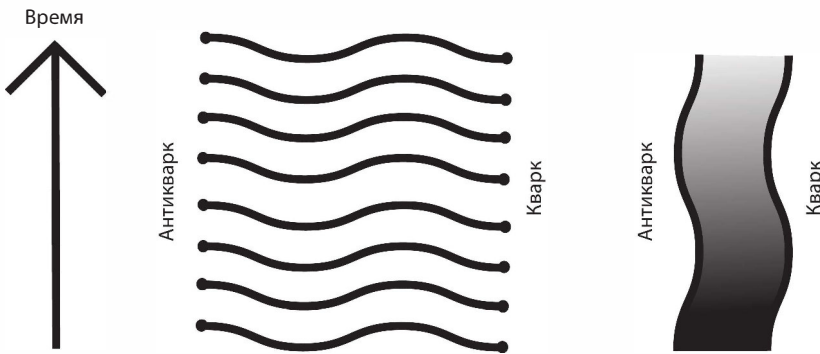


Размер кольца струны может изменяться со временем, ведь струна способна сжиматься, растягиваться и колебаться. Временами она может даже самопересекаться, образуя подобие восьмёрки или принимая более сложные формы. В этом случае цилиндр окажется деформированным, но в нём всё ещё можно будет узнать цилиндр.

Поверхность, заметаемую кольцом, можно было бы очень удачно назвать трубкой мира по аналогии с мировой линией. Но так случилось, что в физике прижился другой термин: *мировой лист*, или мировая поверхность. Но как бы мы его ни называли, этот цилиндр представляет

собой пропагатор струны, который приходит на замену пропагатору точечной частицы.

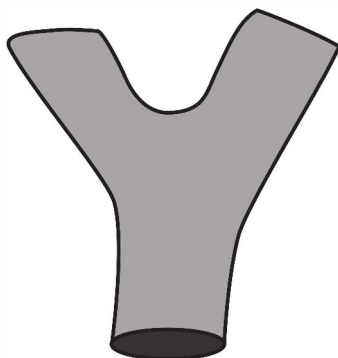
Мезон, оканчивающийся двумя кварками, тоже может быть представлен в виде мирового листа, только это будет не цилиндр, а лента, имеющая два края. Вернёмся к аналогии со стробоскопом. Теперь мы будем видеть последовательность открытых струн с кварками на концах. Заполнив пространство между последовательными изображениями мезона, мы получим мировой лист в виде ленты.



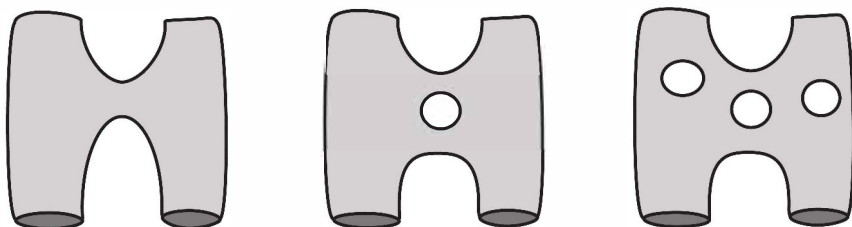
Но для интересной теории, которая способна была бы описывать сложные взаимодействия сталкивающихся частиц, недостаточно одних только пропагаторов. Нужны ещё вершины, развилки дорог, в которых частицы могли бы излучать и поглощать другие частицы. И теория струн не исключение.

Вершина для открытой струны должна выглядеть как обычная дорожная развилка: в какой-то момент времени струна разрывается по середине, на образовавшихся свободных концах образуются кварк и антикварк, и вот уже две струны продолжают своё путешествие. Закрытые струны тоже могут разделяться на две. Соответствующая этому процессу диаграмма выглядит как Y-образная развилка водопроводной трубы.

Если вы будете следовать по этой диаграмме снизу вверх (от прошлого к будущему), вы увидите, как одна струна расщепляется на две, каждая из которых удаляется в своём направлении. Перевернув диаграмму, вы получите процесс слияния двух струн в одну.



Идея заключается в том, чтобы заменить обычные фейнмановские диаграммы сетью водопроводных труб, представляющих собой пропэгаторы струн, и Y-образных развилок, заменяющих прежние вершины. Очень быстро теоретики поняли, что деление диаграммы на цилиндрические пропэгаторы и Y-сочленения носит искусственный характер и что в действительности теория содержит мировые листы любой формы и топологии. Диаграммы могут содержать отверстия, представляющие входящие и выходящие струнноподобные глоболы, но в общем случае они могут быть любой сложности.



Этот способ представления адронов трудно связать со Стандартной моделью, теорией, основанной на обычных фейнмановских диаграммах, (то есть на точечных частицах). Современная Стандартная модель включает то, что на первый взгляд выглядит как совершенно отличная от всего предыдущего теория адронов — теория, известная под названием *квантовая хромодинамика*, или КХД.

Согласно КХД, адроны состоят из кварков и антикварков. В этом КХД имеет много общего с теорией струн, которую разрабатывали мы

с Намбу. Но удерживающая кварки вместе сила — *клей*, скрепляющий адроны, — совершенно не похожа на струны. Кварки испускают и поглощают глюоны<sup>1</sup> точно так же, как электроны испускают и поглощают фотоны. Силы, удерживающие кварки в адронах, обязаны своим происхождением обмену глюонами между кварками.

У глюонов есть одна особенность, которая делает их более сложными, чем фотоны. Заряженные частицы могут излучать и поглощать фотоны, но сами фотоны не обладают такой способностью. Другой способ сказать то же самое: не существует вершин, в которых один фотон распадается на два. Глюоны же способны испускать и поглощать другие глюоны.

Существует вершинная диаграмма, на которой три глюона соединяются в одной вершине. В конечном итоге это делает глюоны и кварки гораздо более «липкими», чем электроны и позитроны.

Всё это выглядит так, будто существуют две различные теории адронов: КХД и теория струн. Но, разумеется, почти с самого момента появления теории струн было очевидно, что эти два описания в действительности — лишь два лица одной и той же теории. Просто ключевое Озарение опередило на пару лет открытие КХД.

Мост между обычными фейнмановскими диаграммами и теорией струн показался из тумана, когда в 1970 году я получил письмо от блестящего молодого датского физика Хольгера Бех Нильсена. Он был в восторге от моей статьи, где я излагал теорию с резинкой, и хотел поделиться некоторыми из своих идей. В письме он сообщал, что тоже думал о чём-то, очень похожем на упругую струну, и излагал свои соображения под несколько другим углом.

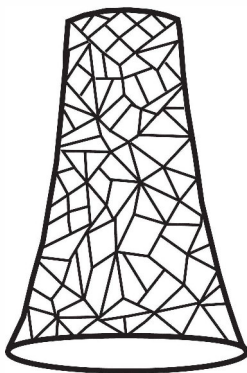
Идея соединить теорию струн с фейнмановскими партонами<sup>2</sup> была созвучна тому, о чём я сам размышлял в течение продолжительного времени. Нильсен глубоко изучил вопрос и имел собственное, весьма интересное видение проблемы. Он предложил считать, что гладкий

<sup>1</sup> Слово «глюон» происходит от английского слова glue — клей. — *Примеч. пер.*

<sup>2</sup> Термин «партон» происходит от английского слова part — часть. Партоны — точечные частицы, из которых состоят адроны, обнаружены в экспериментах по неупругому рассеянию адронов на электронах и других адронах. Партоновая модель была предложена Ричардом Фейнманом в 1969 году. Впоследствии партоны были отождествлены с кварками и глюонами. — *Примеч. пер.*

непрерывный мировой лист на самом деле представляет собой мелкую сеть из линий и узлов. Другими словами, мировой лист в его представлении был обыкновенной, но чрезвычайно сложной фейнмановской диаграммой, состоящей из огромного числа пропагаторов и вершин. Эта сеть становилась всё более и более гладкой по мере добавления в неё новых вершин и пропагаторов и всё лучше и лучше аппроксимировала гладкий мировой лист. Теория адронных струн тоже может быть сформулирована подобным способом.

Мировые листы, трубки и Y-образные сочленения можно представить как очень сложные фейнмановские диаграммы с участием кварков и огромного количества глюонов. Когда вы смотрите на мировой лист «с большого расстояния», он кажется гладким. Но «под микроскопом» мировой лист выглядит как рыболовная сеть<sup>1</sup> или как баскетбольная корзина, сплетённая из фейнмановских диаграмм. Нити рыболовной сети представляли пропагаторы точечных частиц, узлы — партоны Фейнмана или кварки и глюоны Гелл-Мана, а «ткань», сотканная из этих микроскопических мировых линий, — непрерывный мировой лист.



Вы можете представить струну как набор партонных нанизанных один за другим подобно нитке жемчуга. Фейнмановская партонная теория, Гелл-Мановская кварковая теория и моя «резиновая» теория — всё это различные способы представления квантовой хромодинамики.

<sup>1</sup> Нильсен использовал для своих диаграмм название «рыболовная сеть».



Струнной, или «резиновой» модели адронов не сопутствовал немедленный успех. Многие теоретики, занимавшиеся адронной физикой в 1960-х годах, выражали весьма негативное отношение к любой теории, которая пыталась визуализировать явления. Рьяные сторонники теории S-матрицы утверждали, что столкновение — это непознаваемый «чёрный ящик», и отстаивали своё неприятие новой теории с почти миссионерским рвением. Они признавали только одну заповедь — «не срывай покрыва», то есть «не заглядывай “внутрь” процесса столкновения, пытаясь обнаружить механизмы происходящих процессов, не пытайся понять строение такой частицы, как протон». Враждебное восприятие идеи о том, что уравнение Венециано описывает столкновение двух резинок, сохранялась до тех пор, пока однажды Мюррей Гелл-Ман не поставил на ней свою печать одобрения.

Мюррей был королём физики, когда я впервые встретился с ним в Корал Гейблс, штат Флорида, в 1970 году. В то время кульминацией сезона теоретической физики была конференция в Корал Гейблс. А кульминацией конференции была лекция Мюррея. Для меня Корал Гейблс оказался первой большой конференцией, на которую я был приглашен не в качестве лектора, а в качестве слушателя. Мюррей начал свою лекцию с темы *спонтанного нарушения дилатационной симметрии* — одной из проблем, с которой у него были проблемы. Едва ли я смогу вспомнить саму лекцию, но очень хорошо помню, что произошло потом: мы с Мюрреем застряли в лифте.

Я был тогда совершенно неизвестен, в то время как всё физическое сообщество боготворило Мюррея. Разумеется, застряв с ним в лифте, я потерял дар речи.

Чувствуя необходимость как-то начать разговор, Мюррей поинтересовался, чем я занимаюсь. Я испуганно ответил: «Я работаю над теорией адрона, представляющей его как своего рода эластичный шнур, как резинку». В следующий ужасный момент, который я не забуду никогда, он начал смеяться. И это был не короткий смешок, а громогласный гомерический хохот. Я чувствовал себя презренным червём. Затем двери лифта открылись, и я позорно уполз с горящими ушами.

После этого я не встречался с Мюрреем почти два года. Следующая наша встреча состоялась на другой конференции, в Национальной ускорительной лаборатории имени Энрико Ферми, сокращённо

Фермилаб. Эта конференция была очень представительной: около тысячи участников, среди которых были наиболее влиятельные теоретики и экспериментаторы со всего мира. И в этот раз я снова был слушателем.

В день открытия конференции, когда мы с группой друзей ожидали начала первой лекции, к нам неторопливо подошёл Мюррей. При всех он сказал: «Мне очень жаль, что я смеялся над вами в лифте в тот день. Я думаю, что задача, над которой вы работаете, — это просто фантастика, и я посвящу ей большую часть моей лекции. Давайте присядем где-нибудь и поговорим об этом, когда у нас выдастся свободная минутка». В этот момент я из червя превратился в принца: сам король оказал мне свою милость!

В течение пары дней после этого, встречая Мюррея, я спрашивал: «Не настало ли время нам поговорить?» И каждый раз он отказывался, ссылаясь на какую-нибудь важную встречу.

В последний день конференции я стоял в длинной очереди к тур-агенту. Мне нужно было поменять авиабилет, и я ждал своей очереди уже более часа. Наконец, когда передо мной в очереди оставалось только два или три человека, ко мне подошёл Мюррей со словами: «Я свободен! Мы можем поговорить прямо сейчас. У меня есть пятнадцать минут». «О'кей, — сказал я себе. — Это твой шанс. Сделаешь всё правильно, и ты — принц. Сделаешь что-то не так, и ты — наживка для рыбы».

Мы сели за свободный столик, и я начал объяснять, как моя новая «резиновая» теория связана с его и Фейнмана идеями. Я собирался начать с диаграммы рыболовной сети. Помню, я сказал: «Я начну с партонов».

«Партоны? Партоны... Какие, к дьяволу, партоны? Патроны? Пистоны? Вы хотите вставить мне пистон? Так, что ли?» Я понял, что совершил непростительную ошибку, но не мог сообразить какую. Я пытался объяснить, но всё, что я получал в ответ, — это «Патроны? Что это такое?» Так прошли четырнадцать из пятнадцати отведённых мне минут, пока он не спросил: «Патроны — они имеют заряд?» Я ответил: «Да». — «Принадлежат ли они группе  $SU(3)$ ?» Я снова ответил утвердительно. Тогда его лицо просветлело: «А-а, так вы имеете в виду кварки!» Я совершил смертный грех, назвав составляющие

адронов словом, которое придумал Фейнман, а не Мюррей. Похоже, я был единственным физиком на планете, который не подозревал о непримиримом соперничестве между этими двумя титанами из Калтеха.

Во всяком случае, у меня оставались ещё одна или две минуты, за которые я в сжатом виде изложил свои соображения, а затем Мюррей посмотрел на часы и сказал: «Ладно, спасибо. У меня назначена встреча с одним *важным* человеком, с которым я должен переговорить до моей лекции».

Я был так близко и вместе с тем так далеко. Увы, не для меня королевские почести, а для меня земля и грязь. Но затем я услышал то, что вернуло меня к жизни. Я увидел Мюррея, который пересказывал группе своих коллег всё то, что я успел ему рассказать. «Сасскинд говорит, что... Сасскинд утверждает, что... Мы должны заняться теорией струн Сасскинда...» А затем Мюррей рассказал о моей идее в своём заключительном докладе на конференции. И хотя теории струн была посвящена лишь небольшая часть доклада, она получила благословение Мюррея, а я чувствовал себя как после езды по американским горкам.

Хотя Мюррей не занимался теорией струн, его разум был открыт для новых идей, и Мюррей сыграл важную роль в их продвижении. Нет никаких сомнений, что он был одним из первых, кто признал потенциальное значение теории струн как теории адронов, а позднее и как теории явлений планковских масштабов.

Существует много вариантов теории струн. Наши варианты начала 70-х были математически очень точными — слишком точными. Хотя с современной точки зрения абсолютно ясно, что адроны являются струнами, теория должна была пройти через целый ряд метаморфоз, прежде чем она смогла описать реальные барионы и мезоны.

Имелись три огромные проблемы, досаждавшие первоначальному варианту теории струн. Одна из них была настолько странной, что консерваторы, а особенно энтузиасты S-матриц, нашли в ней источник для шуток. Это была проблема слишком большого количества измерений. Теория струн, как и все физические теории, имеет дело с пространством и временем. До Эйнштейна пространство и время существовали сами по себе, но затем под влиянием Минковского они слились в единое пространство-время — четырёхмерный мир, в котором каждое событие представлено четырьмя координатами: тремя простран-

Эйнштейн и Минковский превратили время в «четвёртое измерение». Но пространство и время не совсем равноправны. Даже в общей теории относительности, которая перемешивает пространство и время путём замысловатых математических преобразований, эти две сущности различаются. Они по-разному «ощущаются». По этой причине, вместо того чтобы говорить о четырёхмерном пространстве, мы обычно говорим о  $3 + 1$ -мерном, обозначая тем самым, что у нас есть три пространственные и одна временная координата.

Может ли пространство иметь большее число измерений? Да, и это обычное явление в современной физике. Не так трудно, как кажется, представить себе движение в пространстве, имеющем более трёх пространственных измерений. Ещё проще представить себе мир, имеющий менее трёх пространственных измерений. Например, в знаменитой книге Эдвина Эббота «Флатландия» описывается жизнь в мире, имеющем только два пространственных измерения. Но ещё никому не удалось представить себе мир, имеющий более (или менее) одного временного измерения. Похоже, что это вообще не имеет смысла. По этой причине физики, оперируя с многомерными пространствами, всегда имеют в виду пространство с  $4 + 1$ ,  $5 + 1$  и т. д. измерениями, подразумевая, что в нём может быть много пространственных, но всегда только одно временное измерение. Физики всегда надеялись, что однажды они сумеют объяснить, почему наш мир имеет именно 3 пространственных измерения, а не 2, 7 или 84. Поэтому струнные теоретики были рады обнаружить, что их математика корректно работает только в определённых количествах измерений. Проблема лишь в том, это количество оказалось равным  $9 + 1$ , а не  $3 + 1$ . Что-то где-то не так с математикой, если количество пространственных измерений, необходимых для её работы, оказывается в три раза большим, чем количество измерений в нашем обычном мире! Это выглядело насмешкой над струнными теоретиками.

Как преподаватель физики я ненавижу рассказывать что-то студентам, а потом заявлять, что я не могу этого объяснить. Это-де слишком сложно или это-де слишком специально. Я трачу массу времени, придумывая, как объяснить сложные вещи простыми словами. Одним из моих самых больших разочарований является то, что мне так и не

удалось придумать простого объяснения, почему теория струн может обрести полное счастье только в  $9 + 1$  измерениях. И никому другому тоже. Всё, что я могу сказать, — это что всё дело в неустрашимых квантовых флуктуациях струн. Эти квантовые флуктуации могут накапливаться и полностью выйти из-под контроля, если не будут выполнены определённые, очень тонкие условия. И эти условия выполняются только в пространстве с  $9 + 1$  измерениями.

Ошибка в три раза — не столь уж большая беда для космологии, но для физики элементарных частиц это просто катастрофа. Физики, изучающие частицы, привыкли к точным числам. И нет другого такого числа, в котором они были бы настолько уверены, как в числе пространственных измерений. Никакая экспериментальная ошибка не способна объяснить потерю шести пространственных координат. Короче, это полное фиаско. Пространство-время и в прошлом, и ныне имело и имеет размерность  $3 + 1$ , и в этом не может быть никаких сомнений.

Провравшись в отношении размерности пространства, теория струн, конечно, поступила очень плохо, но ещё хуже было то, что она провралась и в предсказании закона, которому подчиняются ядерные силы между адронами. Вместо близкодействующих ядерных сил теория предсказывала далекодействующие силы, неограниченно простирающиеся в пространстве, подобные электромагнитным или гравитационным. Если подогнать короткодействующую ядерную силу под правильное значение, то электрическая сила была бы в 100 раз сильнее, а гравитационная — в  $10^{40}$  раз. О том, чтобы отождествить эти далекодействующие силы с реальными гравитационными или электрическими силами, не могло быть и речи.

Все силы в мире, будь то гравитационные, электрические или ядерные, имеют одну и ту же природу. Представьте себе электрон, обращающийся вокруг центрального ядра. Время от времени электрон испускает фотоны, и куда же эти фотоны деваются? Если атом возбуждён, то фотон может улететь прочь, а атом перейти на более низкий энергетический уровень. Но если атом уже находится в самом низшем энергетическом состоянии, фотон не может унести с собой часть энергии. Единственный выход для фотона — быть поглощённым другим электроном или положительно заряженным ядром. Таким образом,

в реальном атоме электроны и ядра постоянно перебрасываются фотонами подобно цирковому жонглёрам. Этот обмен частицами, в данном случае фотонами, и является источником всех сил в природе. Любые силы — электрические, магнитные, гравитационные — в конечном итоге приводят нас к фейнмановским обменным диаграммам, на которых кванты летают от одних частиц к другим. Для электрических и магнитных сил такими обменными квантами являются фотоны; для гравитационных сил ту же работу выполняют гравитоны. Мы с вами прикованы к Земле гравитонами, которыми обмениваются частицы наших тел с частицами нашей планеты. Но для сил, удерживающих вместе протоны и нейтроны в ядре, такими обменными квантами являются пи-мезоны (пионы). Если заглянуть внутрь протонов и нейтронов, то мы увидим, что составляющие их кварки обмениваются друг с другом глюонами. Установление связи между силами и соответствующими этим силам обменными частицами было одним из величайших достижений физики XX века.

Если природа ядерных, электромагнитных и гравитационных сил одинакова, то отчего же они настолько различны? Электромагнитные и гравитационные силы являются дальнедействующими, что позволяет гравитации удерживать планеты на их орбитах, в то время как ядерные силы сходят на нет уже на расстояниях порядка диаметра протона. Если вы думаете, что различия между силами связаны с какими-то индивидуальными свойствами создающих эти силы обменных частиц, то окажетесь абсолютно правы. Определяющим фактором дальнего действия какой-нибудь силы является масса создающей эту силу обменной частицы: чем легче частица, тем более дальнедействующей является сила. Причина дальнего действия гравитации и электричества состоит в том, что гравитон и фотон являются безмассовыми частицами. А вот пион, наоборот, весьма массивен — его масса в 300 раз больше массы электрона. Можно сравнить влияние массы переносчика взаимодействия на характер взаимодействия с влиянием избыточного веса на достижения атлета. Чем он тяжелее, тем меньше расстояние, на которое он может прыгнуть, чтобы достать другую частицу.

Теория струн является также и теорией сил. Вернёмся к аналогии с танцорами. Представьте себе, как две цепочки взявшихся за руки танцоров приближаются друг у другу. Всё это время, за исключением

короткого промежутка времени, когда они соединяются в одну цепочку, они исполняют разные танцы. Перед тем как встретиться, от одной из цепочек отделяется группа танцоров, которые образуют третью короткую цепочку. Эта третья цепочка направляется ко второй группе и соединяется с ней.

Так две первоначальные группы постоянно обмениваются короткими цепочками, и это порождает действующую между ними силу.

Издавек мировой лист, описывающий этот обмен, выглядит как буква «Н», но «под микроскопом» линии, образующие эту букву, превращаются в подобие водопроводных труб. Поперечная палочка буквы «Н» — это мировой лист обменной струны, которая летает туда-сюда между вертикальными палочками и создаёт действующую между ними силу. В первые дни теории струн те из нас, кто надеялся объяснить с её помощью всё, что имеет отношение к адронам, испытывали восторг от открывающихся перспектив описания ядерных сил, удерживающих протоны и нейтроны в ядре.

К несчастью, наши надежды очень скоро рухнули. Когда были выполнены первые расчёты, стало понятно, что полученный закон, описывающий силы между струнами, не имеет ничего общего с законом, которому подчиняются силы, удерживающие нуклоны вместе. Вместо короткодействующих ядерных сил мы получили дальнедействующие силы, скорее напоминающие электромагнитные или гравитационные, о чём я уже упоминал ранее. Обнаружить причину этого оказалось несложно. Среди похожих на частицы вибрирующих струн были два объекта с очень специфическими свойствами. Первый — открытые струны типа тех, которые описывают мезоны, а второй — замкнутые струны, описывающие глюболы. Оба этих объекта отличались тем, что не имели массы, — точно так же, как фотоны и гравитоны! При обмене этими объектами между частицами возникали силы — почти такие же, как электрические силы между зарядами или гравитационные силы между массами. Открытые струны вели себя как фотоны, но наибольшим сюрпризом для меня оказалось то, что замкнутые глюболы вели себя точно так же, как в теории должны вести себя неуловимые таинственные гравитоны. Это всё могло бы стать источником бесконечной радости, если бы мы собирались построить новую теорию гравитации и электромагнетизма, но это было весьма далеко от нашей цели. Ведь мы-то



хотели описать ядерные силы, и в этом смысле все наши попытки потерпели сокрушительный провал. Мы оказались в тупике.

В теории струн есть ещё одна трудность. Она одновременно является «теорией всего» и «теорией ничего». Первоначальной целью теории было описание адронов, и ничего больше. Электроны, фотоны и гравитоны оставались точечными частицами. Многолетние эксперименты убеждали нас, что если электроны и фотоны и имели какие-то размеры, то были гораздо меньше адронов. Они с таким же успехом могли быть просто точками, если так можно выразиться. С другой стороны, было очевидно, что адроны точками быть никак не могут. Точка не может вращаться вокруг собственной оси. Думая о вращающемся объекте, я представляю себе кусок теста, который вертит повар, готовящий пиццу, или баскетбольный мяч, который баскетболист крутит на пальце. Но невозможно представить себе вращение бесконечно малой точки. Адрону очень легко придать вращение: возбуждённые вращательные состояния адронов регулярно наблюдаются в экспериментах на ускорителях. Адроны должны быть больше похожи на кусок теста, чем на математическую точку. Но никому ещё не удалось заставить вращаться электрон или фотон<sup>1</sup>.

Реальные адроны могут взаимодействовать и взаимодействуют с точечными частицами. Протон способен поглощать и испускать фотоны точно так же, как это делает электрон. Но как только мы пытаемся построить теорию, в которой струнноподобный адрон взаимодействует с фотоном, всё летит к чёрту. Одно математическое противоречие за другим разрушает все наши попытки.

И тут сразу многим пришла в голову очевидная идея. Колеблющаяся струна — разумеется, не точка, но мы всегда считали, что на концах струны находятся точечные кварки. Почему бы не считать, что и весь электрический заряд струны тоже сосредоточен на этих кварках? После этого останется лишь просчитать взаимодействие фотонов с точечны-

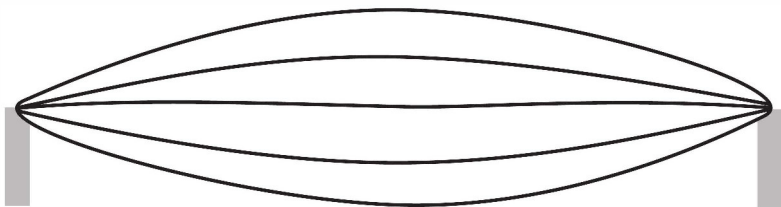
---

<sup>1</sup> Это утверждение может смутить некоторых читателей, знакомых с таким свойством электронов или фотонов, как спин. Но спин элементарной частицы не имеет ничего общего с вращением баскетбольного мяча, куска теста или адрона. Спин, например, электрона никогда не может быть изменён и всегда равен половине постоянной Планка, в то время как вращение баскетбольного мяча или адрона можно затормозить или ускорить, изменив его момент количества движения.

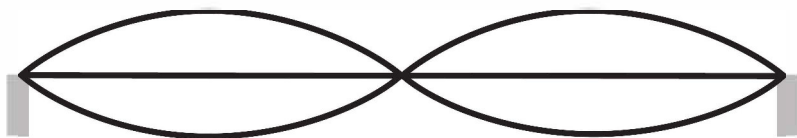
ми зарядами — детская задача. Но, как известно, порой даже лучшие планы идут наперекосья.

Проблема в том, что струны в теории струн обладают исключительно сильной квантовой дрожью. Чрезвычайно высокочастотные квантовые флуктуации оказываются настолько дикими и неконтролируемыми, что кварки, находящиеся на концах струны, могут оказаться *на самом краю Вселенной*. Это звучит глупо, но части струны вибрируют настолько сильно, что в очень короткие промежутки времени могут оказываться бесконечно далеко!

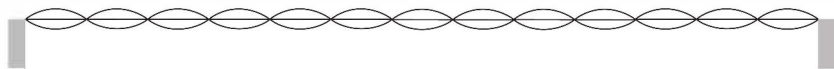
Я попытаюсь объяснить такое интуитивно непонятное поведение струн на простом примере. Представьте себе гитарную струну. Она несколько отличается от струн струнной теории, в первую очередь тем, что концы гитарных струн неподвижно закреплены на концах грифа и деки. Но сейчас это не важно. Важным является то, что струны обоих видов могут иметь различные моды колебаний. Гитарная струна может колебаться как единое целое, двигаясь, как детская скакалка. Когда возбуждена эта мода колебаний, струна звучит как основной тон.



Но, как известно любому гитаристу, струны могут звучать и на обертонах высших гармоник. При этом струна колеблется не как единое целое, а как одна или несколько струн, соединённых последовательно своими концами. Например, в моде первой гармоники струна колеблется, как будто она разделена пополам: середина струны остаётся неподвижной.



В принципе, идеальная бесконечно тонкая струна может иметь бесконечное количество мод колебаний и излучать обертона бесконечно высоких гармоник, но на практике трение и другие факторы демпфируют колебания высших гармоник, не давая им даже возбудиться.



Теперь вспомним урок квантовой механики из главы 1. Любой осциллятор обладает неустранимыми нулевыми колебаниями. Это имеет весьма драматические последствия для идеальной струны: все возможные колебания, весь бесконечный набор колебательных мод звучит одновременно, создавая безумную симфонию белого шума. Если мы просуммируем вклад всех мод колебаний для какого-нибудь отдельно взятого фрагмента струны, то обнаружим, что максимальная амплитуда его колебаний является бесконечной.

Почему же эта безумная какофония не возникает при звучании обычной гитарной струны? Причина заключается в том, что обычные струны состоят из атомов, располагающихся вдоль струны. Не имеют смысла моды колебаний, при которых расстояние между узлами стоячей волны на струне меньше, чем расстояние между соседними атомами. Но математически идеальная струна не состоит из атомов, и количество узлов на струне фиксированной длины может быть любым, поэтому она будет колебаться совершенно неконтролируемым образом.

Пожалуй, самое удивительное математическое чудо теории струн заключается в том, что если посчитать всё корректно, то окажется, что в десятимерном пространстве-времени струны колеблются синхронно и ни одна не улетает на бесконечность относительно другой. Иными словами, ваша струна и моя струна могут колебаться с размахом от одного края Вселенной до другого, но если мир десятимерен, мы чудесным образом не обнаружим эти колебания.

Но это чудо работает, только если всё в мире состоит из струн. Если фотон является точечной частицей, а протон — струной, возникнет ужасная коллизия. По этой причине только струна может взаимодействовать с другими струнами! Это именно то, что я имел в виду, когда я говорил, что теория струн является теорией всего или теорией ничего.

Яростная струнная квантовая дрожь, размах колебаний которой достигает границ Вселенной, казалась столь мрачной перспективой, что я отбросил все мысли о негибкой математике теории струн более чем на десять лет. Но в конце концов это берсеркоподобное поведение струн стало основой для одной из самых интересных и странных разработок современной теоретической физики. В главе 10 мы познакомимся с голографическим принципом, который гласит, что мир является своего рода квантовой голограммой на границах пространства. В какой-то степени открытие этого принципа было вдохновлено экстремальной квантовой дрожью струн. Но голографический принцип — это особенность квантово-механического описания гравитации, а не ядерной физики.

Некоторые теории настолько математически точны, что теряют гибкость. Это хорошо, если теория успешна. Но если что-то в теории работает не совсем так, как хотелось бы, то негибкость становится помехой. Варианты теории струн, существовавшие в 70-х, 80-х и большей части 90-х, не позволяли описать взаимодействие объектов, которые не являются струнами. Если ваша цель — описать взаимодействие адронов, то такая теория для вас не слишком многообещающая. Слишком много измерений, безмассовые гравитоны и фотоны и невозможность взаимодействия с более мелкими объектами... В общем, теория струн испытывала серьёзные трудности, по крайней мере в качестве теории адронов. Тем не менее никто не отрицал, что адроны ведут себя как упругие струны с кварками на концах. За 35 лет, прошедших со времени создания теории струн, струнная природа адронов стала хорошо проверенным экспериментальным фактом. Но в то же время теория струн нашла себя в другой жизни. Следующая глава посвящена тому, как теория струн возродилась в виде фундаментальной теории, объединяющей квантовую механику и общую теорию относительности.



## Глава 8

# РЕИНКАРНАЦИЯ

Хотя теория адронных струн потерпела неудачу в своей наиболее точной математической форме, некоторые смельчаки увидели в этом крушении благоприятный момент. «Если гора не идёт к Магомету, то Магомет идёт к горе». Если мы не можем заставить теорию струн описывать адроны, потому что она ведёт себя как теория гравитации, то пусть гравитация описывается теорией струн. Почему бы не использовать её для описания всего: гравитации, электромагнетизма, кварков и всего остального? Вторая и третья проблема, описанные в предыдущей главе, в этом случае исчезают: весь предсказанный спектр сил теперь соответствует реальности и всё состоит из струн. Негибкость теории из пассива переходит в актив. Радикально новый взгляд на мир, сотканный из одномерных энергетических нитей, колеблющихся от края до края Вселенной, приходит на смену прежней парадигме точечных материальных частиц.

Чтобы нарисовать картину этой трансформации теории струн, поговорим немного о масштабах явлений. Размеры адронов лежат в пределах  $10^{-13}$ – $10^{-14}$  см. Существуют некоторые вариации, но по порядку величины мезоны, барионы и глюболы имеют приблизительно одинаковые размеры. Размер  $10^{-13}$  сантиметров выглядит исчезающе малым, это в 100 000 раз меньше поперечника атома, но по стандартам современной физики элементарных частиц это очень много. Ускорители позволяют исследовать объекты, размер которых в тысячу раз меньше,

а наиболее мощные из ускорителей уже начинают подступать к расстояниям, в 10 000 раз меньшим размера адрона.

Естественный размер гравитона гораздо меньше. В конце концов, гравитоны являются гибридом теории гравитации и квантовой механики, а на каком бы квантовом уровне вы ни работали, вы всегда придёте к тому же, к чему пришёл Планк в 1900 году: к естественной единице длины, к очень-очень малой единице длины — к планковской длине, составляющей  $10^{-33}$  см. Физики ожидают, что гравитон имеет именно такой размер.

Насколько гравитон меньше протона? Если увеличить гравитон до размера Земли, то протон будет иметь такой же размер, как и вся известная нам Вселенная. Используя ту же самую теорию струн, которая потерпела фиаско в роли теории адронов, Джон Шварц и Жоэль Шерк предложили совершить «прыжок лягушки»<sup>1</sup> сразу на несколько порядков. Подобно тихоокеанской тактике генерала Макартура, эта затея с равным успехом могла оказаться как героической, так и дурацкой.

Если с дальнодействием сил никаких проблем не возникло, то размерность пространства, требуемая для математической согласованности теории, всё ещё составляла девять пространственных плюс одно временное измерение. Но в новом контексте это обещало обернуться благом. Список элементарных частиц в Стандартной модели — частиц, предполагаемых точечными, — слишком длинен. Он включает 36 различных видов кварков, 8 глюонов, 6 типов лептонов: электрон, мюон и тау-лептон плюс соответствующие им античастицы, два типа W-бозонов, Z-бозон, бозон Хиггса, фотон и нейтрино. Частица каждого типа принципиально отличается от частиц другого типа. Каждая обладает индивидуальными свойствами. Но если все частицы просто точки, то откуда берутся у них индивидуальные свойства? Как простая точка может обладать такими *квантовыми числами*, как спин, изоспин, странность, очарование, барионное число, лептонное число и цвет?<sup>2</sup> Очевидно,

<sup>1</sup> Тактика «прыжков лягушки», разработанная генералом Макартом, заключалась в последовательном захвате одной за другой всех островных баз Японии на Тихом океане. — *Примеч. пер.*

<sup>2</sup> Это всё, разумеется, придуманные, не имеющие никакого отношения к реальному цвету или очарованию названия для различных особенностей элементарных частиц, открываемых на протяжении 40 лет начиная с 1970-х годов.

что частицы должны иметь какие-то внутренние механизмы, просто не видимые с большого расстояния. Их точечноподобный внешний вид, несомненно, временное явление, следствие ограниченной разрешающей способности наших лучших «микроскопов», то есть ускорителей. Но увеличить разрешающую способность ускорителя возможно только путём увеличения энергии ускоряемых частиц, а единственный способ увеличить эту энергию — увеличить размер ускорителя. Если, как считают большинство физиков, внутренние механизмы элементарных частиц имеют размеры порядка планковской длины, то, чтобы их рассмотреть, потребуется построить ускоритель размером с Галактику! Поэтому мы продолжаем думать о частицах как о точках, несмотря на то что факты говорят, что у них внутри, несомненно, что-то есть.

Но теория струн — это не теория точечных частиц. С точки зрения теоретиков, теория струн способна объяснить, откуда у частиц берутся их свойства. Помимо всего прочего, струны способны колебаться с разными модами. Всякий, кто когда-либо играл на гитаре, знает, что гитарная струна может вибрировать на разных гармониках. Струна может вибрировать как единое целое или как две части, разделённые узлом посередине. Она также может вибрировать как три и более различные части, излучая набор гармоник. То же самое верно и для струн в теории струн. Различные типы колебаний струны приводят к разным типам частиц, но этого ещё недостаточно, чтобы объяснить различия между электронами и нейтрино, фотонами и глюонами или между *u*-кварками и *s*-кварками.

Вот тут-то струнные теоретики и нашли блестящее применение тому, что раньше вызывало их неуверенность. Им удалось из свиного уха — слишком большого числа измерений — сделать шёлковый кошелёк. Дополнительные шесть измерений, которые так мешали при описании адронов, оказались ключом к объяснению разнообразия свойств элементарных частиц: электрического заряда, цвета, странности, изоспина и других.

На первый взгляд между этими свойствами и дополнительными измерениями не прослеживается очевидной связи. Каким образом движение в дополнительных шести измерениях объясняет электриче-



ский заряд или различия между разными типами кварков? Ответ лежит в глубоких изменениях в природе пространства, которые описал Эйнштейн в своей общей теории относительности, — в возможности *компактификации* пространства или его части.

## Компактификация

Проще всего объяснить явление *компактификации* на примере двумерной поверхности. Представим себе пространство в виде плоского листа бумаги, неограниченно простирающегося во всех направлениях. Но это только один из вариантов двумерного пространства. Помните, как при разговоре о Вселенной Эйнштейна и Вселенной Фридмана мы представляли пространство в виде поверхности сферы, — независимо от того, в каком направлении вы будете двигаться в таком пространстве, в конце концов вы вернётесь в исходную точку.

Эйнштейн и Фридман представляли пространство в виде гигантской сферы, достаточно большой, чтобы на протяжении миллиардов световых лет на вашем пути не встретилась дважды одна и та же галактика. Но теперь представьте себе, что мы начали сжимать эту сферу: и вот она становится всё меньше и меньше, в ней уже едва помещается человек. Продолжим сжатие сферы до размера молекулы, атома, протона... В конце концов такую сферу будет уже невозможно отличить от точки — *пространства, не имеющего ни одного измерения*, в котором можно двигаться. Это простейший пример компактификации пространства.

Можем ли мы выбрать для двумерного пространства такую форму, чтобы оно выглядело как одномерное? Можно ли спрятать одно из двух измерений двумерного листа бумаги? Легко. Для начала вырежем из бесконечного плоского листа бумаги полосу бесконечной длины в направлении  $x$ , но конечной ширины, скажем 10 см, в направлении  $y$ . Теперь свернём эту полосу в бесконечный цилиндр, так чтобы ось цилиндра была направлена в направлении  $x$ . Получившийся цилиндр будет компактным (конечным) в направлении  $y$  и бесконечным в направлении  $x$ .



Сворачивание полосы в цилиндр



Если же вместо полосы шириной 10 см мы свернём в цилиндр полосу шириной 1 мкм ( $1/10\,000$  см), то такой цилиндр при взгляде на него невооружённым глазом будет выглядеть как одномерное пространство, как бесконечно тонкий «волос». И только положив его под микроскоп, мы сможем убедиться, что на самом деле поверхность этого цилиндра двумерная. Вот вам и пример того, как двумерное пространство можно замаскировать под одномерное.

Предположим далее, что мы уменьшили длину окружности цилиндра до планковской длины. Для таких размеров уже не существует микроскопа, способного разрешить второе измерение. Для всех практических целей это пространство будет одномерным. Процесс, позволяющий сделать некоторые из размерностей *компактными*, оставив остальные бесконечными, и называется *компактификацией*.

Теперь несколько усложним картину. Возьмём трёхмерное пространство с тремя координатными осями:  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Оставим  $x$ - и  $y$ -координаты простирающимися неограниченно, а  $z$ -координату свернём. Это трудно представить, но принципиально это не отличается от сворачивания полоски в цилиндр. Двигаясь в направлении  $x$  или  $y$ , вы можете удалиться неограниченно далеко, но двигаясь в направлении  $z$ , пройдя некоторое расстояние, возвратитесь в исходную точку. Если это расстояние микроскопически мало, то получившееся пространство будет выглядеть как двумерное.

Пойдём немного дальше и компактифицируем два измерения:  $y$  и  $z$ . На некоторое время полностью забудем про  $x$ -размерность и рассмо-

трим две оставшиеся. Для начала мы можем свернуть их в 2-сферу. В этом случае вы смогли бы сколь угодно далеко двигаться вдоль  $x$ -направления, а путешествие вдоль координат  $y$  и  $z$  будет похоже на путешествие по поверхности глобуса. Опять же, если этот «глобус» имеет микроскопические размеры, то получившееся пространство трудно будет без микроскопа отличить от одномерного. Как вы видите, действуя подобным образом, можно свернуть в компактное пространство какое угодно количество измерений.

2-сфера — это не единственный способ компактификации двух измерений. Ещё одним простым способом является использование для этой цели *тора*. Если 2-сфера представляет собой поверхность мяча, то тор — это поверхность бублика. Существует ещё множество других топологических форм, которые можно использовать для компактификации, но тор является наиболее общим случаем.

Вернёмся к цилиндру и представим частицу, движущуюся по его поверхности. Эта частица может неограниченно двигаться в любую сторону вдоль оси  $x$ , точно так же, как если бы это было одномерное пространство. При этом мы можем вычислить скорость, с которой движется частица. Но ведь частица может двигаться не только вдоль оси  $x$ , но и вдоль свёрнутой оси  $y$ . В этом скрытом микроскопическом направлении  $y$  частицы тоже будет какая-то скорость. Итак, частица может двигаться в  $x$ -направлении, в  $y$ -направлении или в обоих направлениях одновременно. В последнем случае движение частицы будет иметь форму микроскопического штопора, навитого на ось  $x$ . Частица будет двигаться в направлении  $x$ , одновременно вращаясь вокруг неё. Для наблюдателя, разрешающей способности приборов которого недостаточно, чтобы наблюдать движение в  $y$ -направлении, это дополнительное движение представляется в виде некоего особого свойства частицы. Частица, которая дополнительно движется в  $y$ -направлении, отличается от частицы, которая движется только в  $x$ -направлении, но причина этого различия скрыта от нас малостью  $y$ -измерения. Как бы мы могли интерпретировать это новое свойство частицы?

Идея существования в пространстве дополнительных ненаблюдаемых направлений отнюдь не нова. Впервые она появилась ещё в начале XX века, вскоре после завершения Эйнштейном общей теории относительности. Современник Эйнштейна Теодор Франц Эдуард Калуца

адался именно этим вопросом: как повлияет на физические явления существование дополнительного крошечного измерения? В те времена были известны два фундаментальных физических взаимодействия: электромагнитное и гравитационное. Они во многом похожи, но эйнштейновская теория гравитации выглядела более глубокой, чем максвелловская электродинамика. Гравитация у Эйнштейна сводилась к геометрическому искажению пространства-времени, в то время как теория Максвелла выглядела произвольной надстройкой над физическим миром, не имеющей никаких фундаментальных причин быть именно такой, какая она есть. Но геометрия пространства-времени описывает только свойства гравитационного поля, и ничего более. Чтобы электричество и магнетизм можно было каким-то образом объединить с гравитацией, основные геометрические свойства пространства должны быть более сложными, чем это представлялось Эйнштейну.

Калуца совершил удивительное открытие. Если к обычным  $3 + 1$  измерениям добавить ещё одно свёрнутое измерение, то геометрия пространства-времени включит в себя не только гравитационное поле Эйнштейна, но и электромагнитное поле Максвелла: гравитация, электричество и магнетизм могут быть объединены в одну всеохватывающую теорию.

Блестящая идея Калуцы привлекла внимание Эйнштейна, который пришёл от неё в полный восторг. Согласно Калуце, частицы могут двигаться не только в трёх обычных измерениях, но и в четвёртом, скрытом. Он обнаружил, что если две частицы движутся в этом дополнительном измерении, то гравитационная сила, действующая между ними, претерпевает изменения, и самое удивительное, что эта добавка к гравитационной силе оказывается идентичной электрическому взаимодействию между двумя заряженными частицами. Более того, электрический заряд каждой частицы — это не что иное, как компонент импульса в дополнительном измерении. Если частицы вращаются в этом компактном измерении в одном направлении, то они отталкиваются друг от друга. Если они вращаются в противоположных направлениях, то они притягиваются. Но если хотя бы одна из двух частиц не вращается в дополнительном измерении, между ними остаётся лишь обычное гравитационное взаимодействие. В воздухе явно запахло возможностью объяснить, почему одни частицы, например

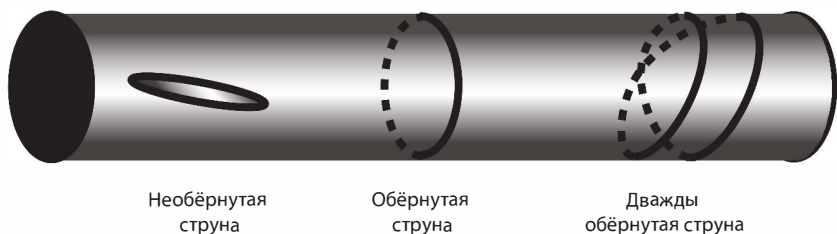
, имеют электрический заряд, а другие, скажем нейтрино, не имеют. Заряженные частицы попросту движутся в компактном измерении пространства, в то время как нейтральные частицы — нет. Это даже позволяло объяснить различия между электроном и его античастицей — позитроном. Электрон вращается в компактном измерении в одну сторону, скажем по часовой стрелке, а позитрон — против часовой стрелки.

Следующее озарение принесла квантовая механика. Подобно любым другим колебательным движениям движение в направлении компактной  $u$ -координаты квантовано. Частица не может двигаться вдоль оси  $u$  с произвольным значением проекции импульса на ось  $u$ . Оно может принимать только дискретные значения, так же как и в гармоническом осцилляторе или  $u$  электрона в атомной теории Бора. А это, в свою очередь, означает, что момент в  $u$ -измерении и, соответственно, заряд электрона не могут принимать произвольные значения. Электрический заряд в теории Калуцы квантован, он может выражаться только произведением заряда электрона на целое число. Заряд частицы может в два или в три раза превышать заряд электрона, но не может отличаться от него, например, в 1,88 или в 0,067 раза. И это радует. В реальном мире не обнаружено ни одного объекта, имеющего дробный (в единицах заряда электрона) заряд: все электрически заряженные тела имеют заряд, кратный заряду электрона.

Это потрясающее открытие, тем не менее, так и оставалось не более чем «интересной идеей» на протяжении всей оставшейся жизни Калуцы. Но для нашей книги оно имеет ключевое значение. Теория Калуцы продемонстрировала, как свойства частиц могут возникать из дополнительных пространственных измерений. И действительно, обнаружив, что теория струн требует шести дополнительных измерений, струнные теоретики вспомнили об идеях Калуцы. Достаточно просто свернуть шесть дополнительных измерений надлежащим образом, чтобы движением в них объяснить внутреннюю машинерию элементарных частиц.

Возможности теории струн гораздо богаче, чем теории точечных частиц. Вернёмся к цилиндру и предположим, что по его поверхности движется маленькая замкнутая струна. Начнём с цилиндра, окружность которого достаточно велика, чтобы видеть её невооружённым глазом.

Маленькая замкнутая струна может двигаться по нему таким же образом, как и точечная частица: вдоль образующей цилиндра или вокруг его оси. В этом случае движение струны принципиально не отличается от движения точечной частицы. Но есть кое-что, на что струна способна, а точечная частица — нет. Струна может быть обёрнута вокруг цилиндра подобно резиновому кольцу, надетому на картонную трубку. Обёрнутая вокруг цилиндра струна отличается от необёрнутой. Резиновое кольцо можно надеть на цилиндр так, что оно будет оборачивать его дважды, трижды и т. д., пока оно не порвётся. Этот мысленный эксперимент приводит нас к новому свойству струн, которое в принципе отсутствует у точечных частиц, называемому *числом кручения*. Это число сообщает нам, сколько витков струны намотано на компактное измерение.



Число кручения является тем свойством частицы, которое невозможно понять, если наш микроскоп недостаточно силён, чтобы разрешать детали, имеющие размеры, сравнимые с размером компактного измерения. Как вы теперь понимаете, дополнительные измерения оказались благословением, а не проклятием для теории струн, поскольку они необходимы для объяснения сложных свойств элементарных частиц.

Двумерный цилиндр изобразить достаточно легко, но я сомневаюсь, чтобы кто-нибудь был в состоянии представить себе девятимерный мир, шесть измерений которого свёрнуты в крошечное шестимерное пространство. Но рисование картинок на листе бумаги или представление моделей в голове не единственный способ оперировать шестимерной геометрией теории струн. Часто геометрия может быть сведена к алгебре точно таким же способом, которым вы в школе описывали

различные геометрические фигуры, например окружность или прямую, при помощи уравнений. Тем не менее даже самые мощные математические методы часто пасуют перед шестимерной геометрией.

Например, число возможных путей, по которым может катиться шарик по поверхности в шестимерной геометрии теории струн, исчисляется миллионами. Я не стану описывать эти пространства, а только сообщу, что они носят наименование *пространств* или *многообразий Калаби* — Яу в честь двух математиков, потративших массу усилий на их изучение. Я не знаю, с чего вдруг математики заинтересовались этими многообразиями, но они оказались чрезвычайно полезными для струнных теоретиков. К счастью, единственное, что следует знать про эти пространства для понимания дальнейшего материала, — это то, что они представляют собой очень сложные конструкции с сотнями дыр наподобие дыр от бублика и прочими особенностями.

Вернёмся к двумерному цилиндру. Длина окружности цилиндра характеризует так называемый *масштаб компактификации*. Для картонного цилиндра этот масштаб составляет несколько сантиметров, для теории струн он должен быть порядка нескольких планковских длин. Если вы решите, что этот масштаб слишком мал, чтобы иметь какое-то значение для тех вещей, которыми мы обычно занимаемся, то сильно ошибётесь. Хотя мы и не в состоянии наблюдать или измерять столь малые вещи, они имеют определяющее значение для обычной физики. Масштаб компактификации в теории Калуцы определяет величину электрического заряда частицы, например электрона. Другими словами, масштаб компактификации определяет величину различных констант, которые присутствуют в обычных законах природы. При изменении размера нашего цилиндра изменяются и Законы Физики. Если изменить величины скалярных полей, о которых я рассказывал в главе 1, Законы Физики тоже изменятся. Есть ли здесь какая-то связь? Безусловно! И сейчас мы о ней поговорим.

Чтобы задать свойства цилиндра, достаточно задать величину масштаба компактификации, но для других фигур этого недостаточно. Например, для описания тора необходимо задать три параметра. Попробуем себе это представить. Первым параметром является внешний размер тора. Тор можно увеличить или уменьшить, не изменяя его формы. Кроме того, тор может быть «тонким», как обруч, или «тол-



характеризующий толщину тора, называется *аспектным отношением*. Аспектное отношение определяется как отношение большого радиуса тора (определяющего внешний размер) к радиусу трубки. Для тонкого тора аспектное отношение велико, для толстого тора оно стремится к единице. Существует ещё один параметр, который достаточно трудно изобразить на рисунке. Представьте себе, что мы разрезали тор, так, чтобы получился цилиндр, после этого, взявшись за один из концов цилиндра, начали его закручивать относительно оси цилиндра, а потом снова соединили цилиндр в тор по линии разреза. Угол, на который мы закрутили цилиндр, и есть третий параметр. Я попытался это изобразить на третьей картинке.



Математики называют эти параметры, определяющие форму и размеры тора, *модулями*. Тор имеет три модуля, цилиндр — только один, но типичное многообразие Калаби — Яу характеризуется сотнями модулей. Возможно, вы догадались, к чему это приводит, но если нет, то я объясню: это приводит к невероятному разнообразному и сложному ландшафту.

Одним из очень важных вопросов является возможность изменения размера и формы компонента пространства от одной точки к другой. Представьте себе криво склеенный цилиндр. Предположим, что при перемещении по поверхности этого цилиндра её кривизна постоянно изменяется. Цилиндр в одних местах толще, в других — тоньше.

Имейте в виду, что даже если цилиндр очень тонок, слишком тонок, чтобы обнаружить это компактное измерение, размер этого измерения всё равно будет определять различные константы связи и массы. Очевидно, что, перемещаясь вдоль такого цилиндра, мы будем перемещать-

ся по миру, в котором законы природы изменяются от одной точки к другой. Что в этом случае скажет обычный физик, который не в состоянии обнаружить свёрнутое измерение? Он скажет, что условия в разных точках пространства различны. Для него это будет выглядеть как присутствие неких скалярных полей, управляющих величиной заряда электрона и массами частиц, и эти поля будут изменяться от точки к точке. Другими словами, модули формируют некое подобие ландшафта — ландшафта в сотнях измерений.

Пространство Калаби — Яу намного более сложно, чем круглое сечение цилиндра, но принцип остаётся тем же: размер и форма компактифицированного пространства может варьироваться в зависимости от положения в пространстве, как если бы у нас были сотни скалярных полей, управляющих Законами Физики! Теперь мы начинаем понимать, почему настолько сложен ландшафт теории струн.

## Элегантная суперсимметричная Вселенная?

Реальные принципы, лежащие в основе теории струн, окутаны большой тайной. Почти всё, что мы знаем о теории, включает в себя особую часть ландшафта, где математика удивительно упрощается благодаря свойству, называемому *суперсимметрией*. Суперсимметричные области ландшафта образуют идеально плоскую равнину, располагающуюся на высоте, в точности равной нулю, со свойствами, настолько симметричными, что многие вещи могут быть вычислены без информации обо всём ландшафте. Если кто-то искал простоту и элегантность, то плоская равнина суперсимметричной теории струн, известной также как *теория суперструн*, является именно тем местом, на которое им стоит обратить внимание. В самом деле, пару лет назад это место было единственным, на которое обращали внимание струнные теоретики. Но кое-кто из физиков уже стряхнул с себя чарующее наваждение и пытается избавиться от элегантных упрощений супермира. Причина проста: реальный мир не суперсимметричен.

Мир, содержащий Стандартную модель и малую ненулевую космологическую постоянную, не может находиться на плоскости нулевой

высоты. Он лежит где-то в неровном районе Ландшафта с холмами, долинами, высокими плато и крутыми склонами. Но есть основания считать, что наша долина близка к суперсимметричной части Ландшафта и что какие-то остатки математического суперчуда могли бы помочь нам понять особенности эмпирического мира. Одним из примеров, который мы разберём в этом разделе, является масса бозона Хиггса. Фактически все открытия, благодаря которым появилась на свет эта книга, представляют собой первые робкие попытки отойти от безопасной суперсимметричной равнины.

Суперсимметрия говорит нам о различиях и сходствах бозонов и фермионов. Как многое другое в современной физике, принципы суперсимметрии прослеживаются вплоть до первых работ Эйнштейна. В 2005 год мы отметили столетие «*anno mirabilis*» — года чудес современной физики. Эйнштейн начал в этом году две революции и завершил третью<sup>1</sup>. Безусловно, это был год специальной теории относительности. Но мало кто знает, что 1905 год был гораздо больше чем «годом относительности». Он также ознаменовал рождение фотонов, начало современной квантовой механики.

Эйнштейн получил только одну Нобелевскую премию по физике, хотя я думаю, что каждая Нобелевская премия, вручаемая после 1905 года, несла в себе отголоски открытий Эйнштейна. Нобелевская премия была присуждена Эйнштейну не за создание теории относительности, а за объяснение фотоэффекта. Именно теория фотоэффекта была наиболее радикальным вкладом Эйнштейна в физику, где он впервые ввёл понятие фотонов, квантов энергии, из которых состоит свет. Физика была уже готова разродиться специальной теорией относительности, её создание было лишь вопросом времени, в то время как фотонная теория света прогремела как гром среди ясного неба. Эйнштейн показал, что луч света, обычно представляемый как волновое явление, имеет дискретную структуру. Если свет имеет определённый цвет (длину волны), то все фотоны как бы маршируют в ногу: каждый фотон идентичен любому другому. Частицы, которые могут одновре-

<sup>1</sup> Революция, завершённая Эйнштейном в 1905 году, относилась к молекулярной теории вещества. В своей статье о броуновском движении он установил, что молекулы, вне всякого сомнения, существуют, и показал, как сосчитать их количество.

менно находиться в одном и том же квантовом состоянии, называются *бозонами* в честь индийского физика Шатъендраната Бозэ.

Почти двадцать лет спустя, завершая здание, заложенное Эйнштейном, Луи де Бройль покажет, что электроны, всегда воспринимаемые как частицы, ведут себя в то же самое время и как волны. Подобно волнам электроны способны отражаться, преломляться, дифрагировать и интерферировать. Но есть фундаментальное различие между электронами и фотонами: в отличие от фотонов два электрона не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии. Принцип запрета Паули гарантирует, что каждый электрон в атоме имеет своё собственное квантовое состояние и что ни один другой электрон не может сунуть свой нос на уже занятое место. Даже вне атома два идентичных электрона не могут находиться в одном и том же месте или иметь один и тот же импульс. Частицы этого рода называются *фермионами* по имени итальянского физика Энрико Ферми, хотя по справедливости они должны называться паулионами. Из всех частиц Стандартной модели около половины являются фермионами (электроны, нейтрино и кварки), а другая половина представлена бозонами (фотоны, *Z* и *W*-бозоны, глюоны и бозон Хиггса).

Фермионы и бозоны играют разные роли в картине мира. Обычно мы представляем материю состоящей из атомов, то есть из электронов и ядер. В первом приближении ядра состоят из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе ядерными силами, но на более глубоком уровне протоны и нейтроны оказываются собранными из небольших строительных блоков — кварков. Все эти частицы — электроны, протоны, нейтроны и кварки — являются фермионами. Материя состоит из фермионов. Но без бозонов атомы, ядра, протоны и нейтроны просто развалятся. Эти бозоны, в первую очередь фотоны и глюоны, прыгая взад-вперёд между фермионами, создают силы притяжения, удерживающие всё вместе. Хотя фермионы и бозоны критически важны для того, чтобы мир был таким, каков он есть, они всегда считались «животными разной породы».

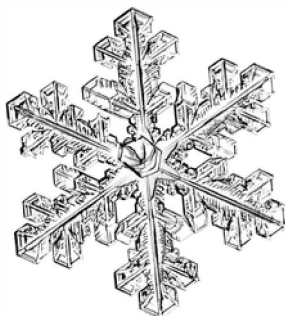
Но примерно в начале 1970-х вдохновлённые первыми успехами теории струн теоретики начали играть с новыми математическими идеями, согласно которым фермионы и бозоны на самом деле не настолько различны. Одна из идей состояла в том, что все частицы об-

одинаковых во всех отношениях, за исключением того, что один из них является фермионом, а другой — бозоном. Это была совершенно дикая гипотеза. Её справедливость для реального мира означала бы, что физики умудрились каким-то образом потерять половину всех элементарных частиц, не сумев обнаружить их в своих лабораториях. Например, согласно этой гипотезе, должна существовать частица с точно такой же массой, зарядом и прочими свойствами, как у электрона, только являющаяся не фермионом, а бозоном. Как можно было не заметить такую частицу на ускорителях Стэнфорда или ЦЕРНа? Суперсимметрия предполагает существование у фотона безмассового нейтрального близнеца-фермиона, а также близнецов-бозонов у электронов и кварков. То есть гипотеза предсказывала целый мир таинственно пропавших без вести «противоположностей». На самом деле вся эта работа была лишь математической игрой, чисто теоретическими исследованиями нового вида симметрии — мира, которого нет, но который мог бы существовать.

Идентичных частиц-близнецов не существует. Физики не лажанулись и не проворонили целый параллельный мир. Какой же интерес в таком случае представляет эта математическая спекуляция и почему этот интерес вдруг усилился за последние 30 лет? Физиков всегда интересовали всевозможные математические симметрии, даже если единственный разумный вопрос, который можно было при этом задать: «Почему этой симметрии нет в природе?» Но и реальный мир, и его физическое описание полны разнообразных симметрий. Симметрия является одним из наиболее дальнобойных и мощных орудий в арсенале теоретической физики. Она пронизывает все разделы современной физики, и особенно те, которые связаны с квантовой механикой. Во многих случаях тип симметрии — это всё, что мы знаем о физической системе, но анализ симметрии является настолько мощным методом, что зачастую сообщает нам почти всё, что мы хотим знать. Симметрии нередко являются тем садом, в котором физики находят эстетическое удовлетворение от своих теорий. Но что такое симметрии?

Начнём со снежинки. Любой ребёнок знает, что не существует двух одинаковых снежинок, но вместе с тем все они имеют общую особен-

ность, а именно симметрию. Симметрия снежинки сразу бросается в глаза. Если вы возьмёте снежинку и повернёте её на произвольный угол, то она будет выглядеть отличной от своего первоначального вида — повернутой. Но если повернуть снежинку ровно на  $60^\circ$ , то она совпадёт сама с собой. Физик мог бы сказать, что поворот снежинки на  $60^\circ$  является симметрией.



Симметрии связаны с операциями или преобразованиями, которые можно выполнять над системой, не влияя на результат эксперимента. В случае снежинки такой операцией является поворот на  $60^\circ$ . Вот ещё один пример: предположим, что мы ставим эксперимент, имеющий целью измерение ускорения свободного падения на поверхности Земли. Простейшим вариантом было бы уронить камень с известной высоты и измерить время его падения. Ответ: около 10 метров в секунду за секунду. Обратите внимание, что я не беспокоюсь о том, чтобы сообщить вам, где я уронил камень: в Калифорнии или в Калькутте. В очень хорошем приближении ответ будет одним и тем же в любом месте на поверхности Земли: результат эксперимента не изменится, если вы переместитесь со всем экспериментальным оборудованием с одного места земной поверхности на другое. На физическом жаргоне сдвиг или перемещение чего-либо из одной точки в другую называется *трансляцией*. Поэтому о гравитационном поле Земли мы можем сказать, что оно обладает «трансляционной симметрией». Конечно, некоторые побочные эффекты могут внести возмущения в результаты нашего эксперимента и испортить симметрию. Например, проведя эксперимент над очень большими и массивными месторождениями полезных ис-

копаемых, мы получим немного большее значение, чем в других местах. В этом случае мы бы сказали, что симметрия является только приближительной. Приблизительную симметрию называют также *нарушенной симметрией*. Наличие отдельных залежей тяжёлых минералов «нарушает трансляционную симметрию».

Может ли симметрия снежинки быть нарушенной? Без сомнения, некоторые снежинки несовершенны. Если снежинка формируется в неидеальных условиях, то одна её сторона может отличаться от другой. Она всё ещё будет иметь форму, близкую к шестиугольной, но этот шестиугольник будет несовершенным, то есть его симметрия будет нарушена.

В космическом пространстве, вдали от каких-либо возмущающих влияний, мы могли бы измерить гравитационную силу между двумя массами и получить ньютоновский закон всемирного тяготения. Независимо от того, где проведён эксперимент, мы, по идее, должны получить один и тот же ответ. Таким образом, ньютоновский закон всемирного тяготения обладает *трансляционной инвариантностью*.

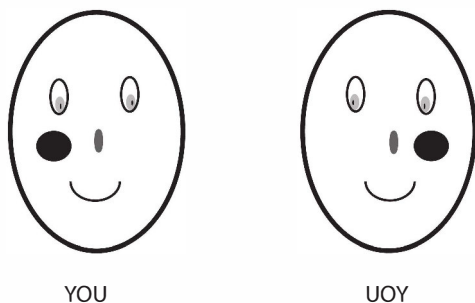
Для измерения силы притяжения между двумя объектами необходимо расположить их на некотором расстоянии друг друга. Например, мы можем расположить два объекта так, что соединяющая их прямая будет параллельна оси  $x$  в некоторой заданной системе координат. С равным успехом мы можем расположить объекты на прямой, параллельной оси  $y$ . Будет ли измеряемая нами сила притяжения зависеть от направления прямой, соединяющей эти объекты? В принципе, да, но только если законы природы отличаются от тех, которые у нас есть. В природе же закон всемирного тяготения утверждает, что сила притяжения пропорциональна произведению масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и она не зависит от ориентации одного объекта относительно другого. Независимость от направления называется *вращательной симметрией*. Трансляционная и вращательная симметрии являются важнейшими фундаментальными свойствами мира, в котором мы живём.

Посмотрите в зеркало. Ваше отражение как две капли воды похоже на вас. Зеркальное отражение ваших брюк ничем не отличается от самих брюк. Отражение левой перчатки в точности повторяет левую перчатку.



Стоп. Что-то тут не так. Давайте посмотрим ещё раз внимательно. Зеркальное отражение левой перчатки не во всём идентично левой перчатке. Оно идентично правой перчатке! А зеркальное отражение правой перчатки идентично левой перчатке.

Теперь присмотритесь внимательнее к собственному отражению. Это не вы. Родинка, которая у вас находится на левой щеке, у вашего отражения находится на правой. А если бы вы вскрыли собственную грудную клетку, то обнаружили бы, что сердце у вашего отражения находится не слева, как у всех нормальных людей, а справа. Давайте назовём зеркального человека — *жэволэр*.



Предположим, что у нас есть футуристическая технология, позволяющая собрать любой объект, какой мы только захотим, из отдельных атомов. Построим с помощью этой технологии человека, чьё зеркальное изображение будет в точности повторять вас: сердце слева, веснушка слева и т. д. Тогда оригинал, который мы построим, будет представлять собой *жэволэр*.

Будет ли *жэволэр* нормально функционировать? Будет ли он дышать? Будет ли биться его сердце? Если дать ему конфету, будет ли он усваивать сахар, входящий в её состав? Ответы на большинство из этих вопросов утвердительные. В основном *жэволэр* будет функционировать точно так же, как и **человек**. Но с его метаболизмом возникнут проблемы. Он не сможет усваивать обычный сахар. Причина состоит в том, что сахар существует в двух зеркальных формах, как правая и левая перчатки. Человек способен усваивать только одну из зеркальных форм сахара. А *жэволэр* способен усваивать только *фъхъэ*. Молекулы — **сахар** и *фъхъэ* — отличаются друг от друга так же, как правая и левая перчатка.

Химики называют обычные сахара, которые способен усваивать человек, D-изомерами (от латинского *dextra* — правый), а зеркальные им, которые способен усваивать только *яэволэп*, — L-изомерами (от латинского *laevum* — левый).

Замена чего бы то ни было на его зеркальное отражение называется *зеркальной симметрией*, или *чётностью*. Последствия зеркального отражения, в принципе, очевидны, но давайте повторим ещё раз одну важную вещь: если всё в мире заменить на его зеркальное отражение, то поведение этого мира никоим образом не изменится и не будет отличаться от поведения нашего мира.

В действительности зеркальная симметрия не является точной. Она представляет собой хороший пример нарушенной симметрии. Что-то приводит к тому, что зеркальное отражение нейтрино оказывается во много раз тяжелее оригинала. Это относится и ко всем остальным частицам, хотя и в гораздо меньшей степени. Похоже на то, что великое мировое зеркало слегка кривое, оно немного искажает отражение. Но это искажение настолько незначительно, что практически не отражается на обычной материи. А вот в поведении высокоэнергетических частиц в зеркальном мире могут произойти весьма существенные изменения. Однако давайте до поры до времени делать вид, что зеркальная симметрия в природе является точной.

Что мы имеем в виду, когда говорим, что между частицами существует отношение симметрии? В двух словах, это означает, что у частицы каждого типа существует партнёр или близнец с очень похожими свойствами. Для зеркальной симметрии это означает, что если законы природы допускают существование левой перчатки, то возможно и существование правой. Установление факта существования D-глюкозы означает, что должна существовать и L-глюкоза. И если зеркальная симметрия не будет нарушена, то же самое должно касаться и всех элементарных частиц. У каждой частицы должен существовать близнец, идентичный ей с точностью до зеркального отражения. При зеркальном отражении человека каждая элементарная частица, составляющая его тело, заменяется её зеркальным близнецом.

Антивещество представляет собой ещё один вид симметрии, называемый *симметрией зарядового сопряжения*. Поскольку симметрия предполагает замену всего на его симметричный аналог, симметрия

зарядового сопряжения предполагает замену каждой частицы её античастицей. Она меняет положительные электрические заряды, например протоны, на отрицательные, в данном случае антипротоны. Аналогично отрицательно заряженные электроны заменяются положительно заряженными позитронами. Атомы водорода заменяются атомами антиводорода, состоящими из позитронов и антипротонов. Подобные атомы действительно получены в лабораториях, правда, в очень небольшом количестве, недостаточном даже для того, чтобы построить из них антимолекулы. Но никто не сомневается в том, что антимолекулы возможны. Точно так же возможны и антилюди, но не забывайте, что кормить их придется антипищей. На самом деле лучше держать антилюдей и обычных людей подальше друг от друга. Когда вещество встречается с антивеществом, они взаимоуничтожаются, превращаясь в фотоны. Взрыв, который произойдёт, если вы случайно пожмёте руку античеловеку, будет сильнее взрыва водородной бомбы.

Как выяснилось, симметрия зарядового сопряжения также является слегка нарушенной. Но, как и в случае с зеркальной симметрией, эффект от этого нарушения оказывается совершенно незначительным, если не принимать в расчёт частицы очень высоких энергий. Теперь вернёмся к фермионам и бозонам. Исходная, самая первая теория струн, которую разработали мы с Намбу, называется *теорией бозонных струн*, потому что все описываемые ею частицы являются бозонами. Она не вполне подходит для описания адронов, ведь, в конце концов, протон — это фермион. Точно так же она не годится и на роль теории всего. Электроны, нейтрино, кварки — все являются фермионами. Но прошло совсем не много времени, и появилась новая версия теории струн, которая уже содержала не только бозоны, но и фермионы. И одним из замечательных математических свойств этой так называемой *теории суперструн* была *суперсимметрия* — симметрия между бозонами и фермионами, требующая, чтобы у каждого фермиона существовал близнец-бозон, обладающий точно такими же свойствами, и наоборот.

Суперсимметрия оказалась незаменимым и чрезвычайно мощным математическим инструментом для струнных теоретиков. Без него математика оказывается настолько сложной, что установить факт согласованности теории очень трудно. Почти все заслуживающие доверия теории, претендующие на описание реального мира, являются супер-

Но, как я уже подчеркнул, суперсимметрия в природе не является точной симметрией. В лучшем случае это довольно сильно нарушенная симметрия, напоминающая отражение мира в чрезвычайно кривом зеркале. До сих пор ни для одной из известных элементарных частиц не обнаружено суперпартнёра. Если бы в природе существовал бозон с такими же массой и зарядом, как у электрона, он бы уже давно был открыт. Тем не менее если вы откроете веб-браузер и поищите в интернете статьи по физике элементарных частиц, вы обнаружите, что начиная с середины 1970-х годов в подавляющем числе работ так или иначе используется суперсимметрия. Почему? Почему теоретики до сих пор не выбросили суперсимметрию в мусорную корзину вместе с теорией суперструн? Тому есть несколько причин.

Предмет, который когда-то назывался высокоэнергетической теоретической физикой элементарных частиц, давно уже разделился на две дисциплины: *теоретическую* и *феноменологическую*. Если вы введёте в адресной строке своего браузера URL <http://arXiv.org>, то попадёте на сайт, где физики публикуют препринты своих статей. Различные дисциплины подразделяются там на ядерную физику, физику конденсированных сред и т. д. Если вы перейдёте в раздел высокоэнергетической физики (hep), то найдёте там два отдельных архива: один (hep-ph) содержит феноменологические, а второй (hep-th) — теоретические и математические статьи. Заглянув в эти архивы, вы увидите, что раздел hep-ph содержит статьи по вопросам традиционной физики элементарных частиц, содержащие либо результаты проведённых, либо описание планируемых экспериментов. Обычно в этих статьях присутствует большое количество таблиц и графиков. В противоположность этому, в разделе hep-th присутствуют по большей части статьи по теории струн и гравитации. Они полны математических выкладок и имеют очень слабое отношение к экспериментам. Однако в последние годы границы между этими двумя дисциплинами всё сильнее размываются, что, на мой взгляд, является хорошим знаком.

Но в обоих разделах большинство статей так или иначе имеют отношение к суперсимметрии. У представителей каждого имеются на то собственные резоны. Для чистых теоретиков таким резонансом является математика — использование суперсимметрии приводит

к потрясающему упрощению математических выкладок и позволяет получать решение задач, разобраться с которыми другими методами было бы невероятно трудно. Помните, в главе 2 я говорил о том, что космологическая постоянная будет в точности равна нулю, если у всех частиц будут суперсимметричные партнёры? Это одно из математических чудес, появляющихся в суперсимметричных теориях. Мне не хотелось бы тут их описывать, но главное то, что суперсимметрия настолько упрощает расчёты в квантовой теории поля и теории струн, что теоретикам становятся доступны такие вещи, которые в противном случае они вряд ли смогли бы вывести. И пусть реальный мир не суперсимметричен, но суперсимметрия позволяет понять некоторые из существующих явлений, например чёрные дыры. Любая теория, включающая гравитацию, описывает и чёрные дыры. Они обладают парадоксальными и таинственными свойствами, о которых мы поговорим позже. Возможные варианты разрешения этих парадоксов слишком сложны для проверки в обычных теориях. И тут, словно по волшебству, существование суперпартнёров делает изучение чёрных дыр необычайно простым. Особенно ценно это упрощение для струнных теоретиков. Математика теории струн, как это сейчас принято, почти полностью полагается на суперсимметрию. Даже многие старые квантово-механические расчёты поведения кварков и глюонов существенно упрощаются при добавлении суперпартнёров. Суперсимметричный мир — это не реальный мир (по крайней мере, в нашей карманной Вселенной), но этот мир достаточно близок к нашему, чтобы извлечь из его изучения множество уроков относительно гравитации и физики элементарных частиц.

Хотя конечные цели «хепферов» и «хептеров»<sup>1</sup> совпадают, текущие задачи феноменологов и струнных теоретиков различаются. Феноменологи используют старые методы теоретической физики и иногда новые идеи теории струн для описания Законов Физики в том плане, как они понимались на протяжении большей части XX века. Как правило, они не пытаются построить теорию, единственным подтверждением правильности которой была бы её математическая полнота.

<sup>1</sup> Имеются в виду люди, публикующие статьи в разделах hep-ph и hep-th (hep-phers и hep-thers). — *Примеч. пер.*

Не пытаются они и построить единую теорию. Суперсимметрия интересует их лишь как приближение к нарушенной симметрии природы для поиска чего-то, что может затем быть обнаружено в лабораторных экспериментах. Наиболее важным открытием для них было бы обнаружение отсутствующих суперпартнёров.

Как вы помните, нарушенная симметрия не является совершенной. В идеальном зеркале объект и его отражение полностью идентичны с точностью до замены правого на левое, но в кривом зеркале из комнаты смеха симметрия несовершенна. Такое отражение, возможно, годится лишь для того, чтобы опознать объект, но при этом оно является сильно искажённой копией. Изображение худого человека в таком зеркале может выглядеть как изображение толстяка, весящего в несколько раз больше, чем его худой двойник.

В аттракционе кривых зеркал, называемом нашей Вселенной, зеркало суперсимметрии вносит в отражение частиц огромные искажения, настолько огромные, что суперпартнёры обычных частиц выглядят в нём невероятными толстяками. Если они существуют, то должны быть во много раз тяжелее обычных частиц. До сих пор не обнаружено ни одного суперпартнёра: ни суперпартнёра электрона, ни суперпартнёра фотона, ни суперпартнёра кварка. Означает ли это, что их совсем не существует и что суперсимметрия — всего лишь бесполезная математическая игра? Возможно, что и так, но это также может означать, что искажение настолько велико, что суперпартнёры слишком тяжелы и энергии современных ускорителей частиц недостаточно для их обнаружения. Если по каким-то причинам массы суперпартнёров превышают несколько сотен масс протона, их действительно не удастся обнаружить, пока не будет построено следующее поколение ускорителей.

Все суперпартнёры имеют названия, похожие на названия их обычных близнецов. Эти названия нетрудно запомнить, если знать правило. Если обычная частица является бозоном, например фотоном или бозоном Хиггса, то название её суперпартнёра образуется добавлением суффикса «ино». Например, фотино, хигсино или глюино. Если же исходная частица является фермионом, то название суперпартнёра образуется добавлением приставки «с», например, сэлектрон, смюон, снейтрино, скварк и т. п. Это последнее правило породило самые уродливые названия, которые только можно встретить в физике.

В науке существует устоявшееся мнение, что новые открытия поджидают нас буквально «за углом». Если попытки обнаружить суперпартнёров в области нескольких сотен масс протона потерпят неудачу, оценки, скорее всего, будут пересмотрены и обнаружение суперчастиц будет отложено до постройки ускорителей, позволяющих генерировать частицы с массами в тысячу масс протона ... или в десять тысяч масс протона. Не напоминает ли это попытки выдать желаемое за действительное? Я так не думаю. Суперсимметрия может оказаться ключом к загадке частиц Хиггса, и сама проблема, возможно, связана с Матерью всех физических проблем и с загадкой необъяснимой слабости гравитационного взаимодействия.

Та же самая квантовая дрожь, которая приводит к необъяснимо высокой энергии вакуума, может оказаться ответственной и за массы элементарных частиц. Предположим, что мы поместили частицу в дрожащий вакуум. Взаимодействуя с квантовыми флуктуациями, частица будет вносить возмущения в них в непосредственной близости от своего местоположения. Одни частицы будут гасить квантовые флуктуации, другие — усиливать их. Суммарным эффектом может стать изменение энергии этих флуктуаций. Эту дополнительную энергию, возникающую из-за присутствия частицы, можно интерпретировать как некую дополнительную массу (вспомните о  $E = mc^2$ ). Наиболее характерным примером является попытка рассчитать таким образом массу бозона Хиггса. При этом получается совершенно абсурдный результат, похожий на результат попытки оценить энергию вакуума. Вакуумная дрожь в окрестности бозона Хиггса приводит к добавке, имеющей порядок планковской массы!

Почему это нас так беспокоит? Хотя обычно теоретики фокусируются исключительно на бозоне Хиггса, описанная проблема относится ко всем элементарным частицам, за исключением фотона и гравитона. Любая частица, помещённая во флуктуирующий вакуум, приобретает ненормально большую массу. Но если все частицы увеличат свои массы, то всё вещество Вселенной станет во много раз тяжелее и гравитационные силы, действующие между телами, возрастут на много порядков. А мы помним, что даже незначительно увеличение гравитационной постоянной приведёт к полностью необитаемой Вселенной. Эту дилемму принято называть проблемой массы Хиггса, и она явля-



ется ещё одной проблемой тонкой настройки Законов Физики, которую пытаются решить теоретики. Проблема массы Хиггса очень похожа на проблему малости космологической постоянной. Но какое отношение обе эти проблемы имеют к суперсимметрии?

Помните, как во второй главе я рассказывал о том, что фермионы и бозоны вносят противоположные вклады в энергию вакуумных флуктуаций и если бы их вклады удалось уравнять, это решило бы проблему энергии вакуума? Это верно и для нежелательных дополнительных масс частиц. В суперсимметричном мире огромный вклад квантовых флуктуаций можно приручить, оставив массы частиц невозмущёнными. Более того, даже нарушенная суперсимметрия могла бы облегчить проблему, если бы это нарушение было бы не слишком сильным. Это основная причина, по которой физики, изучающие элементарные частицы, надеются, что суперсимметрия ждёт их «за углом». Следует, однако, заметить, что нарушенная суперсимметрия всё равно не может объяснить столь невероятно малое значение космологической постоянной.

Проблема массы Хиггса похожа на проблему энергии вакуума ещё с одной стороны. Вайнберг показал, что жизнь не может существовать в мире со слишком большой энергией вакуума, и то же самое верно и для мира со слишком тяжёлыми элементарными частицами. Возможно, решение проблемы массы Хиггса лежит не в суперсимметрии, а в огромном разнообразии Ландшафта и антропной необходимости в небольшом значении этой массы. В течение нескольких лет мы сможем узнать, действительно ли суперсимметрия ждёт нас «за углом» или это мираж, который постоянно отступает при нашем приближении.

Один из вопросов, который неприлично задавать теоретикам, звучит так: «Если суперсимметрия настолько замечательна, элегантна и математически совершенна, почему мир не суперсимметричен? Почему мы не живём в столь элегантной Вселенной, которую струнные теоретики любят больше всего на свете?» Может ли причина заключаться в антропном принципе?

Наибольшая угроза для жизни в идеально суперсимметричной Вселенной исходит не со стороны космологии, а скорее со стороны химии. В суперсимметричной Вселенной каждый фермион имеет близнеца-бозона точно такой же массы — в этом и состоит проблема.

Её виновниками являются суперпартнёры электрона и фотона. Эти две частицы, называемые *сэлектрон*ом (тьфу, язык сломаешь!) и *фотино*, вступают в тайный сговор с целью уничтожения всех обычных атомов.

Возьмём атом углерода. Химические свойства углерода в основном определяются его валентными электронами — наиболее слабо связанными электронами внешней оболочки. Но в суперсимметричном мире внешний электрон может излучать фотино и превратиться в сэлектрон. Безмассовый фотино улетает со скоростью света, оставляя сэлектрон заменять в атоме обычный электрон. А это большая проблема: сэлектрон, будучи бозоном, не подчиняется принципу запрета Паули и падает на самую низкую орбиту. За очень короткое время все электроны станут сэлектронами и окажутся на самой нижней орбите. До свидания, химические свойства углерода, прощайте, все прочие молекулы, необходимые для жизни! Суперсимметричный мир может быть очень элегантным, но он не способен поддерживать жизнь — по крайней мере, жизнь того типа, которую мы знаем.

Вернувшись на веб-сайт <http://arXiv.org>, вы найдёте там ещё два архива: *General Relativity and Quantum Cosmology* (Общая теория относительности и квантовая космология) и *Astrophysics* (Астрофизика). В статьях, публикуемых в этих разделах, суперсимметрия играет менее заметную роль. Почему космолог должен обращать какое-то внимание на суперсимметрию, если мир не является суперсимметричным? Ответом может служить переиначенная фраза Билла Клинтона: «Это Ландшафт, идиот!»<sup>1</sup> Несмотря на то что симметрия может быть частично нарушена, в большей или меньшей степени, в нашей маленькой домашней долине, это не значит, что симметрия нарушается во всех уголках Ландшафта. Та часть ландшафта теории струн, которую мы лучше всего изучили, является регионом, где суперсимметрия точная и ненарушенная. Пространство, называемое *суперсимметричным пространством модулей* (или *пространством супермодулей*), представляет собой часть ландшафта, где каждый фермион имеет свой бозон и каждый бозон имеет собственный фермион. Как следствие, энергия ваку-

<sup>1</sup> Критикуя политику своего противника, Джорджа Буша-старшего, во время избирательной кампании 1992 года, Билл Клинтон заявил: «Это экономика, идиот!» — *Примеч. пер.*

ума строго равна нулю во всём пространстве супермодулей. Топографически это означает, что данная часть ландшафта представляет собой плоскую равнину, лежащую на нулевой высоте. Большая часть того, что мы знаем о теории струн, зиждется на нашем 35-летнем опыте изучения этой равнины. Разумеется, это также означает, что некоторые карманы Мегаверсума должны быть суперсимметричными. Но ни один суперструнный теоретик не смог бы насладиться жизнью в одном из этих карманов.

## Волшебная, таинственная и удивительная М-теория

Начиная с 1985 года теория струн, называемая теперь теорией суперструн<sup>1</sup>, существует в пяти версиях. Две из них наряду с закрытыми (замкнутыми) струнами содержат ещё и открытые (струны с двумя свободными концами), а три другие — только замкнутые. Названия этих пяти теорий не являются особо содержательными, но я их перечислю. Две теории с открытыми струнами называются теориями *типа I*. Три оставшиеся, содержащие только закрытые струны, известны как теория *типа IIa*, теория *типа IIb* и *гетеротическая* теория струн. Различия между ними носят слишком технический характер, и я боюсь, что их описание будет скучным для читателя. Но одна общая для всех этих теорий вещь гораздо интереснее, чем каждое из различий. Хотя некоторые теории содержат открытые струны, а некоторые — нет, все пять версий содержат закрытые струны.

Чтобы вы в полной мере смогли оценить, почему это так интересно, я должен пояснить, что именно разочаровывало исследователей во всех предыдущих теориях. В обычные теории — например, в квантовую электродинамику или в Стандартную модель, — гравитация добавлялась как «опция», как «плагин». Можно было либо игнорировать гравитацию, либо добавить её в готовое блюдо как специю. Рецепт прост: возьмите Стандартную модель и добавьте в неё ещё одну частицу —

<sup>1</sup> Приставка «супер» указывает на то, что во всех этих теориях существовали бозон-фермионные близнецы, и, как следствие, все эти теории родились из суперсимметрии.

Пусть гравитон будет безмассовым. Добавьте также несколько новых вершин в фейнмановскую диаграмму, чтобы любая частица могла испускать гравитоны. Блюдо готово. Но получившаяся теория работает не очень хорошо. Математика оказывается сложной и слишком чувствительной к малым возмущениям, и в конце концов фейнмановские диаграммы, содержащие гравитоны, превращаются в фарш из расчётов: все результаты оказываются бесконечными, и нет никакого способа придать этой теории хоть какой-нибудь смысл.

Мне кажется, что в каком-то смысле это хорошо, что простой путь завёл в тупик. В нём нет и намёка на объяснение свойств элементарных частиц. Он не даёт никакого объяснения, почему Стандартная модель именно такая, и он ничего не проясняет в вопросе тонкой настройки космологической постоянной или массы Хиггса. Откровенно говоря, если бы это работало, было бы очень обидно.

Но пять теорий струн вносят в этот вопрос полную ясность: они просто не могут быть сформулированы без гравитации. Гравитация в них — это не произвольная надстройка, а неизбежный результат. Теория струн, чтобы быть последовательной, *обязана* содержать гравитоны и силы, переносчиками которых они являются. Причина проста: гравитон — это закрытая струна, легчайшая из всех возможных. Открытые струны не являются обязательными для теории, но закрытые присутствуют всегда. Предположим, что мы пытаемся создать теорию, содержащую только открытые струны. Если бы мы добились успеха, то получили бы теорию струн без гравитации. Но мы успеха не добьёмся никогда, потому что два конца открытой струны всегда могут найти друг друга и замкнуться. Обычные теории оказываются самосогласованными *только* при *отсутствии* гравитации, в то время как теории струн согласуются, *только* если они *включают* гравитацию. Этот факт больше, чем любой другой, придаёт струнным теоретикам уверенность, что они находятся на верном пути.

Четыре теории, обозначаемые как тип I и тип II, были разработаны в 1970-х годах. И каждая из них имела фатальный дефект, относящийся не к внутренней математической согласованности, а к согласию теорий с экспериментальными данными. Каждая из теорий описывала возможный мир. Но ни один из этих миров не соответствовал нашему реальному миру. Поэтому пятая версия, разработанная в Принстоне

в 1985 году, вызвала большое брожение умов. Эта версия получила название гетеротической теории струн, и её появление было воплощением всех мечтаний теоретиков. Она выглядела как реальная теория реального мира. Её успех был провозглашён неминуемым.

Но даже тогда были причины выдвинуть к этой теории ряд претензий. Во-первых, по-прежнему оставалась проблема слишком большого количества измерений: девяти пространственных и одного временного. Но теоретики уже знали, что делать с лишними шестью измерениями. Они приказали им: «Свернись!» Однако оставались ещё миллионы возможных вариантов многообразий Калаби — Яу, каждый из которых приводит к согласованной теории. А ещё хуже то, что даже после того, как вы выбрали один конкретный вариант многообразия Калаби — Яу, в качестве свободных параметров остаются сотни модулей, определяющих его форму и размер. И эти модули тоже приходится выбирать самому теоретику. Кроме того, все известные теории были суперсимметричными: в каждой из них присутствовали частицы-близнецы, которые, как мы знаем, отсутствуют в реальном мире.

Тем не менее струнные теоретики были настолько ослеплены мифом об однозначности, что на протяжении 1980-х и в начале 1990-х годов продолжали утверждать, что существуют только пять вариантов теории струн. В их воображении ландшафт был очень разрежен — содержал только пять точек! Конечно же, это был полный нонсенс, поскольку каждая компактификация характеризуется огромным количеством переменных модулей, но тем не менее физики с редким упорством держались за идею-фикс, что существуют только пять различных теорий. Даже если бы и в самом деле существовали только пять возможных теорий, по какому принципу следует выбирать ту единственную, которая описывает реальный мир? Идей не было. Но в 1995 году состоялся прорыв — не в поиске правильной версии теории для описания реального мира, но в понимании связи между различными версиями.

## Университет Северной Каролины, 1995

Каждый год в конце весны — начале лета мировые струнные теоретики собираются на ежегодный джамбори. Американцы, европейцы, японцы, корейцы, индийцы, пакистанцы, израильтяне, латиноамери-

, китайцы, мусульмане, ортодоксальные иудеи, индуисты, верующие и атеисты, — мы все съезжаемся на неделю, чтобы послушать друг друга и поделиться свежими идеями. И почти все четыре или пять сотен участников знакомы друг с другом.

Учёные старшего поколения — все, как правило, старые друзья. Встречаясь, они делают то, что всегда делают физики: читают и слушают лекции по самым животрепещущим проблемам. А потом устраивают банкет.

1995 год стал незабываемым, по крайней мере для меня, по двум причинам. Первая причина состояла в том, что я был спикером на банкете. Второй причиной стало событие исторического значения для собравшихся там людей: Эд Виттен прочёл лекцию о впечатляющем прогрессе в наших исследованиях, очертив огромное поле совершенно новых направлений. К сожалению, лекция Виттена прошла мимо меня, но не потому, что я не смог на ней присутствовать, а потому, что я был занят мыслями о своей предстоящей банкетной речи.

То, о чём я собирался говорить, должно было взорвать вечер возмутительной гипотезой о том, что сегодняшние физики, возможно, были бы в состоянии выдвинуть революционные теории, даже если бы после окончания XIX века не было поставлено ни одного нового эксперимента. Моей целью было отчасти развлечь аудиторию, а отчасти обрисовать ожидающие нас, струнных теоретиков, перспективы. Я вернусь к этому в главе 9.

Тем, что я пропустил мимо ушей из-за мыслей о своей речи, была новая идея, которая могла бы стать центральным элементом моей концепции Ландшафта. Эд Виттен — не только великий матфизик, но и одна из главных фигур среди чистых математиков, которые уже давно стали движущей силой развития теории струн. Он — профессор (я бы даже сказал Профессор) и ведущий учёный перезаряженного интеллектом Принстонского института перспективных исследований, служившего домом Альберту Эйнштейну и Джону Роберту Оппенгеймеру. Виттен более чем кто-либо целеустремлённо гнал клячу науки вперёд.

К 1995 году стало ясно, что вакуум, описываемый теорией струн, отнюдь не единственный. Существовало несколько версий теории, каждая из которых приводила к различным Законам Физики. Это рас-

сматривалось не как достоинство, а скорее как недостаток теории. В конце концов, десять лет назад принстонские струнные теоретики выдвинули теорию, которая не просто обещала стать единственной, но и претендовала на роль окончательной, истинной теории, описывающей природу. Основной задачей Виттена было доказать, что все, кроме быть может, одной, версии теории струн математически несогласованны. Но вместо этого он обнаружил Ландшафт, или, точнее, регион Ландшафта, лежащий на нулевой высоте, то есть суперсимметричную часть Ландшафта.

Это произошло следующим образом. Представьте себе, что некие воображаемые физики обнаружили бы две теории, описывающие электроны и фотоны: обычную квантовую электродинамику и ещё одну теорию. Во второй теории электроны и позитроны, вместо того чтобы свободно перемещаться в трёхмерном пространстве, могли бы двигаться только в одном направлении, скажем, вдоль оси  $x$ . Они просто не в состоянии были бы двигаться в любом другом направлении. В то же время фотоны сохраняли бы способность двигаться обычным образом. Вторая теория могла бы привести теоретиков в замешательство. Насколько они могли бы судить, эта теория была математически полностью самосогласованной, как и квантовая электродинамика, которая описывает реальный мир атомов и фотонов, но ей не нашлось бы места в их представлениях о реальном мире. Никто из них долго не мог бы объяснить феномен существования двух одинаково хорошо самосогласованных теорий, одна из которых описывает реальный мир, а второй — место на помойке. Они бы надеялись и молились, что кто-то обнаружит ошибку, математическое противоречие, которое позволило бы отбросить нежелательную теорию и дать им основание полагать, что мир устроен именно так, а не иначе, потому что никакой другой мир невозможен.

Пытаясь обнаружить внутреннюю несогласованность второй теории, исследователи могли бы натолкнуться на некоторые интересные факты. Они не только не нашли бы никаких противоречий, но и начали бы понимать, что две означенные теории являются частями одной и той же теории. Они поняли бы, что вторая теория представляет собой просто частный случай обычной теории в области пространства с чрезвычайно сильным магнитным полем — как бы внутри некоего магнито-



резонансного супертомографа. Любой физик скажет вам, что очень сильное магнитное поле будет заставлять заряженные частицы двигаться только в одном направлении: вдоль магнитных силовых линий. Но движение незаряженных частиц, таких как и фотон, не зависит от магнитного поля<sup>1</sup>. Другими словами, они бы поняли, что существует только одна теория, только один набор уравнений, но два решения. Более того, непрерывно изменяя величину магнитного поля, можно получить весь набор решений между двумя предельными случаями. Эти вымышленные физики обнаружили бы непрерывный ландшафт и приступили бы к его изучению. Конечно же, они бы и понятия не имели о механизме, который позволил бы выбрать из всего спектра решений правильное, о механизме, который объяснял бы, почему в реальном мире отсутствует сильное фоновое магнитное поле. Но они бы надеялись объяснить это позже.

Это в точности то самое положение, в котором оставил нас Виттен в 1995 году в Лос-Анджелесе по завершении своей лекции. Он обнаружил, что все пять версий теории струн оказались решениями одной-единственной теории: мы имели не множество теорий, а множество решений. Все они принадлежали к семейству, которое включает в себя ещё одного члена — Виттен назвал его М-теорией. Кроме того, некоторые крайние значения модулей соответствуют шести теориям, описывающим наиболее удалённые уголки Ландшафта. Как в примере с магнитным полем, модули можно непрерывно изменять, превращая каждую из теорий в любую другую! «Одна теория — множество решений» — это стало нашим руководящим девизом.

Существует масса домыслов о том, что означает буква «М». Вот некоторые из них: *Мать, чудо* (Miracle), *Мембраны, Магия, мистика* и *Мастер*. Позднее этот список пополнили ещё и *Матрицы*. Никто, судя по всему, точно не знает, что имел в виду Виттен, когда придумывал термин «М-теория». В отличие от ранее известных пяти теорий, их новая кузина не является теорией с девятью пространственными и одним временным измерением. Вместо этого М-теория оперирует уже *десятью* пространственными и одним временным измерением.

<sup>1</sup> Магнитные силовые линии достаточно просто увидеть, поместив магнит под лист бумаги, на поверхности которого насыпаны железные опилки. Опилки выстроятся вдоль силовых линий поля и визуализируют их форму.

, что М-теория — это не теория струн: вместо одномерных «резинок» основными объектами М-теории являются мембраны — двумерные листы энергии, чем-то напоминающие упругие резиновые поверхности. Хорошей новостью является то, что М-теория, по-видимому, способна обеспечить объединяющий базис, в котором различные варианты теории струн появляются, когда одно или более из десяти пространственных измерений компактифицируются. Это был реальный прогресс, который обещал привести к построению общего для всех струнных теорий фундамента. Но была и тёмная сторона. Почти ничего не было известно о том, как соединить одиннадцатимерную общую теорию относительности с квантовой механикой. Математика мембран ужасно сложна, она выходит далеко за пределы математики струн. М-теория была так же таинственна и непостижима, как любая теория квантовой гравитации дострунной эпохи. Создавалось впечатление, что мы сделали шаг вперёд и два шага назад.

Но замешательство длилось недолго. Уже на следующей встрече струнных теоретиков летом 1996 года я имел удовольствие сообщить, что мы с тремя моими друзьями раскрыли секрет М-теории. Мы обнаружили основополагающие объекты теории, и уравнения, управляющие ими, оказались невероятно простыми. Томас Бэнкс, Вилли Фишер, Стивен Шенкер и я обнаружили, что основными сущностями М-теории были не мембраны, а более простые объекты, своего рода «партоны» нового вида. В каком-то смысле они похожи на старые партоны Фейнмана — эти новые компоненты обладали удивительной способностью соединяться вместе, образуя все возможные виды объектов. Гравитон, считавшийся наиболее фундаментальной элементарной частицей, оказался собранным из многих партонов. Если же собрать партоны другим способом, получались мембраны. Собранные ещё одним способом, партоны образовывали чёрные дыры. Уравнения новой теории оказались намного проще, чем уравнения теории струн, даже проще уравнений общей теории относительности. Новая теория получила название *матричной теории*. Иногда её название пишут как *M(atr)ix theory*, чтобы подчеркнуть связь с М-теорией.

Виттен не был первым, кто задумался о связи между одиннадцатимерной теорией и теорией струн. На протяжении нескольких лет ряд

изиков пытались привлечь внимание теоретической общественности к одиннадцатимерной теории, содержащей мембраны. Майк Дафф из Техасского университета А&М (сейчас он работает в Имперском колледже Лондона) высказал бóльшую часть идей несколькими годами раньше, но струнные теоретики не приняли их. Мембраны казались слишком сложными, математики недостаточно хорошо их понимали, чтобы принимать всерьёз те семена, которые Дафф пытался посеять в их умах. Но Виттен был авторитетом, и струнные теоретики, зацепившись за М-теорию, уже никогда больше не отпускали её.

Так что же это за М-теория, так захватившая воображение физиков? Это не теория струн. Неодномерные энергетические нити населяют её мир одиннадцати пространственно-временных измерений. Так почему же вдруг теоретики так заинтересовались двумерными энергетическими листами — мембранами, как они их назвали? Ответы на эти загадки лежат под покровом тайны компактификации.

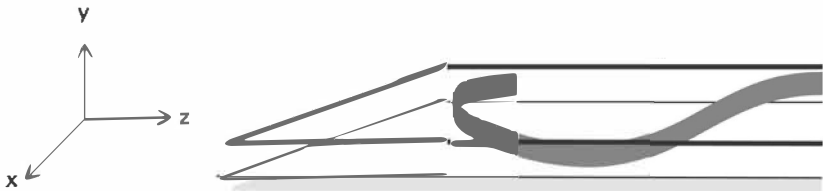
Давайте вернёмся к бесконечному цилиндру и вспомним, как мы его получили. Мы начали с бесконечного листа бумаги и вырезали из него бесконечную полосу шириной в несколько сантиметров. Представьте, что края полосы — это пол и потолок двумерной комнаты. Комната огромна, она бесконечно простирается в направлении  $x$ , но в направлении  $y$  она ограничена снизу и сверху полом и потолком. На следующем этапе мы соединяем пол с потолком и получаем цилиндр.

Представьте частицу, летящую в упомянутой бесконечной комнате. В определённый момент частица сталкивается с потолком. Что произойдёт дальше? Если полоса свёрнута в цилиндр, не возникает никаких проблем: частица просто продолжит свой путь, проходя сквозь потолок и появляясь из пола. В действительности нам не обязательно сворачивать бумажную полосу в цилиндр: достаточно просто знать, что каждая точка потолка соответствует единственной точке пола, так что когда частица проходит через край, она мгновенно оказывается на другом краю. Мы можем свернуть полосу или оставить её плоской: нужно лишь следить за выполнением правила, согласно которому каждая точка потолка идентифицируется с точкой пола, находящейся с ней на одном перпендикуляре к краю.

Теперь давайте немного усложним картину: пусть теперь наша комната имеет три измерения, как реальная комната, за исключением

того, что она бесконечно простирается в двух направлениях, на этот раз в направлении  $x$  и в направлении  $z$ . Но в вертикальном направлении  $y$  она по-прежнему ограничивается полом и потолком. Как и прежде, когда частица проходит сквозь потолок, она мгновенно появляется из пола. Трёхмерное пространство можно компактифицировать до двумерного. Если высоту комнаты, или, другими словами, расстояние вдоль оси  $y$ , сократить до микроскопических размеров, получившееся пространство будет восприниматься как двумерное.

Как я уже сказал, в М-теории нет струн, а есть только мембраны. Как совместить её с теорией струн? Представьте себе ленту, ширина которой в точности равна высоте комнаты. Поместим эту ленту в комнату так, чтобы её края касались пола и потолка. Сама лента при этом может иметь любую форму, она может змеиться вдоль комнаты, изгибаясь любым способом. Единственное условие состоит в том, чтобы эта поставленная на ребро лента всюду касалась пола и потолка и была в точности вертикальна. На самом деле лента больше не имеет края и в этом отношении подобна бумажному цилиндру. Но проще всего визуализировать её в виде длинной извилистой ленты, змеющейся по бесконечной комнате, пол и потолок которой соединены друг с другом описанным выше правилом.

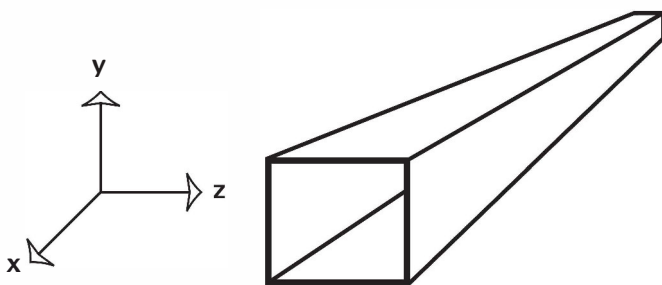


Теперь вы понимаете, как лента, представляющая собой двумерную мембрану, может имитировать одномерную струну. Если компактифицированное измерение настолько мало, что его невозможно увидеть без микроскопа, то для всех практических применений ленту можно считать струной. Если лента замкнута в кольцо, она будет неотличима от закрытой струны: *струны типа Па*, если быть точным.

Такова связь между М-теорией и теорией струн. Струны на самом деле являются очень тонкими лентами, или мембранами, которые вы-

глядят как тонкие струны, когда координата, представляющая их ширину, компактифицируется. Как видите, не так уж это и сложно.

Но можно пойти дальше и сделать ещё один шаг в сторону компактификации: компактифицируем теперь два измерения, скажем,  $z$  и  $y$ . Чтобы визуализировать этот процесс, представим себе не бесконечную комнату, а бесконечный коридор. У нас есть стены слева и справа, а также потолок и пол вверху и внизу. Но если смотреть вдоль коридора, то взгляд проникает сколь угодно далеко в любом направлении. Как и прежде, если объект пересекает потолок, он появляется из пола. Но что делать, если объект пересекает одну из стен? Вы, вероятно, уже знаете ответ: он появляется из противоположной стены, прямо напротив места, где он коснулся первой стены.



Точно тот же трюк может быть проделан и в десятимерном пространстве М-теории, только на этот раз «коридор» простирается на бесконечное расстояние в восьми из десяти пространственных направлений. Как и следовало ожидать, когда ширина и высота потолка становятся очень маленькими, неуклюжий крупномасштабный наблюдатель начинает считать, что он живёт в мире, состоящем из восьми пространственных измерений (плюс одно временное).

Тут-то и появляется на сцене шокирующее и странное следствие теории струн. Как только ширина и высота коридора становятся меньше определённого размера, из ниоткуда вырастает новое измерение. Это новое пространственное направление не является ни одним из тех, с которых мы начали. Мы знаем о нём благодаря косвенным математическим свидетельствам теории струн. Чем *меньше* мы делаем исходные пространственные измерения, тем *большим* становится новое.

В конечном итоге, если уменьшить коридор до нулевой высоты и ширины, размер нового измерения станет бесконечным. Поразительным следствием компактификации двух пространственных измерений оказывается получение в итоге не восьми, а девяти несвёрнутых пространственных направлений. Этот весьма странный факт, что десять минус два равно девяти, является одним из неожиданных следствий теории струн. Геометрия пространства далеко не всегда такова, какой представлял её себе Евклид или даже Эйнштейн. Очевидно, что на малых расстояниях пространство отличается от чего бы то ни было, что физики и математики могли представить себе даже в самых смелых мечтах.

Возможно, вас слегка запутало, что я постоянно использую то название «теория струн», то «М-теория» в отношении, казалось бы, одних и тех же вещей. Струнные теоретики тоже постоянно путаются в терминологии. Например, можно ли считать одиннадцатимерную теорию, содержащую мембраны, но не содержащую струны, частью теории струн? А компактифицированная версия М-теории, в которой мембраны трансформируются в струны, — это по-прежнему М-теория? Я боюсь, что эта книга не очень подходящее место для терминологических дискуссий. Что касается меня, то я отношу к теории струн всё, что выросло из первоначальной теории струн, созданной много лет назад. Сюда входит и то, что сегодня называется М-теорией. Термин же «М-теория» я использую, когда хочу подчеркнуть, что речь идёт именно об одиннадцатимерной теории.

В главе 10 я продолжу рассказ о теории струн, а сейчас хочу взять тайм-аут и дать вам отдохнуть от сложных технических аспектов теории струн и поговорить о проблеме, которая касается каждого серьёзного физика. На самом деле она касается не только физиков, а вообще всех, кто заинтересован в понимании природы на самом глубоком уровне.



## Глава 9

# САМИ ПО СЕБЕ?

Поиск фундаментальных физических принципов — очень рискованное занятие. Впрочем, как и любое погружение в неизведанное: у вас нет никакой гарантии успеха, вероятность же фиаско, напротив, очень велика. Путеводными звёздами физикам всегда служили экспериментальные данные, но сейчас они достаются с таким трудом, как никогда раньше. Все мы (физики) прекрасно понимаем, что чем глубже в структуру материи мы пытаемся проникнуть, тем сложнее и дороже становятся наши эксперименты. Для того чтобы построить ускоритель, который позволил бы погрузиться в планковские масштабы, то есть  $10^{-33}$  см, не хватит всего ВВП всей мировой экономики за сто лет. А используя сегодняшние технологии, мы рискуем получить ускоритель размером с Галактику! И даже если в будущем кто-нибудь придумает, как уменьшить размер ускорителя до более приемлемого в использовании, он будет каждую секунду потреблять энергию, образующуюся при сжигании триллиона баррелей нефти.

На что же мы тогда надеемся? Без экспериментальных проверок, удерживающих нас на правильном пути, наша затея становится весьма рискованным предприятием. С другой стороны, возможно, теория струн позволит нам сделать качественный скачок и игнорировать экспериментальные трудности, создав новую теорию, которая будет настолько аккуратно описывать Законы Физики, что ни у кого не останется никаких сомнений в её правильности. Беда в том, что мы даже не



, возможно ли это. То, что мы затеяли, настолько грандиозно, что не имеет исторических precedентов. Кое-кто считает это донкихотством, дурацким занятием, ведь даже те, кто этим занимается, сомневаются в конечном успехе. Для того чтобы напроорочить законы природы, управляющие миром, масштабы которого на 16 порядков меньше, чем доступные нам в экспериментах, необходимо иметь не только ум и настойчивость, нужна ещё и наглость!

Достаточно ли умна человеческая раса? Я имею в виду коллективный, а не индивидуальный разум. Сумеет ли объединённая человеческая мысль когда-нибудь разгадать величайшую загадку нашего существования? Способен ли человеческий ум, даже направленный по верному пути, понять Вселенную? Каковы шансы, что объединённые умственные усилия величайших физиков и математиков приведут к созданию финальной теории, тогда как наши экспериментальные возможности ничтожны по сравнению с размахом поставленной задачи?

Эти вопросы я собирался обсудить с моими коллегами на банкете в один из вечеров 1995 года. Мне кажется, что эти вопросы необходимо обсудить и в этой книге, хотя бы для того, чтобы дать читателю представление о тех трудностях, которые встают перед физикой в XXI веке. Чтобы как-то представить себе перспективы, я несколько самонадеянно предлагаю следующий мысленный эксперимент. Предположим, что экспериментальная физика прекратила бы своё существование 31 декабря 1899 года, и с тех пор мы бы не получили никаких новых экспериментальных данных. Как бы в этом случае развивалась физическая теория? Большинство людей ответят, что в этом случае теория быстро зашла бы в тупик, и в каком-то отношении они будут правы. Но, возможно, им просто не хватает воображения.

Если быть точным, то вопрос, который я хотел обсудить на том банкете, звучал так: «Насколько далеко смогли бы продвинуться физики-теоретики двадцатого века, будучи лишены руководящей и направляющей роли эксперимента? Сумели бы они открыть всё то или хотя бы какую-то часть того, что мы знаем сегодня?» Я не утверждал, что им бы всё это удалось, но у меня был ряд аргументов, доказывающих, что бóльшая часть нынешних теоретических открытий всё же была бы сделана. В оставшейся части главы я постараюсь вас в этом убедить.

Два столпа, на которых покоится физика XX века, — это теория относительности и квантовая механика. Обе эти теории были созданы в первые годы двадцатого столетия. Планк открыл свою постоянную в 1900 году, а в 1905 году Эйнштейн интерпретировал планковскую идею в терминах фотонов. Открытие Планка представляло собой не что иное, как описание свойств излучения нагретых тел (закон излучения абсолютно чёрного тела). Физики в 1900 году были не просто поверхностно знакомы с излучением абсолютно чёрного тела, напротив, они были глубоко озабочены имевшимся в теории противоречием. Математическая теория предсказывала, что мощность излучения абсолютно чёрного тела должна быть бесконечной. Количество энергии, приходящейся на каждую отдельную длину волны, было конечным, но, согласно физике XIX века, при суммировании всех этих энергий по бесконечному набору всевозможных длин волн, включая самые короткие, получалась бесконечная величина. Этот парадокс получил название «ультрафиолетовая катастрофа». В некотором смысле эта проблема была того же сорта, что и мать всех физических проблем: слишком много энергии приходилось на короткие длины волн. Эйнштейну удалось решить эту проблему (проблему теплового излучения) с помощью радикальной, но обоснованной гипотезы, согласно которой свет состоит из отдельных квантов. При этом он не опирался в своих предположениях ни на какие экспериментальные данные, полученные после начала XX века.

Год фотона стал также и годом специальной теории относительности. Опыт Майкельсона — Морли, показавший невозможность определить скорость движения Земли относительно эфира, был поставлен за 13 лет до начала XX века<sup>1</sup>. На самом деле неизвестно даже, знал ли Эйнштейн об этой работе. Согласно его собственным воспоминаниям, ключом к созданию специальной теории относительности послужила электродинамика Максвелла, созданная ещё в 1860-х годах. Эйнштейн, мастер мысленных экспериментов, в шестнадцатилетнем

---

<sup>1</sup> Согласно физическим представлениям XIX века, эфир — это упругая среда, заполняющая всё мировое пространство и проникающая сквозь любую материю, а световые волны — колебания частиц эфира. Таким образом, ожидалось, что для наблюдателя, движущегося относительно эфира, скорость света будет зависеть от его движения.

возрасте (то есть в 1895 году) спросил себя: «Как будет выглядеть луч света для наблюдателя, движущегося вместе с ним со скоростью света?» Даже в столь юном возрасте он понял, что в результате возникает противоречие. Таким образом, его великое открытие взросло отнюдь не на экспериментальной почве.

В конце XIX века физики приступили к разведке микроскопического мира электронов и атомов. Великий голландский физик Хендрик Антон Лоренц постулировал существование электрона, и в 1897 году британский физик Дж. Дж. Томсон открыл его и изучил его свойства. Рёнтген обнаружил свои знаменитые лучи в 1895 году, а годом позже Беккерель открыл и исследовал радиоактивность.

Но существовал и ряд явлений, не известных в то время и открытых несколькими годами позже. Так, Роберт Милликен измерил заряд электрона только в 1910 году, а опыты Резерфорда, приведшие к открытию атомного ядра<sup>1</sup>, были поставлены ещё позже, хотя какие-то спекуляции на эту тему существовали ещё в конце XIX века, а современные представления об атомах восходят ещё к Джону Дальтону и началу девятнадцатого столетия.

Открытие Резерфордом «планетарной» структуры атома — лёгких электронов, обращающихся вокруг тяжёлых ядер, — было ключевым. Через два года оно подтолкнуло Бора к созданию теории квантованных орбит. Но было ли открытие Резерфорда безусловно необходимым для создания теории Бора? Я сомневаюсь в этом. Я был удивлён, узнав недавно, что одна из первых успешных попыток построения квантовой механики, предпринятая Гейзенбергом, вообще не оперирует понятием атома<sup>2</sup>.

Первое приложение его матричной механики было теорией простых колеблющихся систем, так называемых гармонических осцилляторов. На самом деле теория Планка — Эйнштейна как раз и является такой теорией — теорией гармонических осцилляций (колебаний) поля излучения. А возможность изменения энергии отдельных осцилляторов

<sup>1</sup> Резерфорд бомбардировал атомы золота альфа-частицами (ядрами гелия) и по характеру отклонения альфа-частиц сделал вывод, что атом состоит из лёгких электронов, обращающихся вокруг тяжёлого ядра. Это был настоящий современный эксперимент в области физики элементарных частиц.

<sup>2</sup> Abraham Pais, *Niels Bohr's Times*, Oxford University Press, 1991.

лишь фиксированными порциями приводит нас к аналогии с боровскими дискретными орбитами. На этом фоне атом Резерфорда, как промежуточное экспериментальное открытие, не выглядит необходимым для создания квантовой механики.

Остаётся ещё одна проблема, касающаяся атома. Можно ли догадаться, что его структура подобна структуре Солнечной системы? Мне думается, что здесь ключевую роль могла бы сыграть спектроскопия, изучение спектральных линий — тех самых, которые Хаббл использовал для определения скоростей галактик. За XIX век было накоплено огромное количество спектроскопических данных. Спектр водорода был изучен во всех деталях. Другими словами, идея о том, что атом состоит из электронов и некоего положительно заряженного объекта, витала в воздухе уже за несколько лет до 1900 года. Недавно я узнал от одного своего японского друга, что первые идеи относительно планетарной модели атома были высказаны японским физиком Хантаро Нагаока. Существует даже японская почтовая марка с портретом Нагаока и его атомом.



Статья Нагаока, доступная в интернете, датирована 1903 годом, то есть она вышла за восемь лет до экспериментов Резерфорда. Если бы экспериментов Резерфорда не было, то богатые спектроскопические данные, квантовое поведение осцилляторов и идеи Нагаока вполне

могли бы привести блестящих молодых учёных Гейзенберга и Дирака к неизбежному моменту «эврики»: «Ага! Всё работает! Положительный заряд в центре и обращающиеся вокруг него по дискретным орбитам электроны!» Возможно, Бор пришёл бы к этому и самостоятельно. Современные физики совершили аналогичный, если не сказать, намного больший прорыв, выведя теорию струн из спектроскопии адронов.

Ну а что можно сказать относительно теории относительности? Могла ли она быть создана без проведённых в XX веке экспериментов? Безусловно! Всё, в чём нуждался Эйнштейн, — это мысленный эксперимент, который привёл его к открытию принципа эквивалентности. Оставалось лишь соединить принцип эквивалентности со специальной теорией относительности.

Сегодня, пожалуй, нет ни одного серьёзного физика, который не пытался бы соединить две на первый взгляд несовместимые теории. Я имею в виду, конечно же, квантовую механику и общую теорию относительности. В конце 1920-х годов существовала очень похожая проблема: как примирить квантовую механику со специальной теорией относительности. Физики масштаба Дирака, Паули и Гейзенберга не находили себе места, пока специальная теория относительности оставалась несовместимой с квантовой механикой. В результате родилась релятивистская квантовая теория, описывающая взаимодействие электрона с электромагнитным полем. Тут уже всё было достаточно однозначно. Первые усилия по созданию квантовой электродинамики были мотивированы не чем иным, как желанием Дирака объединить квантовую механику и специальную теорию относительности. Но откуда Дирак мог знать, что уравнение Дирака правильно?

И в этот драматический момент на сцену выходит Паули со своим принципом запрета. Истоки открытия Паули лежали в области химии, а именно периодической системы и попыток объяснения закономерностей расположения электронов на разных орбитах в атомах разных химических элементов. Чтобы объяснить, почему электроны заполняют орбиты в определённом порядке, Паули пришлось ввести новое свойство электрона — спин. Откуда взялась идея спина? Отнюдь не из новых экспериментов, поставленных в XX веке, а скорее из спектро-

скопических данных, накопленных ещё в XIX. Добавление новой, спиновой степени свободы означало, что Паули мог расположить на каждой орбите два электрона со спинами, направленными в противоположные стороны. Так, в атоме гелия два электрона находятся на одной и той же, самой нижней боровской орбите. Это предположение оказалось ключом к периодической системе Менделеева. Но если идея Паули, по сути, была всего лишь догадкой, основывавшейся на химии XIX века, то релятивистская теория Дирака блестяще объяснила загадочные свойства спина.

Однако у теории Дирака был один серьёзный недостаток. В реальном мире энергия, ассоциируемая с каждой частицей, имеет положительное значение, а первый вариант дираковской теории не согласовывался с этим очевидным фактом: у него получалось, что электроны обладают отрицательной энергией! Частицы с отрицательной энергией — это очень плохой знак. Вспомним, что электроны в атоме стремятся занять наиболее низкое энергетическое состояние, излучая фотоны в процессе перехода с более высоких на более низкие орбиты. Электрон «ищет» самое низкое энергетическое состояние, не запрещённое принципом запрета Паули. Но если энергия электрона отрицательна, то самого низкого энергетического состояния не существует: электрон будет «падать» всё ниже и ниже, а его энергия устремится к минус бесконечности. Высвобождающаяся при этом каскадном падении энергия будет уноситься фотонами, бесконечным количеством фотонов. Такое поведение электронов ставит всю теорию под угрозу полного провала, если только что-то не помешает электронам бесконечно проваливаться в пучину отрицательных энергий. Ситуацию снова спасает Паули со своим принципом запрета. Предположим, что вакуум на самом деле заполнен электронами с отрицательными энергиями. На что будет похож такой мир? Добавим в него некоторое количество электронов с положительными энергиями — теперь эти электроны уже не могут переходить в более низкие энергетические состояния, потому что они уже заняты электронами с отрицательными энергиями. Теперь мы можем спокойно рассматривать только электроны с положительными энергиями, поскольку их сваливание в отрицательную энергетическую область надёжно блокируется наличием так называемого *моря Дирака*, заполненного электронами с отрицательной энер-

. Дирак объявил проблему решённой, и так оно и было на самом деле.

Эта идея привела к одному неожиданному следствию. В обычном атоме электрон может поглотить фотон и перейти в более высокое энергетическое состояние<sup>1</sup>.

И тут Дирак показал себя во всём блеске. Он закономерно предположил, что нечто похожее может происходить и с электронами, имеющими отрицательную энергию и заполняющими вакуум: фотон может выбить электрон из моря Дирака, и тот приобретёт положительную энергию. Что же останется в море отрицательной энергии после того, как его покинет электрон? Дырка. Отсутствие электрона в море отрицательной энергии будет выглядеть как присутствие аналогичной электрону частицы, только имеющей положительный заряд. Таким образом, Дирак предсказал существование частицы, во всём идентичной электрону, за исключением её электрического заряда, который должен быть не отрицательным, а положительным. Это те самые позитроны, которые Фейнман впоследствии интерпретировал как электроны, движущиеся вспять во времени. Дирак же интерпретировал их как дырки в море электронов с отрицательной энергией. Кроме того, позитроны должны рождаться одновременно с электронами, главное, чтобы фотону хватило на это энергии.

Предсказание Дираком существования антиматерии было одним из величайших моментов в истории физики. Оно не только привело к последующему экспериментальному открытию позитрона, но ознаменовало рождение нового направления в физике — квантовой теории поля, которая затем привела к появлению фейнмановских диаграмм и в конце концов — к созданию Стандартной модели. Но давайте не будем бежать впереди паровоза истории.

Дирак не задумывался об экспериментальных подтверждениях, когда выводил своё знаменитое уравнение, описывающее квантовомеханическое поведение релятивистских электронов. Его заботило лишь, как согласовать нерелятивистское уравнение Шрёдингера со специальной теорией относительности Эйнштейна. Получив уравнение

---

<sup>1</sup> Этот процесс проявляется в возникновении в спектре линий поглощения, известных ещё в XIX веке.



Дирака, он получил ключ, открывающий дверь в квантовую электродинамику. Изучая квантовую электродинамику, теоретики, разумеется, нашли в ней несогласованности, которые «заклеили» различными перенормировками. Эти несогласованности не стали препятствием на пути к созданию современной теории поля<sup>1</sup>. Физики продолжали удивляться бесконечной вакуумной энергии и задаваться вопросом, почему она не создаёт гравитационного поля. Можно спросить: «Способны ли физики развивать свои теории, не получая экспериментальных подтверждений их правильности?» Или задать вопрос: «Готовы ли молодые учёные заниматься чисто теоретической работой, не имеющей выхода на эксперимент?» Но я не думаю, что вопрос о возможности дальнейшего развития теоретической физики стоял бы на повестке дня. Кроме того, 35-летняя история теории струн подтверждает, что теоретики способны сколь угодно долго развивать свои теории, пока найдется кто-то, кто согласен им за это платить.

А как насчёт ядер — микроскопических положительно заряженных «солнц» в центре миниатюрных атомных планетных систем? Могли бы мы теоретически вывести существование протона и нейтрона? Обнаружить протон не составило бы большого труда. Первый шаг в этом направлении сделал Дальтон ещё в 1808 году, обнаружив, что массы всех атомов относятся друг к другу как целые числа, откуда закономерно вытекает, что атомные ядра построены из набора одинаковых кирпичиков. Кроме того, поскольку заряд ядра почти всегда меньше атомной массы, логично предположить, что кирпичики, из которых сложено ядро, не все имеют один и тот же заряд. Простейшим выводом будет предположение, что частицы, составляющие ядро, могут быть двух типов: положительно заряженные и нейтральные, причём массы положительно заряженных и нейтральных частиц одинаковы. Умные теоретики пришли бы к такому выводу в кратчайшие сроки.

---

<sup>1</sup> Квантовая электродинамика страдает от серьёзной математической несогласованности. Строгое следование правилам вычисления в ней приводит к бессмысленным бесконечным результатам. В качестве временного лекарства от этой несогласованности в 1950-х годах была придумана перенормировка. Так было до начала 1970-х, пока Кеннет Вильсон не разработал более глубокую теорию, свободную от указанной несогласованности.

Или не пришли бы? Есть одна вещь, которая может ввести их в заблуждение, и я не знаю, как надолго. Существует возможность более простого объяснения структуры ядра, чем предположение о существовании протонов и нейтронов — это объяснение вообще не требует введения новой частицы. Ядро может представляться набором протонов с застрявшими в нём электронами, число которых меньше, чем число протонов. Например, 6 электронов, застрявших в куче из 12 протонов, могут интерпретироваться как ядро атома углерода, состоящее, как сейчас известно, из 6 протонов и 6 нейтронов. Масса нейтрона близка к суммарной массе протона и электрона. Разумеется, пришлось бы ввести новый тип сил: обычные электростатические силы, действующие между электроном и протоном, недостаточно сильны, чтобы удержать в ядре лишние протоны, заряд которых не скомпенсирован зарядом застрявших электронов. Для новой силы пришлось бы придумывать новую частицу-переносчик этого взаимодействия. Возможно, в конце концов они бы вернулись к нейтрону, решив, что это не такая уж и плохая идея.

Тем временем Эйнштейн разработал свою теорию гравитации, и любопытные физики принялись исследовать его уравнения. Здесь опять же нам нет необходимости гадать, как всё могло бы быть, потому что история уже всё предугадала за нас. Карл Шварцшильд нашёл решения уравнений Эйнштейна ещё до того, как тот завершил разработку своей теории. Решение Шварцшильда известно сегодня под названием чёрной дыры. Эйнштейн сам вывел существование гравитационных волн, которые в конечном итоге привели к идее гравитона. Большинство этих решений не требует для своего получения ни экспериментов, ни наблюдений. Следствия общей теории относительности были выведены безотносительно к тому, правильна эта теория или нет, имеет она экспериментальные подтверждения или не имеет. Даже современная теория чёрных дыр, с которой мы столкнёмся в десятой главе этой книги, использует только решение Шварцшильда в сочетании с простейшими идеями квантовой теории поля.

Могли ли теоретики додуматься до полной структуры Стандартной модели? С протонами и нейтронами более-менее понятно, а как же кварки, нейтрино, мюоны и всё прочее? Я не вижу никаких путей, ведущих к ним. Но касательно фундаментальных теоретических основ:

теории Янга — Миллса — здесь, как мне кажется, нет никаких сомнений. Все необходимые эксперименты к этому времени уже были поставлены, и все данные получены. В 1953 году, не имея никакой другой мотивации, кроме обобщения теории Калуцы на ещё одно дополнительное измерение, один из величайших физиков в истории создал математическую теорию, которая сегодня называется *неабелевой калибровочной теорией*. Вспомним, что Калуца добавил новое измерение к трём пространственным и тем самым получил единое описание гравитации и электродинамики. Паули, чтобы добавить ещё одно измерение и получить в общей сложности  $5 + 1$ -мерное пространство, свернул два дополнительных измерения в крошечную 2-сферу. И что же у него вышло? Он обнаружил, что два дополнительных измерения порождают теорию нового вида, подобную электродинамике, но с новыми особенностями. Вместо одного фотона список частиц теперь содержал три фотоподобные частицы. И что любопытно, каждый фотон нёс заряд: он мог испускать любой из двух других фотонов. Это был первый вариант неабелевой калибровочной теории, прообраз теории Янга — Миллса<sup>1</sup>. Сегодня мы считаем неабелевы калибровочные теории основой для всей Стандартной модели. Глюоны, фотоны, Z-бозоны и W-бозоны являются простыми обобщениями трёх фотоподобных частиц Паули.

Как я уже сказал, у теоретиков не было бы никаких шансов построить Стандартную модель, содержащую кварки, мюоны и нейтрино и бозоны Хиггса. И даже если бы они придумали что-либо подобное, это, скорее всего, осталось бы одной из дюжин аналогичных бесперспективных гипотез. Но я думаю, что существует вероятность, что им удалось бы найти основные теоретические ингредиенты.

Сумели бы они построить теорию струн? Создание теории струн служит хорошим примером, иллюстрирующим внутреннюю механику мыслительной работы теоретика. Опять-таки, абсолютно без какой-либо экспериментальной основы струнные теоретики возвели мону-

---

<sup>1</sup> Чж. Янг и Р. Миллс, независимо друг от друга, разработали неабелеву калибровочную теорию через год после работы Паули. Единственная причина, по которой я не включаю их теорию в свой рассказ, заключается в том, что Янг и Миллс использовали в своей работе некоторые эмпирические факты, относящиеся к атомным ядрам, которые не были известны до 1 января 1900 года.

ментальное математическое здание. История построения теории струн полна случайностей, поэтому к ней можно было прийти множеством других путей. Струноподобные объекты играют важную роль в неабелевых калибровочных теориях. Другим возможным путём возникновения теории струн является вывод её из гидродинамики — теории, описывающей течение жидкости. Вспомните, как выглядит воронка, образуемая спускаемой из ванны водой. В центре воронки формируется длинная змееобразная трубка из вращающейся воды, напоминающая струну. Другим примером служит формируемый вращающимся воздухом «хобот» торнадо. Ещё один пример: дымовое кольцо, выпускаемое курильщиком, в котором воздушный вихрь образует замкнутую петлю. Могли ли гидродинамики, пытаясь описать подобные вихревые движения, создать некое подобие теории струн? Мы этого никогда не узнаем, но это не повод отказываться от подобной гипотетической возможности. Не следует ли современным физикам попытаться применить методы гидродинамики к квантовой теории гравитации и получить что-то похожее на замкнутую вихревую струну, ведущую себя как гравитон? Почему бы и нет.

С другой стороны, могут возразить мне скептики, на каждую перспективную идею обычно приходится сотня тупиковых. Без экспериментов, дисциплинирующих теоретиков, ограничивая их безумные фантазии, невозможно выделить правильные идеи из этого интеллектуального хаоса.

Позиция скептиков весьма сильна. Не исключено, что они правы. Но существует возможность применения к теоретическим идеям дарвиновского отбора: хорошие идеи при этом выживают, а плохие гибнут. Хорошие идеи, как правило, приводят к появлению новых хороших идей, а плохие заводят в тупик. Одним из критериев хорошей теории может служить её математическая согласованность. Возможно, подобный критерий был бы способен в какой-то мере дисциплинировать теоретиков, сорвавшихся с цепи, на которой их держит эксперимент.

Способны ли физики, живя сто лет без экспериментов, идти тем путём, который я обрисовал? Кто знает... Я не утверждаю, что физика пойдёт таким путём, я утверждаю, что она могла бы им идти. Я уверен, что в попытках определить пределы человеческой изобретательности мы более склонны недооценивать, чем переоценивать, её границы.

Сегодня, оглядываясь назад, я понимаю, что в 1995 году я испытывал очень серьёзный недостаток воображения, говоря только об изобретательности теоретиков. Пытаясь утешить на том банкете себя и других физиков относительно плохих перспектив получения новых экспериментальных данных, я сильно недооценил изобретательность, воображение и творческий потенциал экспериментаторов. С тех пор они совершили революционный прорыв в получении новых космологических данных, о чём я уже писал в главе 5. В последней главе этой книги я расскажу о других интересных экспериментах, которые предполагается поставить в ближайшем будущем, а сейчас давайте вернёмся к теории струн и посмотрим, каким образом она создаёт гигантский ландшафт возможностей.



## Глава 10

# БРАНЫ В ОСНОВАНИИ ВСЕЛЕНСКОЙ МАШИНЫ РУБА ГОЛДБЕРГА

Теперь мы переходим к сути вопроса. Апелляции к той или иной форме антропного принципа с целью объяснить устройство Вселенной не новы. По-настоящему новой идеей, взорвавшей научное сообщество, вызвавшей ожесточённые споры среди физиков и явившейся причиной написания этой книги, стала идея о том, что ландшафт теории струн содержит огромное число разнообразных долин. Более ранние теории, такие как КЭД (теория фотонов и электронов) и КХД (теория кварков и глюонов), господствовавшие на протяжении всего XX века, описывали очень скучные ландшафты. Стандартная модель, как бы она ни была сложна, содержит только один вариант вакуума. Эти теории не оставляли нам вариантов выбора вакуума, в котором мы живём.

Причину такой скудности разнообразия вакуумов в старых теориях понять нетрудно. Она состояла не в том, что квантовые теории поля с богатым ландшафтом были математически невозможны. Добавив в Стандартную модель сотню-другую ненаблюдаемых полей, таких как поле Хиггса, можно было бы сгенерировать гигантский ландшафт. Причина единственности вакуума Стандартной модели кроется также и не в какой-то особенной математической элегантности, о чём я уже говорил в главе 4. Она скорее в том, что все эти теории выдвигались

с целью описания отдельных эмпирических закономерностей нашего собственного мира. Они были созданы на основе экспериментальных данных и лишь описывали, но не объясняли, наш собственный вакуум. Эти теории замечательно выполняли ту работу, для которой они были разработаны, но не более того. Имея перед собой такие ограниченные цели, теоретики не видели причин для добавления в теорию кучи дополнительных структур только для того, чтобы разнообразить ландшафт. Большинство физиков XX века, за исключением таких провидцев, как Андрей Линде и Александр Виленкин, сочли бы богатый ландшафт недостатком, а не преимуществом.

До недавнего времени струнные теоретики были ослеплены этой старой парадигмой, требующей, чтобы вакуум, описываемый теорией, был единственным.

Несмотря на то что существует по крайней мере миллион различных многообразий Калаби — Яу, которые могут быть использованы для компактификации дополнительных измерений, присутствующих в теории струн, ведущие исследователи продолжают надеяться, что им удастся найти некий математический принцип, на основании которого они смогли бы исключить все лишние варианты, кроме одного. Но, несмотря на все усилия, потраченные на поиск этого принципа выбора единственного вакуума, ничего подобного так и не появилось. Говорят, что надежда умирает последней, но в последнее время всё большее число теоретиков начинают подозревать, что правильная теория может оказаться совсем не тем, на что они надеялись. Эта теория претендует на то, чтобы её рассматривали как «теорию разнообразия», а не как «теорию единственности».

Что, если теория струн, производящая богатый и разнообразный ландшафт, как раз и является искомой теорией? Для ответа на вопрос необходимо рассмотреть невероятно сложные крошечные свёрнутые геометрии, скрывающие дополнительные шесть или семь пространственных измерений. Но прежде чем мы погрузимся в эти сложности, я хотел бы продемонстрировать одну из них на более простом примере. Этот пример, собственно, и послужил источником вдохновения для появления термина «Ландшафт».

Термин «Ландшафт» возник не из теории струн и не из космологии. Когда я впервые использовал его в 2003 году для описания большого



, я заимствовал его из более старой области науки: из физики и химии больших молекул. Возможные конфигурации больших молекул, состоящих из сотен или тысяч атомов, уже давно описывались как ландшафты или — иногда — как энергетические ландшафты. Ландшафт теории струн имеет гораздо больше общего с «конфигурационным пространством» больших молекул, чем с бедными ландшафтами квантовой теории поля. Я задержусь на этом моменте, прежде чем вернуться к теории струн.

Начнём с одного атома. Для того чтобы описать положение атома в пространстве, необходимо задать три числа, а именно координаты атома:  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Если вам не нравятся  $x$ ,  $y$  и  $z$ , можете использовать вместо них долготу, широту и высоту. Таким образом, возможные конфигурации одного атома — это точки в обычном трёхмерном пространстве.

Простейшая система, которую можно построить из атомов, — это двухатомная молекула: молекула, состоящая из двух атомов. Чтобы задать положения двух атомов, нужны шесть чисел:  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$ . Индексы 1 и 2 обозначают набор координат первого и второго атома соответственно. Эти шесть чисел задают две точки в трёхмерном пространстве, но мы можем также представить себе, что они задают положение одной точки в шестимерном пространстве. Такое шестимерное пространство является ландшафтом, описывающим двухатомную молекулу.

Теперь представим себе молекулу, состоящую из 1000 атомов. Для неорганической химии это огромная молекула, но для органической, а тем более для биохимии молекулы такого размера — вполне обычное дело. Как описать положение всех атомов в такой молекуле? Вопрос отнюдь не академический: биохимики и биофизики, пытающиеся понять, как происходит сворачивание белковой молекулы в пространственную структуру и как происходит денатурация белка, придумали понятие молекулярного ландшафта.

Очевидно, что для указания положений 1000 атомов необходимо 3000 чисел, которые мы можем представить как координаты точки на 3000-мерном ландшафте — ландшафте всевозможных состояний молекулы.

Набор атомов обладает потенциальной энергией, которая изменяется, когда атомы изменяют своё взаимное расположение. Например,

если атомы приблизятся друг к другу. Будучи предоставлены сами себе, атомы стремятся расположиться так, чтобы потенциальная энергия системы была минимальной. Несомненно, визуализировать потенциальную энергию 1000 атомов очень трудно, но общий принцип неизменен: потенциальная энергия молекулы меняется по мере того, как мы перемещаемся по ландшафту. В главе 3 мы представляли потенциальную энергию как высоту. Наш ландшафт имеет сложный рельеф с горами, долинами, горными хребтами и равнинами. Перемещаясь по этому сложному ландшафту, мы в конце концов придём к стабильной конфигурации молекулы, соответствующей локальному минимуму потенциальной энергии, то есть окажемся на дне одной из долин.

Более всего поражает воображение огромное количество этих долин: оно растёт экспоненциально с ростом числа атомов. Для крупных молекул количество отдельных локальных долин исчисляется не миллионами и даже не миллиардами. Ландшафт 1000-атомной молекулы содержит порядка  $10^{100}$  долин. Какое же отношение всё это имеет к ландшафту вакуума в теории струн? Ответ заключается в том, что как молекулы, так и компактификации теории струн имеют огромное число «движущихся частей», или более строго — *степеней свободы*. Некоторые из этих «частей» уже встречались нам ранее. Модули компактификации являются числами, которые определяют размеры и формы различных геометрических особенностей многообразий Калаби — Яу. В этой главе мы займёмся исследованием некоторых из «движущихся частей», чтобы понять, почему ландшафт теории струн настолько сложный и разнообразный.

## Д-браны

В главе 8 я рассказал, как Эд Виттен в 1995 году выдвинул идею объединения множества теорий струн в одну большую М(астер)-теорию. Но у новой теории была одна серьёзная проблема: теория требовала введения новых объектов, которых не существовало в прежних теориях струн. Получалось, что каждая из теорий струн должна была содержать неизвестные ранее объекты, глубоко скрытые в недрах её математиче-

ского аппарата. Фундаментальные струны в одной версии теории являлись совершенно иными объектами, нежели фундаментальные струны в другой версии. Но, изменяя модули, можно перебраться через ландшафт одной версии теории к другой, при этом объекты А одной теории превратятся в объекты Б другой. Одним из примеров является превращение мембран М-теории в струны теории типа Па. Идея Виттена была привлекательной и даже убедительной, но характер новых объектов и их место в математическом каркасе теории оставались полной загадкой до тех пор, пока Джозеф Полчински не обнаружил *браны*.

Джо Полчински выглядит очень молодо и ведёт себя как «свой в доску парень». Говоря о еде, Джо однажды заметил: «Существует только два вида блюд: те, которые едят с шоколадным соусом, и те, которые едят с кетчупом». Но мальчишеская внешность скрывает один из самых глубоких и мощных умов, атаковавших физические проблемы за последние полвека. Ещё до того, как Виттен представил свою М-теорию, Джо экспериментировал с новой идеей в теории струн. Скорее в порядке математической игры, нежели серьёзного исследования он предположил, что в пространстве могут существовать особые места, в которых струны обрываются. Представьте, как ребёнок дёргает скакалку в разные стороны, создавая бегущие волны. Волны распространяются к дальнему концу скакалки, но то, что происходит с ними дальше, зависит от того, закреплён второй конец скакалки или свободен. До Полчински считалось, что открытые струны всегда имеют свободные концы, «болтающиеся» в пространстве. Новая идея Джо состояла в том, что в пространстве могут существовать особые «якоря», удерживающие свободные концы струн от колебаний. Якорем может быть просто точка в пространстве: это более или менее напоминает ситуацию, когда второй конец скакалки удерживается от колебаний сильной рукой старшего товарища. Но существуют и другие варианты. Предположим, что конец скакалки прикреплён к кольцу, которое может скользить вверх и вниз вдоль вертикальной штанги. Конец как бы частично зафиксирован, но в какой-то мере может свободно двигаться. Хотя прикреплённый к штанге конец может свободно скользить по ней, это движение возможно только вдоль штанги. «Почему бы не применить аналогию скакалки и штанги к теории струн? — рассуждал Полчин-

ски. — Почему бы не существовать особым линиям в пространстве, к которым прикреплены свободные концы струн? Подобно скакалке, скользящей вдоль штанги, конец струны мог бы свободно скользить вдоль линии, причём сами линии могут быть и кривыми. Но точкой и линией не исчерпываются все возможности. Конец струны может быть присоединён к поверхности — своего рода мембране. Свободно скользя в любом направлении вдоль поверхности мембраны, конец струны в то же время не может её покинуть».



Эти точки, линии и поверхности, на которых может заканчиваться струна, нужно было как-то назвать. Джо придумал для них название «браны Дирихле», или просто *D-браны*. Дирихле был французским математиком XIX века, не имевшим ничего общего с теорией струн. Но 150 лет назад он изучал математику волн, в частности законы отражения волн от стационарных объектов. По справедливости, новые объекты должны были бы называться бранами Полчински, но термин «Р-браны» уже был занят струнными теоретиками для объектов другого вида.

Джо — мой хороший друг. В течение 25 лет мы тесно сотрудничали в ряде физических проектов. Впервые я услышал о D-бранах за чашкой кофе в Межгалактическом кафе Квакенбуша в Остине, в Техасе. Кажется, это было в 1994 году. Идея показалась мне забавной, но не революционной. Я был не одинок в недооценке значения D-бран. В те времена они не входили в список первоочередных дел теоретиков, и думаю — даже в список первоочередных дел самого Джо. Ситуация

кардинально изменилась в 1995 году, когда после лекции Виттена D-браны буквально взорвали мозги теоретиков.

Вы спросите: «Как D-браны связаны с лекцией Виттена?» Спустя несколько месяцев после неё, в ноябре, Джо написал статью, которая имела огромные последствия во всех областях теоретической физики. Новые объекты, необходимые Виттену, оказались именно D-бранами Джо. Вооружённые D-бранами физики получили, наконец, возможность завершить виттеновский проект по замене нескольких, на первый взгляд различных, теорий на одну, но с множеством решений.

## Браны любых размерностей

Что такого особенного в струнах? Что такого в одномерной энергетической нити, что вселяет в теоретиков уверенность в том, что эти нити являются строительными блоками всей материи? Чем больше мы узнаём о теории струн, тем более некоторые из нас убеждаются в том, что в струнах нет ничего особенного. В восьмой главе мы столкнулись с Магической Мистической Математической одиннадцати-Мерной М-теорией. Эта теория вообще не содержит струн. В ней есть мембраны, 5-браны и гравитоны, но не струны. Как мы видели, струны появляются только при компактификации М-теории, и даже тогда они являются не более чем предельными случаями мембран, которые становятся похожими на струны, когда размер компактифицируемого измерения становится достаточно малым. Иными словами, Теория Струн — лишь теория струн в некоторых ограниченных регионах Ландшафта.

В мире с пространственными измерениями существуют три типа объектов, которые струнные теоретики называют бранами. Самый простой из них — точечная частица. Поскольку точка не имеет размера ни в каком направлении, принято считать точку *0-мерным пространством*. Жизнь на точке очень скучна: ведь у вас нет ни одного направления для исследования. Струнные теоретики относятся к точечной частице как к 0-бране, где 0 обозначает размерность объекта. На их жаргоне 0-браны, к которым прикреплены концы струн, называются *D0-бранами*.

За 0-бранами идут 1-браны, или струны. Струна имеет протяжённость только в одном направлении. Живущие на струнах по-прежнему очень ограничены в своих возможностях, но в их распоряжении имеется по крайней мере одно измерение, пригодное для заселения. В теории струн существуют два вида 1-бран: оригинальные струны и D1-струны — и те и другие являются одномерными объектами, на которых могут заканчиваться обычные струны.

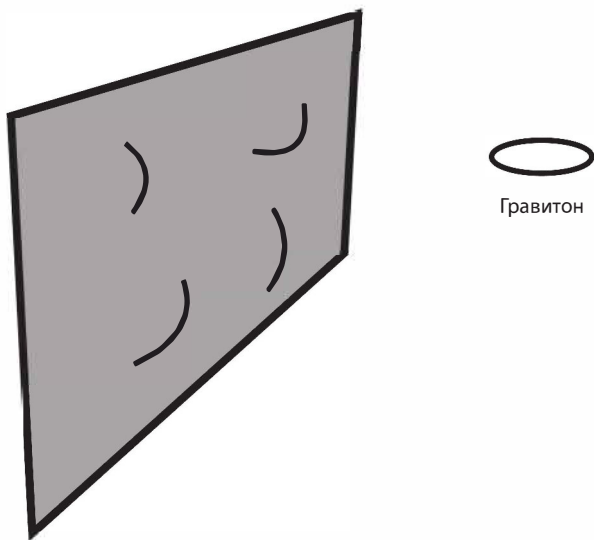
И наконец, в трёхмерном пространстве могут существовать 2-браны, или мембраны, напоминающие резиновые листы. Жизнь на 2-бране бесконечно разнообразна, но всё таки не так интересна, как в трёхмерном пространстве. На самом деле мы могли бы назвать наш мир трёхмерной 3-браной, но в отличие от 0, 1 и 2-бран мы не можем перемещать 3-брану в пространстве, поскольку она и есть пространство. Но предположим, что мы бы жили в мире с четырьмя пространственными измерениями. Дополнительное пространственное направление предоставило бы 3-бране свободу перемещения. В мире с четырьмя пространственными измерениями могут существовать 0, 1, 2 и 3-браны.

А как насчёт  $9 + 1$ -мерного мира теории струн? Вполне возможно, что в нём могут существовать браны всех размерностей: от 0-бран до 8-бран. Но *возможность* сама по себе ещё не означает, что этот мир действительно *содержит* такие объекты. Это зависит от основных «кирпичиков» материи и от того, как они «соединены» между собой. С другой стороны, это означает, что у нас есть достаточно измерений, чтобы обеспечить возможность существования таких бран. А десяти пространственных измерений М-теории достаточно, чтобы включить ещё один вид бран — 9-браны.

Но опять-таки, из одного лишь факта, что в десяти пространственных измерениях можно сконструировать десять различных видов бран, ещё не следует, что М-теория на самом деле содержит все эти типы бран в качестве возможных объектов. В действительности М-теория — это теория гравитонов, мембран и 5-бран. Других видов бран в ней нет. Объяснение, почему это так, увело бы нас слишком далеко в дебри высшей математики и суперсимметричной общей теории относительности, но нам туда и не нужно: достаточно просто знать, что 11-мерная супергравитация (в смысле:  $10 + 1$ -мерная) — это теория мембран и 5-бран, взаимодействующих путём обмена гравитонами.

Каждая десятимерная теория струн имеет собственный набор D-бран. Одна из версий, так называемая теория струн типа *IIa*, имеет *чётно-мерные* браны: D0, D2, D4, D6 и D8-браны. Теория типа *IIb* содержит *нечётно-мерные* браны: D1, D3, D5, D7 и D9-браны.

Подобно тому как к одной штанге можно прикрепить несколько скакалок, на D-бране может оканчиваться любое количество струн. Более того, одна струна может прикрепляться к D-бране обоими концами, подобно тому как скакалка может быть прикреплена обоими концами к одной и той же штанге. Эти концы струны будут свободно двигаться вдоль браны, но не смогут оторваться от неё. Они являются как бы осуждёнными на пожизненное заключение на D-бране.



Подобные струны интересны тем, что они ведут себя так же, как элементарные частицы. Возьмём, к примеру, D3-браны. Короткие струны, прикреплённые обоими концами к бране, имеют возможность свободно перемещаться по всему трёхмерному объёму D3-браны. Они могут соединяться вместе, образуя более крупную струну, вибрировать и снова рассоединяться. Они перемещаются и взаимодействуют как частицы, для объяснения поведения которых были состряпаны предыдущие теории струн. Только теперь эти частицы живут на бране.



D-брана представляет собой модель мира с элементарными частицами, поведение которых похоже на поведение настоящих элементарных частиц. Единственное, что отсутствует на D-бране, — это гравитация. Так происходит из-за того, что гравитон — это замкнутая струна, не имеющая концов, а струна, не имеющая концов, не может заканчиваться на бране и, соответственно, не может на ней жить.

Может ли реальный мир (если не принимать в расчёт гравитацию) электронов, фотонов и всех других элементарных частиц, а также атомов, молекул, людей, звёзд и галактик целиком помещаться на бране? Для большинства теоретиков, работающих над этой проблемой, подобная возможность представляется весьма вероятной.

## Браны и компактификация

Из бран можно сделать всё что угодно. Возьмите D2-брану — мембрану — и сверните её в 2-сферу. Получится поверхность шара. Беда в том, что поверхностное натяжение мембраны быстро сожмёт этот шар в точку. Вместо сферы можно было бы попробовать свернуть из D2-браны тор, но он точно так же быстро сколлапсирует.

Но теперь представьте себе брану, которая простирается от одного конца Вселенной до другого. Самым простым примером для визуализации является бесконечная D1-брана, протянутая через всю Вселенную подобно бесконечному канату. Бесконечная D-брана не может сжаться и сколлапсировать. Вы можете представить себе двух космических гигантов, держащих эту брану за концы, но так как D-брана бесконечна, гиганты тоже находятся бесконечно далеко.

Нет никакой необходимости ограничиваться D1-бранами: бесконечный лист, растянутый по всей Вселенной, тоже является стабильным, только на этот раз нам потребуется много гигантов, которые будут удерживать края этого листа по всему периметру, но, опять же, они будут бесконечно далеко. Бесконечная мембрана могла бы представлять собой мир элементарных частиц, фантастическую Флатландию, являющуюся двумерным аналогом нашей собственной Вселенной. Вы могли бы подумать, что существа, обитающие на мембране, не способны прийти к выводу о существовании других измерений, но это не

совсем правильно. Подсказкой служат свойства гравитационных сил. Вспомните, что гравитационное взаимодействие вызывается обменом гравитонами между объектами. Но гравитоны — это замкнутые струны, не имеющие концов, поэтому у них нет никаких причин оставаться на бране. Напротив, они свободно движутся через всё пространство. Они по-прежнему остаются переносчиками гравитационного взаимодействия между объектами, расположенными на бране, но при этом могут путешествовать через дополнительные измерения, возвращаясь затем обратно на брану. Гравитация, подобно космическому откровению из научно-фантастического романа, расскажет существам плоской земли о существовании иных измерений и о том, что эти существа находятся в заключении на двумерной поверхности.

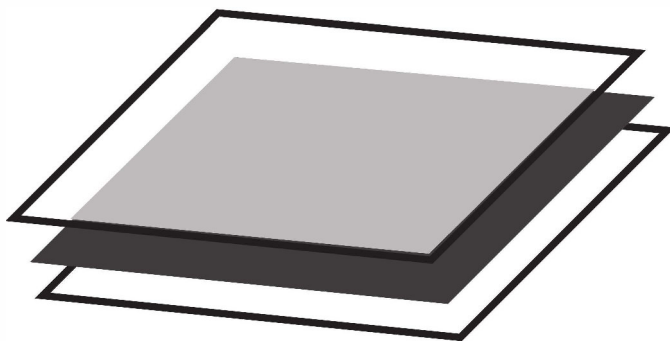
Ненаблюдаемые измерения гравитации в действительности будет очень легко обнаружить. Массивные тела, сталкиваясь, излучают гравитоны точно так же, как заряженные электроны, сталкиваясь, излучают фотоны. Но практически все излучаемые гравитоны будет улетать в космос, никогда не возвращаясь на брану. Улетая с браны, гравитоны будут уносить с собой энергию. Энергия будет постоянно *диссипировать* с браны. Флатландцы обнаружат, что не вся энергия преобразуется в тепло, что часть потенциальной или химической энергии просто исчезает.

Теперь представьте, что пространство имеет больше измерений, чем наши обычные три. Бесконечные D3-браны могут быть растянуты через пространство таким же образом, как и D2- или D1-браны. На 3-бране могут существовать все обычные вещи нашего мира, за исключением одной: гравитация будет вести себя неправильно. Законы гравитации будут отражать тот факт, что гравитон движется через пространство большей размерности, чем три. Гравитация будет как бы «разбавлена», «растворена» в дополнительных измерениях. Результаты для нашего мира окажутся катастрофическими. Сила тяжести будет гораздо слабее, и галактики, звёзды и планеты не будут удерживаться ею на своих орбитах. Более того, гравитация будет настолько слаба, что даже не сможет удержать нас на поверхности Земли.

Но давайте возьмём эти дополнительные измерения — те, которые мы не можем исследовать, но через которые может проходить гравитон, — и свернём их в микроскопически малое компактное простран-

ство. Три обычные пространственные измерения образуют бесконечную комнату, но дополнительные измерения упираются в «стены», «потолки» и «полы». Точки на противоположных стенах или на потолке и на полу соответствуют друг другу так же, как я описал в главе 8.

Чтобы лучше представить себе это, вернёмся к примеру, в котором мы компактифицировали трёхмерное пространство путём сворачивания одного измерения. Начнём с бесконечной комнаты, каждой точке потолка которой была сопоставлена точка на полу непосредственно под точкой на потолке. Но теперь на полу есть ковёр, который простирается до бесконечности во всех направлениях. Ковёр является D-браной. Представьте себе ковёр-брану, который поднимается вертикально вверх. Он медленно отрывается от пола, как волшебный ковёр в сказках «Тысячи и одной ночи», продолжает подниматься и поднимается до тех пор, пока не коснётся потолка. И в этот момент: «Абрашвабра-кадабра!» — и ковёр мгновенно возникает на полу.



До сих пор гравитоны не были привязаны к ковру-бране, но теперь они не могут улететь слишком далеко: для их движения остаётся слишком мало места в дополнительном измерении. И если дополнительное измерение микроскопически мало, то очень трудно определить, находится гравитон на бране или где-то рядом. В результате гравитационные силы будут практически неотличимы от случая, когда гравитоны вообще не покидают брану. И разумеется, не обнаружится ничего принципиально нового, если заменить мембрану D3-браной в пространстве более высокой размерности. D3-брана

в девятимерном пространстве теории струн оказалась бы очень похожей на наш мир, если бы дополнительные шесть измерений были компактифицированы.

Многие струнные теоретики уверены, что мы действительно живём в мире-бране, плавающем в пространстве с шестью дополнительными измерениями. И, возможно, существуют другие браны, плавающие по соседству на ничтожно малом расстоянии, но невидимые для нас, потому что фотоны, излучаемые на нашей бране, не могут её покинуть и попасть на соседнюю, и точно так же фотоны, излучаемые на соседней бране, не могут попасть на нашу. Невидимость соседних бран вовсе не означает невозможность их обнаружения. Гравитоны, представляющие собой замкнутые струны, способны преодолеть промежуток между бранами. Не проявляются ли они в форме влияния той самой тёмной материи, гравитационное притяжение которой удерживает звёзды в галактиках в нашей Вселенной? D-браны Полчински раскрывают перед нами все возможные варианты новых измерений. С нашей точки зрения, Вселенная, состоящая из множества бран, мирно сосуществующих бок о бок, является всего лишь одним из возможных вариантов Ландшафта. Невероятно сложные пространства Калаби — Яу, сотни модулей, мировые браны, потоки (о них мы ещё поговорим) — Вселенная начинает выглядеть подобно миру, который может понравиться разве что матери Руба Голдберга. Хочется перефразировать реплику знаменитого физика-экспериментатора Исидора Исаака Раби: «Ну и кто заказал все эти вещи?»<sup>1</sup>

Однако мы ещё не исчерпали все хитроумные механизмы, из которых может состоять машина Руба. Вот ещё один: браны могут не только плавать в компактифицированном пространстве, но и быть обёрнутыми вокруг одного из компактифицированных измерений. Простейший пример — D1-брана, обёрнутая вокруг бесконечного цилиндра. Это будет выглядеть так же, как обёрнутая вокруг цилиндра струна, за исключением того, что место струны займёт D1-брана. С большого расстояния такой объект будет выглядеть как точечная

<sup>1</sup> Раби прокомментировал открытие мюона (элементарной частицы, похожей на электрон, но имеющей в 200 раз большую массу) фразой: «Ну и кто это заказывал?» Раби имел в виду царивший в то время беспорядок в мире элементарных частиц.

частица на одномерной линии. Или предположим, что компактифицированное пространство представляет собой обычную 2-сферу. Можно попробовать обернуть струну или D1-брану вокруг экватора сферы как пояс вокруг Шалтая-Болтая. Но ведь пояс может и соскользнуть со сферического Шалтая. Струна или D1-брана, обёрнутая вокруг сферы, нестабильна, она не останется на ней надолго. По образному выражению Сидни Коулмана: «Нельзя заарканить баскетбольный мяч».

Теперь перейдём к тору, представляющему собой поверхность бублика. Можно ли обернуть D1-брану вокруг тора так, чтобы она осталась стабильной? Да, и не единственным способом. Существует два способа «опоясать» бублик. Один из них — продеть пояс сквозь дырку. Попробуйте сами: возьмите бублик, проденьте пояс... или галстук через дырку и завяжите. Он уже не сможет соскользнуть. Можете ли вы придумать второй способ опоясать тор?

Решающим фактором оказывается топология тора. Топология — это раздел математики, позволяющий отличать сферы от торов или более сложных пространств. Интересным расширением понятия тора является поверхность с двумя дырками. Возьмите комок глины и слепите из него шар. Поверхность шара является сферой. Теперь сделайте в этом шаре сквозное отверстие: получится бублик, поверхность которого является тором. Сделайте в комке ещё одно отверстие. Вы получите фигуру, поверхность которой является обобщением тора. Новую фигуру можно опоясать уже тремя разными способами. Математики называют сферу поверхностью рода 0, тор — поверхностью рода 1, а тор с двумя дырками — поверхностью рода 2. Очевидно, что, сделав множество отверстий, можно получить поверхность любого рода. Чем выше род поверхности, тем большим количеством способов можно обернуть вокруг неё брану.

Шесть из девяти размерностей, которыми оперирует теория струн, скрыты путём компактификации. Шестимерное пространство устроено гораздо более сложно, чем двумерное. Многомерные версии бубликов позволяют обернуть вокруг них не только D1-брану, но и D2, D3, D4, D5 и D6-браны, причём сотнями различных способов.

До сих пор мы оперировали одной отдельно взятой браной. Но на самом деле мы можем взять целую стопку бран. Вернёмся к ковру в бесконечной комнате. Что мешает нам постелить в ней два ковра, один на

другой? Можно положить друг на друга множество ковров, как на персидском базаре. И точно так же, как ковры могут свободно парить друг над другом, стопка D-бран может разделяться на отдельные свободно плавающие браны. Но браны больше похожи на липкие ковры — если соединить их вместе, они «слипаются», образуя составную брану, что даёт огромное количество вариантов конструирования машины Руба Голдберга. Например, можно расположить несколько стопок ковров на разных расстояниях от пола, что оставляет простор для конструирования миров с самыми разнообразными свойствами. Оказывается, что при помощи пяти ковров, склеенных по два и по три, можно сконструировать мир с Законами Физики, очень похожими на Стандартную модель!

Способ расположения бран в компактифицированном пространстве является новым свободным параметром для добавления модулей при подсчёте разнообразных вариантов конструкции Вселенной. На расстояниях, для которых размером компактифицированных измерений можно пренебречь, браны проявляются как дополнительные скалярные поля, определяющие Ландшафт.

## Потоки

Потоки появились как одна из самых важных составляющих Ландшафта. Они более, чем что-либо другое, делают Ландшафт невероятно огромным. Потоки являются несколько более абстрактными и труднопредставимыми сущностями, чем браны. Они играют огромную роль в теории струн, но по сути очень просты. «На расстоянии» они выглядят как ещё одна разновидность скалярных полей. Наиболее известными примерами потоков являются электрические и магнитные поля Фарадея и Максвелла. Фарадей не был математиком, но обладал великим даром визуализации. Он буквально видел электромагнитные поля в своих экспериментальных установках. В картине мира Фарадея магнитное поле представлялось в виде линий, вытекающих из северного полюса магнита и втекающих в южный. В каждой точке пространства эти линии, называемые ещё *силовыми линиями*, указывают направление

магнитного поля, а плотность линий (то, насколько близко они расположены друг к другу) определяет напряжённость поля.

Точно так же представлял себе Фарадей и электрические поля: в виде линий, исходящих из положительных зарядов и входящих в отрицательные. Представьте себе воображаемую сферу, окружающую изолированный положительный заряд с выходящими из него во все стороны и уходящими в бесконечность линиями. Все силовые линии неизбежно должны пересекать окружающую заряд сферу. Вот вам простейший пример потока поля через поверхность.

Мерой этого потока Фарадей считал количество проходящих сквозь поверхность силовых линий. Если бы он знал математический анализ, он бы описал поток как интеграл от величины напряжённости поля по поверхности, но идея количества силовых линий оказалась даже более удачной, чем мог предположить Фарадей. Поток через поверхность является одной из тех вещей, о которых квантовая механика говорит нам, что они *квантуются*. Квант потока не может быть разделён на более мелкие части точно также, как и фотон. Из-за того, что поток не может меняться непрерывно, представление его в виде конечного целого числа линий является более правильным, чем представление в виде поверхностного интеграла.

Обычно электрические и магнитные поля представляются как векторы в трёхмерном пространстве, но возможно также и представление этих полей как потоков в шести дополнительных свёрнутых измерениях. Несмотря на то что математическое описание потока в шестимерном пространстве очень сложно, вы можете по-прежнему представлять его себе как набор силовых линий или силовых поверхностей, намотанных замысловатым образом на пространство Калаби — Яу и проходящих сквозь дырки в многомерных бубликах.

Для более глубокого понимания поведения потоков в пространстве Калаби — Яу необходимо хорошо разбираться в современной геометрии и топологии, но наиболее важные выводы достаточно просты. Как и в случае с магнитными и электрическими полями, потоки, текущие через многомерные дырки от бубликов, квантованы. Они всегда представляют собой произведение некоего элементарного потока на целое число. Это означает, что для полного задания потока необходимо все-



го лишь задать набор целых чисел, сообщающих, сколько элементарных единиц потока проходит через каждую дырку.

Как много чисел понадобится для описания потока в пространстве Калаби — Яу? Это зависит от того, сколько дырок в этом пространстве. Пространство Калаби — Яу гораздо сложнее простого тора и обычно содержит несколько сотен дырок. Каждой дырке в описании потока соответствует одно целое число. Эти несколько сотен целых чисел, определяющих поток, являются частью общего описания положения точки на Ландшафте.

## Кониформные сингулярности

Итак, сейчас наш типичный набор чисел, описывающий размер и форму компактного пространства, содержит несколько сотен модулей, описывающих взаимное расположение бран, и ещё несколько сотен чисел, описывающих потоки. Что ещё можно добавить к нашей машине Руба Голдберга?

Вообще-то много чего, но чтобы не раздувать эту книгу до гигантских размеров, я расскажу только про *кониформную сингулярность*. Поверхность футбольного мяча — это сфера. Если вы игнорируете текстуру материала и швы, то можете считать эту сферу гладкой. Поверхность мяча для игры в американский футбол, наоборот, гладкая везде, за исключением концов, где она собирается в коническую вершину. Бесконечно острый выступ на гладкой поверхности называется *сингулярностью*. У мяча для игры в американский футбол примером такой сингулярности служат концы мяча, сходящиеся на конус. Сингулярность такого типа называется *конической сингулярностью*.

Сингулярности в пространствах высоких размерностей — места, где пространство перестаёт быть гладким, — являются более сложными. Они имеют более запутанную топологию. Кониформы представляют собой одну из таких сингулярностей, которая может существовать в пространстве Калаби — Яу. Как несложно понять из названия, она похожа на вершину конуса.

Для наших популяризаторских целей достаточно представлять себе кониформы как заострённые конические выступы на поверхности.

Наиболее интересные результаты получаются, если совместить конифолды и потоки в одном и том же пространстве Калаби — Яу. Поток, действуя на любую неоднородность поверхности, стремится вытянуть её, делая похожей на рыло муравьеда. Если таких неоднородностей много, то под действием потоков вскоре всё пространство Калаби — Яу покрывается конифолдными сингулярностями, становясь похожим на шестимерного морского ежа.

Теперь у Руба Голдберга достаточно деталей. Насколько же сумасшедшую машину сможет он построить? Вариантов — море, но мне хотелось бы описать один из них, называемый *конструкцией ККАТ*<sup>1</sup>. К., К., Л. и Т. начали с пространства Калаби — Яу. Существуют миллионы различных способов начать с пространства Калаби — Яу. Безразлично, какой из этих способов выбрать. Где-то в этом пространстве имеется похожая на рыло муравьеда конифолдная сингулярность. Затем ККАТ заполнили все возможные дырки потоками: по целому числу потоков на каждую дырку. Это означало, что они задали около 500 различных параметров: модулей и потоков. В результате получилась долина на Ландшафте, но не такая, о которой мы говорили ранее. Получилась Долина Смерти — но не потому, что она получилась горячей, а потому, что она оказалась расположенной ниже «уровня моря». Её высота оказалась отрицательной, что, в свою очередь, означало, что энергия вакуума и, как следствие, космологическая постоянная оказались отрицательными — плохой знак для нашей Вселенной. Вместо расширения Вселенной отрицательная космологическая постоянная приведёт к её сжатию, причём очень быстрому сжатию.

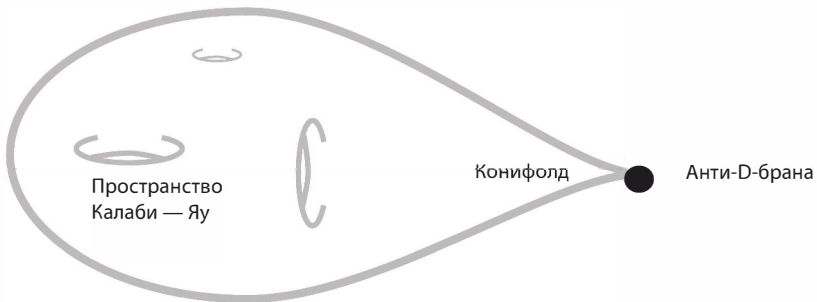
Но у ККАТ был запасён ещё один механизм для машины Руба Голдберга. Они добавили в неё анти-браны. D-браны похожи на частицы. И подобно тому, как каждая частица имеет свою античастицу, каждая брана имеет свою антибрану. И точно так же, как частица аннигилирует, встречая свою античастицу, браны и анти-браны, встре-

---

<sup>1</sup> Название ККАТ образовано из первых букв фамилий авторов статьи, в которой впервые была описана подобная конструкция, — Шамит Качру, Рената Каллош, Андрей Линде и Сандип Триведи.

чаясь, аннигилируют с высвобождением огромного количества энергии. Но ККАТ поместили в свою конструкцию только анти-браны.

Как оказалось, анти-брана испытывает на себе действие силы, которая тянет её в сторону вершины конифолдной сингулярности, а масса этой добавленной в конструкцию анти-браны добавляет в систему достаточно энергии, чтобы сделать высоту долины положительной. Таким образом, намешав всего понемногу, ККАТ добились того, что созданный ими ландшафт обладал очень маленькой положительной космологической постоянной, — у них получилась первая в своём роде конструкция, напоминающая нашу реальную Вселенную.



ККАТ-машина Руба Голдберга

Важность обнаруженной ККАТ долины, однако, не в том, что она напоминает нашу собственную Вселенную. В ней отсутствует Стандартная модель физики элементарных частиц, и в своём первоначальном виде она не содержит ингредиентов, необходимых для описания инфляции. Её важность состоит в том, что она оказалась первой успешной попыткой отойти от суперсимметричных равнин и найти долину, располагающуюся «над уровнем моря». Она послужила доказательством того, что ландшафт теории струн может содержать долины с небольшой положительной космологической постоянной.

Конструкция ККАТ напоминает своей сложностью машину Руба Голдберга, но она имеет одну особенность, которую сам Руб никогда бы себе не позволил. Один из её компонентов выполняет сразу две задачи. Анти-браны не только приносят в систему дополнительную энергию и делают космологическую постоянную положительной, они выполняют ещё одну очень важную работу. Наш мир, мир, в котором

мы живём, не суперсимметричен. В нём отсутствуют безмассовые фермионные суперпартнёры фотонов и бозонные близнецы электронов. До того, как авторы засунули анти-браны в горло конифолдам, система ККАТ всё ещё оставалась суперсимметричной. Но анти-брана искривляет суперсимметричное зеркало, приводя к нарушению суперсимметрии. Это очень не по-голдберговски — использовать одну и ту же деталь для выполнения двух различных функций.

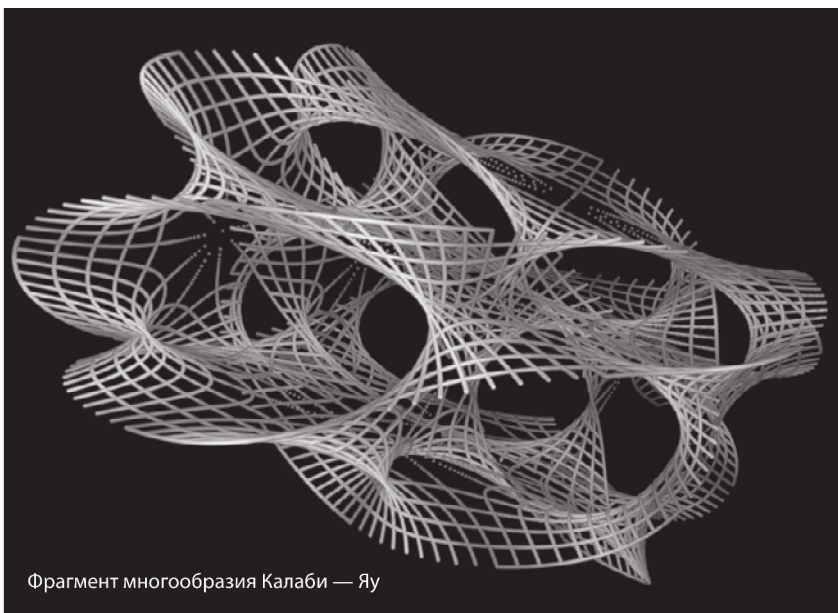
ККАТ-точка на ландшафте не является нашим миром. Но не так уж и сложно встроить в неё Стандартную модель, добавив ещё несколько бран. Пять дополнительных D-бран, расположенных где-нибудь в стороне от анти-браны, обеспечат необходимую функциональность нашей машины.

## Дискретуум Буссо и Полчински

ККАТ нашли не одну, а довольно обширный набор долин. Полчински и молодой аспирант из Стэнфордского университета Рафаэль Буссо к тому времени уже изложили основную идею в своей статье, которая была проигнорирована большинством физиков. Чтобы понять, как компактификация может привести к огромному количеству вакуумов, Буссо и Полчински сосредоточились на одной из возможных геометрий Калаби — Яу и задались вопросом: «Как много существует различных способов заполнить потоками сотни дырок от бублика?»

Предположим, что многообразие Калаби — Яу обладает топологией, достаточно сложной, чтобы содержать 500 дырок от бублика, сквозь которые можно пропустить потоки. Поток, текущий сквозь каждую дырку, выражается целым числом. Таким образом, для описания этих потоков нам понадобится 500 целых чисел.

Теоретически нет никаких ограничений на величину этих чисел, но на практике хотелось бы иметь не слишком большие потоки, текущие через каждую дырку. Слишком большие потоки привели бы к нежелательным последствиям, так как они стремились бы растянуть многообразие. Поэтому давайте введём некоторые ограничения. Пусть каждый поток выражается числом, не превосходящим 9. Тогда величина любого потока будет целым числом от 0 до 9. Как много вариантов мы получим?



Фрагмент многообразия Калаби — Яу

Начнём с простого примера. Пусть у нас есть только одна дырка вместо пятисот. Если величина потока, текущего через эту дырку, может принимать значения от 0 до 9, то мы получим всего десять вариантов: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9. Суть в том, что каждый из этих вариантов определяет свой собственный вакуум — среду со своими собственными индивидуальными законами природы и со своей собственной энергией вакуума. И хотя десять разных вакуумов — это много с точки зрения квантовой теории поля XX века, это крайне мало с точки зрения перспективы объяснить 119 нулей после запятой в значении энергии вакуума. Так что продолжим.

Предположим теперь, что у нас есть две дырки, через каждую из которых может проходить поток, имеющий значение от 0 до 9. Количество различных вариантов возрастёт до  $10^2$ , или до 100. Это уже лучше, но всё же ещё весьма скромно. Но обратите внимание, что каждый раз, когда мы добавляем новую дырку, количество возможных вариантов возрастает в десять раз. Шесть дырок дадут нам миллион вариантов, двенадцать дырок — триллион. Многообразие с 500 дырками будет обладать огромным числом возможных конфигураций:  $10^{500}$ .

Кроме того, каждая долина в этом невообразимом списке будет иметь свою собственную энергию вакуума, и никакие две долины не будут похожи друг на друга.

Представим все возможные значения космологической константы графически. Возьмите лист бумаги и проведите горизонтальную линию. В середине этой линии поставьте метку «0», а у правого конца — метку «1». Точка «1» будет обозначать энергию вакуума, равную 1 Единице. После нанесите на эту прямую равномерно ещё  $10^{500}$  меток... Даже очень острым карандашом вам вряд ли удастся нанести больше 1000 меток, прежде чем они начнут налезать друг на друга, сливаясь в непрерывную полосу.



Наверное, лучше было взять лист бумаги побольше. Но даже лист бумаги величиной с Эмпайр-стейт-билдинг позволит вам нанести не более нескольких миллионов меток. Взяв лист бумаги размером с Галактику, вы сможете нанести порядка  $10^{24}$  меток. Ни одно из этих чисел даже не близко к  $10^{500}$ . Даже если расстояние между соседними метками будет порядка планковской длины, а лист бумаги — размером с известную Вселенную, вам удастся расположить на нём не более  $10^{60}$  меток. Число  $10^{500}$  настолько велико, что я не могу себе представить способ изобразить его графически.

Множество всех возможных чисел в заданном диапазоне, включая дробные и иррациональные, называется *континуумом*. Но метки на нашей прямой не образуют континуум: хотя плотность их и невообразимо велика, они остаются дискретными метками. Для описания такого невероятно большого и плотного набора значений струнные теоретики Буссо и Полчински придумали слово *дискретуум*, обозначающее дискретное множество, настолько плотное, что на практике его трудно отличить от континуума.

Но самое главное, что среди множества случайно выбранных значений космологической постоянной будет огромное количество,

попадающее в крошечное «окно жизни», рассчитанное Вайнбергом. Таким образом, нет никакой необходимости в точной настройке космологической постоянной — хотя количество вариантов, попадающих в окно жизни, будет невероятно мало по сравнению с общим числом вариантов — примерно 1 на  $10^{120}$ , само по себе это число будет очень большим — порядка  $10^{380}$ .

Невероятный рост Ландшафта за годы, прошедшие с момента создания теории струн, был постоянной причиной головной боли у большинства струнных теоретиков. В те далёкие и счастливые дни, когда Ландшафт состоял всего лишь из одной точки или, на худой конец, из количества точек, которые можно было пересчитать по пальцам одной руки, теоретики были вне себя от радости, обнаружив, что несколько известных на тот момент теорий были в действительности всего лишь разными решениями одной теории. Но когда Ландшафт начал разрастаться с угрожающей быстротой, теоретики пришли в ужас. Невообразимо большой Ландшафт означает существование огромного количества различных решений. Но я надеюсь, что спустя некоторое время те же теоретики начнут воспринимать Ландшафт как единую и наиболее важную и убедительную особенность их теории. Можно задать вопрос: «Не подменяем ли мы одну неразрешимую проблему другой? Нам больше нет необходимости спрашивать себя, почему космологическая постоянная так тонко настроена. Возможно, и вправду Ландшафт настолько разнообразен, что мы можем найти на нём всё, что бы мы ни искали. Но какой физический принцип обеспечивает выбор нашей пригодной для жизни долины из  $10^{500}$  других?» Ответ, к которому мы придём в следующей главе, состоит в том, что никакого принципа нет, а сам вопрос является некорректным.





## Глава 11

# ВСЕЛЕННАЯ ИЗ МЫЛЬНОЙ ПЕНЫ

Одно дело утверждать, что теория порождает огромное количество возможностей для законов физики, и совсем другое — утверждать, что природа на самом деле использует все эти возможности. Какие из множества возможных условий действительно актуализируются в виде реальных миров? В числе решений уравнений физики есть и такие, которые описывают гигантские сферические конструкции из нержавеющей стали, вращающиеся вокруг массивных «звёзд», сделанных из чистого золота. Точнее: *теоретически* такие решения существуют. Но существуют ли такие объекты во Вселенной? Наверное, нет, и причины этого лежат в истории развития Вселенной. Нет ничего в механизме развития Вселенной, ничего в космологии Большого взрыва, что позволило бы объяснить, каким образом могли бы возникнуть подобные объекты. Математическое существование не тождественно физическому существованию. Открытие теорией струн  $10^{500}$  возможных решений ничего не объяснит нам про наш мир, если мы не понимаем, как соответствующие части Ландшафта могли появиться на свет.

Некоторые физики уверены, что должен существовать некий *вакуумный принцип отбора*, позволяющий выбрать одну из множества точек Ландшафта, а именно ту, которая соответствует нашей Вселенной. Подобный принцип, если он существует, должен быть математиче-

ским — возможно, это должно быть доказательство того, что только одно из возможных решений является математически согласованным. Но как бы то ни было, математика теории струн идёт другим путём — ко всё большей и большей не-уникальности. Я слышал мнение, что вакуумный принцип отбора должен быть космологическим: рождение Вселенной возможно только единственным способом, и он приводит к уникальному набору физических констант. Однако вакуумный принцип отбора сродни Лох-Несскому чудовищу — все утверждают, что он есть, но никто никогда его не видел. Многие из нас начинают подозревать, что этого принципа и вовсе не существует. Даже если бы такой механизм существовал, вероятность того, что в результате его работы Законы Физики будут настроены с той невероятной точностью, которая необходима для нашего существования, по-прежнему останется незначительной. Лично я считаю, что существование вакуумного принципа отбора было бы настоящей катастрофой.

Какова же альтернатива? Ответ может заключаться в том, что природа каким-то образом использует все возможности. Существует ли какой-нибудь естественный механизм, позволяющий «населить» Мегаверсум всеми возможными условиями, превращая их из математических возможностей в физические реальности? Большинство физиков, включая меня, верят, что такой механизм существует. Я называю это *населённым ландшафтом*<sup>1</sup>.

В этой главе я расскажу о главной идее населённого ландшафта: о механизмах, базирующихся на хорошо проверенных физических принципах, которые приводят к огромному или даже бесконечному количеству карманных вселенных, представляющих все возможные долины Ландшафта.

Механизмы, которые лежат в основе населённого ландшафта, основываются исключительно на принципах общей теории относительности и общепринятых положениях квантовой механики. Чтобы понять, как ландшафт становится населённым, нам придётся рассмотреть две фундаментальные физические концепции. Первая состоит в *метастабильности вакуума*. Она отражает тот факт, что свойства вакуума могут

<sup>1</sup> Идея населённого ландшафта наиболее близка космологам, таким как Линде, Виленкин и Гут, — они исповедуют её или что-то похожее на неё уже много лет.

, что пространство само себя клонирует.

## Стабильность и метастабильность

В мрачной научно-фантастической сатире Курта Воннегута «Колыбель для кошки» физик Феликс Хониккер обнаруживает новую кристаллическую модификацию воды под названием лёд-девятя. Кристаллическая структура льда-девятя несколько отличается от обычного льда. Представляя собой новый способ укладки атомов, она образует настолько стабильную кристаллическую решётку, что лёд-девятя тает только при температуре  $+45,8^{\circ}\text{C}$ . В романе Воннегута причина того, что вся вода на Земле до сих пор оставалась в обычном состоянии, в том, что крошечному зародышу нового кристалла необходимо «научить» молекулы воды собирать себя в более стабильную решётку льда-девятя. Один такой крошечный кристаллик-учитель льда-девятя, попав в любой водоём, так или иначе общающийся с мировыми водами, может привести к их стремительному превращению в лёд-девятя и, таким образом, гибели жизни на Земле. До Хониккера никто никогда не создавал кристалла льда-девятя, поэтому вся вода Земли до сих пор оставалась «не испорченной» смертоносным кузеном обычного льда.

Но она оставалась таковой лишь до тех пор, пока кусочек изобретённого Хониккером льда не попал в руки Папы Монзано, диктатора карликового островного государства Сан-Лоренцо. Папа Монзано кончает с собой, лизнув кусочек льда-девятя, дестабилизируя тем самым всю воду в своём организме. За доли секунды она превращается в смертельный лёд-девятя, и всё его тело моментально коченеет. Когда замок Монзано рушится в результате падения на него самолёта, тело диктатора попадает в море, вызывая цепную реакцию превращения всей воды на Земле в лёд-девятя.

Разумеется, лёд-девятя — это выдумка. Не существует модификации воды, остающейся твёрдой при температуре выше  $0^{\circ}\text{C}$ . «Колыбель для кошки» — всего лишь поучительная аллегорическая история о безумии и нестабильности мира, напичканного ядерным оружием. Но, несмотря

на свою фантастическую фэбулу, история про лёд-девять основывается на серьёзных физических и химических принципах, в частности на концепции *метастабильности*.

Стабильность подразумевает определённую степень устойчивости к случайным внешним воздействиям. Маятник, свисающий вертикально вниз, очень стабилен. В противоположность ему стоящий на острие карандаш крайне нестабилен и может упасть в непредсказуемом направлении. Метастабильность располагается где-то между этими двумя крайними случаями.

Некоторые системы обладают замечательным свойством длительное время сохранять стабильное состояние, а затем внезапно без всяких видимых причин претерпеть катастрофические изменения. Такие системы и называются метастабильными.

В реальном мире вода в закрытом сосуде при комнатной температуре стабильна. Но в выдуманном мире Феликса Хониккера и Папы Монзано она метастабильна. Реальная вода тоже может быть метастабильна, но не при комнатной температуре. Удивительно, но оказывается, что если медленно охладить воду ниже температуры замерзания или нагреть её выше температуры кипения, она может оставаться жидкой довольно долгое время, пока случайное внешнее воздействие не приведёт к тому, что вода моментально замёрзнет или вскипит. Как ни странно, но вакуум в теории струн, как правило, метастабилен. Однако прежде, чем мы погрузимся в метастабильную воду или в метастабильное пустое пространство, мне хотелось бы привести ещё один простой пример метастабильности.

Некоторые события лежат в плоскости невозможного. Независимо от того, как долго вы будете ждать, они никогда не произойдут. Другие события просто очень маловероятны, но если ждать достаточно долго, то они в конечном счёте происходят. Следующий пример иллюстрирует явление, невозможное с точки зрения классической физики. Представим себе небольшой мяч, который катится по одномерному ландшафту. То есть он не катится, а лежит в нижней части долины между двумя высокими горами. По другую сторону горы есть ещё одна долина, но мяч не может в неё попасть. Для того чтобы преодолеть гору и добраться до нижней части другой долины, мячу необходимо иметь достаточно кинетической энергии для компенсации потенциальной

энергии, соответствующей разности высот между нижней частью долины и вершиной горы. Если мяч покоится на дне долины, то у него нет энергии даже для того, чтобы забраться на подножие горы. Добраться до другой долины без дополнительного толчка мячу не просто маловероятно, а совершенно невозможно. Это пример идеальной стабильности.

Но теперь давайте добавим в нашу систему немного тепла. Если воздух в долине горячий, то мяч будет постоянно бомбардироваться хаотически движущимися молекулами воздуха — он будет обладать небольшой, если так можно выразиться, тепловой дрожью. И если мы запасёмся терпением и будем ждать достаточно долго, то в один прекрасный момент несколько необычайно энергичных молекул сумеют сообщить мячу импульс, достаточный для того, чтобы перекатиться через гору в соседнюю долину. Вероятность того, что такое случайное событие произойдёт в течение часа, чрезвычайно мала. Но какой бы малой ни была вероятность, она не равна нулю, а значит, рано или поздно мяч окажется в соседней долине.

Но погодите! Мы забыли про квантовую дрожь. Даже без добавления в систему дополнительного тепла — даже при температуре абсолютного нуля — мяч испытывает небольшие флуктуации из-за квантовой дрожи. Выходит, что даже в отсутствие тепловой энергии квантовые флуктуации в конечном итоге «пнут» мяч достаточно сильно, чтобы он перекатился через гору. Квантово-механический мяч в долине не представляет собой абсолютно стабильную систему: есть небольшая вероятность, что он окажется на другой стороне горы. Физики называют это странное непредсказуемое квантовое поведение «квантовым прыжком», или *туннелированием*. Обычно квантовое туннелирование является весьма маловероятным событием, его вероятность можно сравнить с вероятностью того, что запертые в комнате обезьяны, случайным образом ударяющие по клавишам пишущих машинок, напишут пьесу Шекспира.

Системы такого типа, которые не являются истинно стабильными, но могут находиться в стабильном состоянии в течение очень долгого времени, называются *метастабильными*. Существует множество примеров метастабильных систем в физике и химии: такие системы кажутся стабильными, но в конце концов в результате туннелирования они

В сатире Воннегута обычная вода при комнатной температуре представляет собой подобную метастабильную систему. Рано или поздно в ней образуется крошечный зародыш кристалла льда-девять — пусть даже только путём случайного движения молекул, — а затем возникнет цепная реакция, которая перестраивает метастабильную жидкую воду в более стабильный лёд-девять. Как мы вскоре увидим, существуют реальные примеры метастабильных состояний, образованных даже самой обычной водой и льдом. Но самое важное для нас то, что вакуум тоже может быть метастабильным. В нём могут образовываться и расти пузыри пространства со странными свойствами, отличными от свойств обычного пространства. Эти пузыри, спонтанно возникая и расширяясь, «портят» пространство подобно тому, как лёд-девять испортил всю воду на Земле. Это объясняет то, как ландшафт становится населённым, а Вселенная — разнообразной.

## Настоящая ледяная катастрофа

Вода замерзает при температуре 0 градусов по Цельсию. Однако можно охладить очень чистую воду до более низкой температуры так, что она останется жидкой, но делать это нужно очень медленно и осторожно. Жидкая вода при температуре ниже нуля точки замерзания называется *переохлаждённой*.

Переохлаждённая вода может оставаться жидкой при температуре ниже 0 °C в течение очень долгого времени. Но представьте себе, что в такую воду попадает крохотный кусочек обычного льда. Это приведёт к тому, что вода внезапно кристаллизуется вокруг него, формируя быстро растущий кусок льда. Так же, как лёд-девять уничтожил мир, кусочек настоящего льда быстро превратит в лёд всю переохлаждённую воду.

Помещение ледяного кристалла в переохлаждённую воду аналогично ситуации, когда шар, покоящийся в крохотной ямке на вершине горы, получает небольшой толчок. Это событие подталкивает шар, чтобы он перевалился через край лунки. В случае мяча этот толчок должен быть достаточно сильным, чтобы выкатить его из ямки. Сliš-

ком слабый толчок не достигнет цели: мяч просто откатится в исходное положение. То же самое верно для переохлаждённой воды. Если кристалл льда меньше некоего критического размера, он просто растает, несмотря на то что окружающая его жидкость переохлаждена. Например, ледяной кристалл размером в несколько молекул не сможет вызвать цепную реакцию замерзания.

Тем не менее даже без добавления в переохлаждённую воду кусочка льда её жидкое состояние не будет длиться вечно. Причина в том, что молекулы воды постоянно колеблются, отражаясь от друг друга и меняясь местами. Это движение обусловлено как тепловой, так и квантовой дрожью. Время от времени группа молекул совершенно случайно и самопроизвольно собирается в небольшой кристалл. По большей части такие кристаллы слишком малы и быстро разрушаются.

Но очень и очень редко будут образовываться кристаллы больших размеров, достаточных для того, чтобы вызвать цепную реакцию замерзания воды. Это явление называется *пузырьковой нуклеацией*, а растущий ледяной кристалл можно рассматривать как расширение пузыря. Очень похожие вещи происходят и с перегретой водой, то есть с жидкой водой, нагретой выше точки кипения. Единственное отличие заключается в том, что в этом случае возникает не кристалл льда, а пузырёк пара, который начинает стремительно расти.

Граница между твёрдым льдом и жидкой водой (или между водой и паром) называется *доменной стенкой*. Она похожа на мембрану, разделяющую две различные фазы<sup>1</sup>. Эта стенка обладает собственными свойствами, например поверхностным натяжением, стремящимся сжать пузырь. Другим примером доменной стенки может служить граница между обычной водой и воздухом. Помню, в детстве меня потряс опыт, в котором стальная иглолка плавала на поверхности воды. Граница домена, разделяющая воздух и воду, похожа на кожу, покрывающую жидкость. Она обладает поверхностным натяжением, которое можно обнаружить, например, в уже упомянутом опыте с иглолкой. Вакуум с положительной космологической постоянной сильно напоминает переохлаждённую или перегретую жидкость. Он метастабилен и может

<sup>1</sup> Физики и химики обычно говорят о льде, воде и паре как о трёх различных фазовых состояниях одного и того же вещества, иногда называя их попросту фазами: твёрдой, жидкой и газообразной.



распасться путём пузырьковой нуклеации. Каждый вакуум соответствует долине на Ландшафте с определённой высотой, или плотностью энергии. Но хотя вакуум и может казаться нашим грубым органам чувств спокойным и гладким, квантовые флуктуации постоянно создают крошечные пузырьки, в которых свойства пространства такие же, как в соседних долинах. Обычно пузырьки быстро схлопываются и исчезают. Но если соседняя долина расположена «ниже», чем наша, рано или поздно появится пузырь, достаточно большой для того, чтобы начать расти. Поглотит ли он всё наше пространство? Об этом вы узнаете в ближайшее время.

Доменная стенка, которая отделяет пузырь от окружающей среды, представляет собой двумерную поверхность, напоминающую мембрану. Но это не совсем та мембрана, с которой мы сталкивались ранее. В главе 10 мы узнали о D-бранах Полчински. Во многих случаях доменные стенки представляют собой не что иное, как D2-браны.

## Клонирование пространства

Есть одна вещь, отсутствующая в аналогии между космическими пузырьками карманных вселенных и кристалликами льда в переохлаждённой жидкости, а именно тенденция пространства к расширению. Каждая точка Ландшафта имеет свою уникальную космологическую постоянную. Напомним, что положительное значение космологической постоянной приводит к появлению всемирного отталкивания, растаскивающего материю в разные стороны. Современный специалист по общей теории относительности мог бы сказать, что расширяется само пространство, или, как принято говорить, *инфлюирует*, а материя просто «едет на нём верхом».

В те времена, когда Эйнштейн ещё только начинал экспериментировать с космологической постоянной, голландский астроном Вилем де Ситтер уже приступил к исследованиям инфлюирующего пространства. Пространство, или, если говорить строго, пространство-время, открытое де Ситтером (которое сегодня носит его имя), представляет собой решение уравнений Эйнштейна, в которых отсутствует энергия или гравитирующая материя, а имеется только

энергия вакуума в пустом пространстве, или, что то же самое, — космологическая постоянная. Подобно Эйнштейну де Ситтер предположил, что космологическая постоянная положительна. У него получилось, что пространство должно экспоненциально расширяться с течением времени. Экспоненциальное расширение означает, что если за какой-то период времени размер пространства увеличивается вдвое, то в течение следующего такого же периода времени размер пространства увеличится ещё вдвое, в течение следующего — ещё вдвое и т. д. Оно становится сначала в два раза больше, потом в четыре, в восемь, в шестнадцать — тот же процесс, что и при росте банковского капитала при условии его реинвестирования. При депозитной ставке 5 % реинвестируемый капитал удвоится за 14 лет. Космологическая постоянная играет в уравнении роль величины банковского процента — чем больше космологическая постоянная, тем быстрее удваивается размер пространства. Как и любое расширяющееся пространство, пространство де Ситтера удовлетворяет закону Хаббла — скорость удаления одной точки пространства от другой растёт пропорционально расстоянию между точками.

Для визуализации расширяющейся Вселенной мы использовали аналогию с надуваемым воздушным шаром. Но есть одно важное отличие расширяющегося пространства де Ситтера от надуваемого воздушного шара. При надувании шара резина, из которой он сделан, становится все более тонкой. В конечном итоге, когда она достигает предела своей прочности, шар лопается. Но ткань пространства де Ситтера никогда не меняется, как если бы молекулы резины постоянно размножались — клонировались по мере надувания шара, сохраняя толщину резиновой оболочки постоянной.

Разумеется, реальные молекулы резины так себя не ведут, а вот пространство, напротив, постоянно порождает новое пространство, чтобы заполнить освобождающееся при расширении место. Можно сказать, что пространство постоянно клонирует само себя — каждый крохотный объём пространства рождает новые дочерние объёмы пространства, и этот процесс развивается экспоненциально.

Представим себе, что некий наблюдатель находится в пространстве де Ситтера и движется вместе с пространством в процессе его расширения. Что он видит вокруг себя? Казалось бы, ничего особенного,

становиться всё больше и больше. Удивительно, но это не так. Оглянувшись, наблюдатель увидит, что пространство расширяется по закону Хаббла: близкие предметы удаляются медленно, далёкие — быстро. На некотором расстоянии от наблюдателя пространство будет удаляться от него уже со скоростью света. А на ещё большем расстоянии пространство будет удаляться с ещё большей скоростью! Пространство в этих областях будет мчаться прочь так быстро, что световые сигналы из этих областей уже никогда не достигнут наблюдателя, потому что сигнал не может распространяться со сверхсветовой скоростью. В результате какой-либо контакт с этими отдалёнными областями будет невозможен. Множество наиболее удалённых точек пространства, которые ещё можно наблюдать, то есть точек, удаляющихся от наблюдателя со скоростью света, принято называть *горизонтом*, или более строго: *горизонтом событий*.

Концепция космического горизонта событий — непреодолимого барьера для наших наблюдений или точки, откуда нет возврата, — это одно из самых увлекательных последствий ускоренного расширения Вселенной. Как и земной горизонт, это — далеко не конец пространства. Это просто конец того, что мы можем увидеть. Когда объект пересекает горизонт, он прощается с нами навсегда. Некоторые объекты могут изначально находиться за горизонтом. Наблюдатель никогда не сможет получить о них никакой информации. Но если такие объекты постоянно находятся за пределами наших возможностей каким-либо образом их обнаружить, существуют ли они вообще? Есть ли основания для включения в научную теорию областей, находящихся за горизонтом? Некоторые философы утверждают, что такие области являются метафизическими конструкциями, имеющими для научной теории не больше смысла, чем концепция ада, чистилища и рая. Их существование является признаком того, что теория содержит непроверяемые и поэтому ненаучные элементы, — ну, или по крайней мере так утверждают философы.

Любопытно, что во Вселенной, ускоренно расширяющейся под влиянием космологической постоянной, расстояние до горизонта событий никогда не меняется. Оно определяется значением космологической постоянной — чем больше космологическая постоянная, тем

меньше расстояние до горизонта. Наблюдатель живёт в неизменном мире конечного радиуса, окружённом горизонтом событий, но подобно тому, как земной горизонт ускользает от тех, кто пытается подойти к нему, так и горизонт пространства де Ситтера недостижим для его обитателей. Он всегда находится от них на одном и том же конечном расстоянии, но когда кто-то пытается к нему приблизиться, он обнаруживает, что там ничего нет! Однако если бы мы, оказавшись за пределами пространства де Ситтера, посмотрели на него, так сказать, со стороны, то увидели бы, что всё пространство экспоненциально расширяется со временем.

## Метастабильное пространство де Ситтера

Я хотел бы вернуться к разговору о метастабильных субстанциях, но в несколько ином ракурсе. Предположим, что рассматриваемая нами субстанция надувается. Чтобы представить себе расширяющуюся метастабильную субстанцию, вообразите бесконечное мелкое озеро переохлаждённой воды. Для имитации клонирования пространства расположим вдоль всего дна озера трубы, через которые постоянно подаются всё новые порции переохлаждённой воды. Для того чтобы освободить место для новой жидкости, вода постоянно растекается в горизонтальном направлении — любые две молекулы воды постоянно удаляются друг от друга, а на освобождающееся между ними место поступают новые молекулы из проложенных вдоль всего дна труб. Если на поверхности озера окажутся две лодки, то они также будут постоянно удаляться одна от другой, пока совершенно не потеряют контакт. Озеро надувается в точности как пространство де Ситтера.

В этой инфлюирующей переохлаждённой жидкости будет происходить постоянная спонтанная пузырьковая нуклеация. Если образующийся пузырёк, — или в данном случае ядро кристаллизации — окажется достаточно большим, то оно начнёт расти, превращаясь в расширяющийся ледяной остров. Но из-за того, что ядра конденсации переносятся вместе с растекающейся во все стороны жидкостью, они будут удаляться одно от другого так быстро, что никогда не встретятся

друг с другом. Водная гладь между образующимися ледяными островами расширяется, предотвращая превращение всего озера в ледяной монолит. Вода между островами вечно прибывает, оставаясь жидкой, несмотря на то что сами ледяные острова тоже растут бесконечно. Тем не менее любой наблюдатель, плывущий вместе с потоком воды, в конечном итоге окажется окружён льдом: по прошествии достаточного количества времени крошечные ледяные кристаллы, постоянно возникающие в окрестностях наблюдателя, в конце концов приведут к образованию льда, который поглотит наблюдателя. Это несколько парадоксально, но это так: в нашем озере всегда будет присутствовать бесконечное количество воды, однако любой произвольно выбранный объём этой воды рано или поздно превратится в лёд.

То, что я только что описал, является точной аналогией явления, называемого *вечной инфляцией*: растущие острова альтернативного вакуума в море вечно инфлюирующего пространства. И эта идея отнюдь не нова. Мой коллега из Стэнфорда Андрей Линде — один из величайших мыслителей — является автором многих современных космологических идей. С тех пор как я с ним познакомился, а знаком я с ним с тех пор, как он переехал из России в США, то есть около 15 лет, он не устал проповедовать доктрину вечно инфлюирующей Вселенной, постоянно порождающей вакуумные пузырьки самых разнообразных видов<sup>1</sup>. Другой русско-американский учёный, Александр Виленкин также известен своими непрекращающимися попытками двинуть космологию в сторону суперинфлюирующего Мегаверсума, порождающего огромное разнообразие вселенных. Но большая часть физиков до самого последнего времени игнорировала эти идеи. Но что больше всего потрясает, так это то, что последние модификации теории струн — наши надежды на построение теории всего — очень близко соприкасаются с этими высказанными ранее космологическими идеями.

Если взять общую теорию относительности, добавить к ней квантовую механику и применить их к начальному сверхплотному состоя-

---

<sup>1</sup> В своей оригинальной работе Андрей Линде использовал термин «самовоспроизводящаяся Вселенная». Я же предпочитаю использовать термин «вечная инфляция», поскольку он чаще встречается в литературе по этой теме.

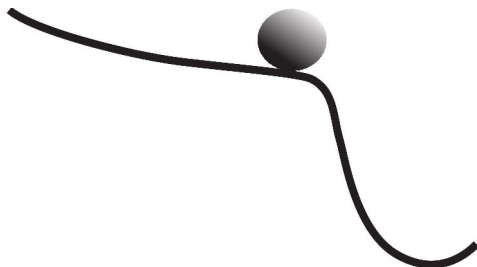
Вселенной, приправив ландшафтом теории струн, в итоге неизбежно получится вечно раздувающаяся метастабильная Вселенная.

## Вечная инфляция

Если вы купили эту книгу в надежде найти в ней окончательный ответ на вопрос о происхождении Вселенной, боюсь, вы будете разочарованы. Такого ответа не знаю ни я, ни кто другой. Некоторые думают, что Вселенная началась с *сингулярности* — бесконечно малого объёма с бесконечной плотностью энергии. Другие, и в особенности Стивен Хокинг и его последователи, верят в квантовое туннелирование из ничего. Мы знаем только одно: Вселенная когда-то началась. И в какой-то момент времени в прошлом она находилась в состоянии с очень большой плотностью энергии и, возможно, претерпела инфляционное расширение. Почти все космологи «верят» в то, что гипотеза об инфляционной стадии расширения Вселенной очень хорошо объясняет многие космологические загадки. В главе 4 я уже рассказывал о наблюдательных фактах, лежащих в основе этой веры.

Мы все уверены, что *наблюдаемая* история нашей Вселенной началась примерно 14 миллиардов лет назад в точке Ландшафта, где плотность энергии оказалась достаточной для того, чтобы обеспечить инфляционное расширение пространства как минимум в  $10^{20}$  раз. Причём эта величина, вполне возможно, недооценена. Плотность энергии в эту эпоху была невероятно огромна — мы не можем сказать, насколько огромна, но уж точно несоизмеримо больше, чем плотность энергии, достижимая в самых мощных ускорителях элементарных частиц. Повидимому, в то время Вселенная ещё не была поймана в ловушку одной из долин Ландшафта, а покоилась на относительно гладком и пологом плато. В процессе инфляции наш карман пространства (наша наблюдаемая Вселенная) медленно двигался по этому плато, имевшему небольшой уклон, к крутому обрыву в его конце. При падении с обрыва потенциальная энергия нашей Вселенной преобразовалась в тепло и элементарные частицы, породив материю, из которой впоследствии образовались звёзды и галактики. Это событие, при котором Вселенная заполнилась веществом, носит название *повторный разогрев*. После

этого она скатилась на дно нашей долины с тонко настроенной под удобное для нашего существования значение космологической постоянной. Вся наша космология относится именно к этому короткому периоду падения Вселенной от одного значения энергии вакуума к другому. Именно в этот период произошли все самые интересные события в истории наблюдаемой Вселенной.



Как карман с нашей Вселенной оказался на краю обрыва? Этого мы не знаем. Но очень удобно считать, что Вселенная началась именно тут. Без инфляции, вызванной высокой плотностью энергии на плато, вселенная не смогла бы эволюционировать в ту заполненную веществом Вселенную, которая нас окружает: достаточно большую, достаточно гладкую, достаточно однородную и при этом имеющую именно такую степень неоднородности, которая лучше всего подходит для возникновения жизни.

Проблема теории, которая ставит нас в начале времён на край обрыва, в том, что это всего лишь одна из колоссального количества возможных отправных точек. Единственное отличие этой точки от других состоит в том, что она предоставляет потенциальную возможность для развития жизни. Случайное помещение Вселенной в такую удачную точку Ландшафта — не лучший аргумент для исследователя, который хочет объяснить происхождение нашего мира без апелляции к концепции разумного замысла. Но, как я расскажу далее, теория, содержащая гигантский ландшафт, и не требует никакого выбора. На мой взгляд, совершенно неизбежно, более того, математически доказуемо, что если ландшафт очень разнообразен, то всегда найдётся такая часть пространства, которая эволюционирует в удачную для нас точку Ландшафта. Но не все с этим соглашаются.



Принстонский космолог Пол Стейнхардт в порядке критики антропного принципа заявил: «Антропный принцип допускает огромное количество предположений, связанных с существованием множества вселенных ... Зачем же все эти гипотезы о существовании бесконечного числа вселенных, обладающих множеством разных свойств? Неужели только для того, чтобы объяснить существование нашей собственной?» Ответ состоит в том, что нам не нужно высказывать никаких необоснованных гипотез — они естественным образом вытекают из общепризнанных принципов теории относительности и квантовой механики.

Это парадоксально, но в своей же собственной работе Стейнхардт сформулировал зародыш идеи вечной инфляции, причём там же он привёл аргументы, которые, с моей точки зрения, свидетельствуют в пользу того, что вечная инфляция неизбежна. Вселенная бесконечно дробится на карманы, которые возникают как пузырьки в только что открытой бутылке шампанского. Есть только два предположения о том, почему это происходит: из-за существования Ландшафта и из-за того, что Вселенная началась с состояния с очень высокой плотностью энергии, или, что то же самое, на большой высоте Ландшафта. Причём первое предположение, видимо, может быть доказано математически, и в этом смысле оно вообще не является предположением. Всё идёт к тому, что существование Ландшафта неизбежно вытекает из математики теории струн. Что до второго предположения, то высокая начальная плотность энергии — это практически наблюдаемый факт, она проявляется в форме того самого Большого взрыва, с которого начинается любая уважающая себя космология. Позвольте мне объяснить, почему я вместе с большинством других космологов нахожу идею вечной инфляции очень убедительной.

Прежде всего должен признаться, что это не моя идея. Впервые она была высказана космологами Аланом Гутом, Андреем Линде, Полом Стейнхардтом и Александром Виленкиным, а затем развита одним из величайших физиков моего поколения Сиднеем Коулманом. Итак, начнём с вселенной, или даже просто с области пространства, расположенной в произвольной точке на Ландшафте. Единственное требование к этой точке: плотность энергии в ней должна быть достаточно большой. Как и любая механическая система, наша область простран-

ства начнёт эволюционировать в сторону той части Ландшафта, где потенциальная энергия ниже. Представьте себе шар для боулинга, кающийся с вершины Эвереста. Какова вероятность того, что он докатится до берега Индийского океана, а не застрянет где-нибудь по дороге? Мягко говоря, не слишком высока. Гораздо более вероятно, что шар упокоится в какой-нибудь долине недалеко от горы. Причём знание начальных условий — точного места, откуда начал катиться шар, и точного значения его начальной скорости — вряд ли поможет нам предсказать, где именно он застрянет.

Ровно то же, что происходит с шаром для боулинга, произойдёт и с нашей областью пространства: скорее всего, она упадёт на дно какой-нибудь долины, где начнёт раздуваться. В процессе этого раздувания будут клонированы колоссальные объёмы пространства, и всё оно останется в этой долине. Конечно, существуют и другие долины, расположенные ниже той, в которой застрял наш пространственный пузырь, но чтобы добраться до них, Вселенной придётся перелезть через горные перевалы, высота которых намного превышает высоту долины, а сделать это она не сможет, потому что у неё уже не будет достаточно энергии. Поэтому наша Вселенная навсегда останется раздуваться в своей долине.

Но мы забыли одну вещь. Вакууму присуща квантовая дрожь. Подобно тому, как тепловая дрожь переохлаждённой воды вызывает спонтанное возникновение и исчезновение центров конденсации, квантовая дрожь вакуума рождает небольшие пузырьки альтернативного вакуума, которые тут же исчезают. Внутренность этих пузырьков может соответствовать условиям соседней долины, лежащей ниже нашей. Образование пузырьков происходит постоянно, но по большей части они слишком малы, чтобы расти дальше. Поверхностное натяжение доменной стенки отделяет пузырёк от остальной части вакуума и сжимает его. Но, так же как и в случае с переохлаждённой водой, рано или поздно в нашем пространстве образуется пузырёк, который окажется достаточно большим, чтобы начать расти.

Математическое описание формирования такого пузырька в инфлирующей вселенной было известно уже достаточно давно. Ещё в 1977 году Сидней Коулман и Франк де Лючия опубликовали статью, которой суждено было стать классической. Они рассчитали скорость,

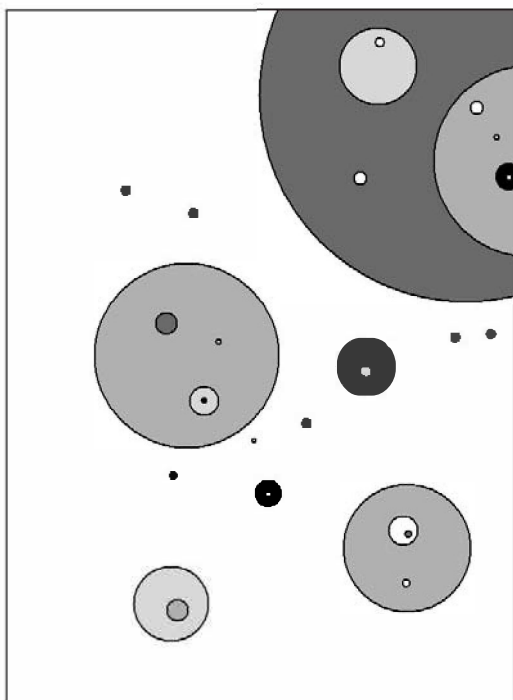
с которой такие пузыри будут возникать в раздувающейся вселенной, и, хотя скорость (количество пузырьков, образующихся в единицу времени в единице объёма) может быть очень мала, она, безусловно, не равна нулю. В их расчётах использовались только самые надёжные и проверенные методы квантовой теории поля, методы, по убеждениям большинства физиков, надёжные как скала. Таким образом, если только в наших фундаментальных теориях нет чего-то ужасно неправильного, инфлюирующий вакуум должен порождать растущие пузыри, условия внутри которых соответствуют условиям в соседних долинах.

Может ли столкновение пузырей привести к тому, что в конечном итоге всё пространство вселенной окажется в одной из соседних долин? Или, другими словами: расширяется ли пространство между пузырями достаточно быстро, чтобы предотвратить их столкновение и слияние? Ответ зависит от конкуренции между двумя параметрами: скоростью формирования пузыря и скоростью воспроизводства нового пространства — скоростью клонирования. Если пузырьки растут очень быстро, то они будут сталкиваться и в конечном итоге всё пространство «перельётся» в новую долину на Ландшафте. Но если скорость, с которой генерируется новое пространство, больше, чем скорость, с которой растут пузыри, то инфляция победит и пузыри никогда не встретятся друг с другом. Подобно ледяным островам в разливающемся озере переохлаждённой жидкости, пузыри будут развиваться изолированно и в конечном итоге окажутся за пределами горизонтов событий друг друга. Основная же часть пространства продолжит свою вечную инфляцию.

Так что же побеждает: пузырьковая нуклеация или клонирование пространства? В общем случае вопрос остаётся открытым. Пузырьковая нуклеация, как все прочие туннельные процессы, — явление редкое и маловероятное. Как правило, для того, чтобы возник пузырь, достаточно большой, чтобы не схлопнуться обратно, а начать расширяться, должно пройти очень, очень большое время. С другой стороны, скорость клонирования пространства, то есть его экспоненциальный рост за счёт энергии вакуума, чрезвычайно велика, если только космологическая постоянная не пренебрежимо мала. В большинстве случаев, кроме совсем уж надуманных, пространство продолжает клонировать

само себя экспоненциально, в то время как пузыри медленно возникают в соседних долинах Ландшафта. Клонирование пространства побеждает в нашей гонке с огромным отрывом.

Теперь давайте заглянем внутрь одного из пузырей. Что мы увидим? Скорее всего, мы окажемся в долине, высота которой несколько меньше, чем высота той долины, из которой мы заглянули внутрь. Пространство внутри пузыря тоже растёт. Я имею в виду не простое расширение пузыря, а клонирование пространства внутри него. Таким образом, история будет повторяться снова и снова. Новая область пространства в настоящее время находится в новой долине. Но есть и другие долины, расположенные ещё ниже. Внутри пузыря первого поколения может образоваться пузырь второго поколения, пространство внутри которого будет соответствовать ещё более низко расположенной соседней долине. И если этот пузырь окажется больше критического размера, он начнет расти, и мы получим растущий пузырь внутри растущего пузыря.

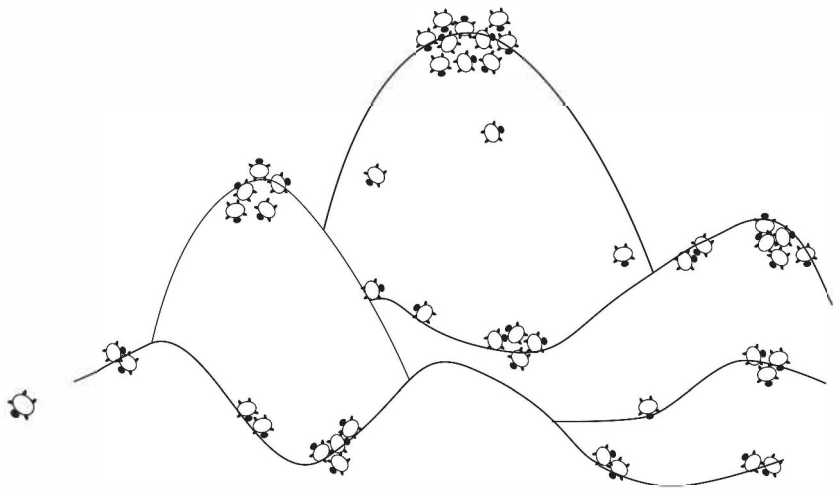


Обычно я стараюсь избегать биологических аналогий в физике, потому что люди склонны воспринимать их слишком буквально. Но я всё же использую сейчас одну из них. Только, пожалуйста, не подумайте, что я считаю, будто вселенные, чёрные дыры или электроны действительно являются живыми и участвуют в дарвиновском отборе или занимаются сексом.

Представьте Мегаверсум в виде колонии организмов, которые воспроизводятся путём клонирования. Ещё раз подчеркну, что под словом «организм» я понимаю не живое существо, а самовоспроизводящую область пространства. Поскольку клоны идентичны их родителям, мы вправе считать, что они располагаются в той же самой долине Ландшафта. Можно даже представить себе сам Ландшафт как набор биологических организмов: каждая долина будет соответствовать отдельному биологическому виду. Можно не беспокоиться о том, что организмы будут мешать друг другу: в нашем выдуманном мире более чем достаточно места для всех. Как только образуется пузырь со свойствами, отличными от свойств породившего его пространства, его потомство тут же оккупирует соседнюю долину. Поскольку пространство внутри пузыря также инфлюирует, его потомство будет участвовать в двух процессах: в процессе клонирования и в процессе заселения новых долин путём генерации нового поколения пузырей. Таким путём наша метафорическая колония будет распространяться по всему Ландшафту. Быстрее всего будут воспроизводиться области пространства, находящиеся в более высоких долинах, где космологическая постоянная имеет большее значение. В таких местах Ландшафта процесс клонирования идёт наиболее быстрыми темпами, и популяции, «живущие» в таких долинах, растут быстрее всего. Но организмы, живущие в более высоких долинах, «кормят» более низкие долины, и население последних также растёт со временем<sup>1</sup>. В конечном итоге каждая ниша Ландшафта окажется заполненной экспоненциально растущим населением. Единственное, в чём хромает эта аналогия, — это в том, что

<sup>1</sup> Интересным и важным вопросом является возможность существования «лестниц» на Ландшафте. Другими словами, может ли какой-нибудь из наших фиктивных организмов подняться в более высокую долину? Ответ, диктуемый правилами квантовой механики, утвердительный: всё, что может произойти, может произойти и в обратном направлении.

реальные организмы в ходе конкуренции начинают убивать друг друга, когда их долина становится перенаселённой. У карманных вселенных отсутствует механизм конкуренции, поэтому население каждой долины будет продолжать увеличиваться бесконечно. Можно было бы представить эти организмы как полностью невидимые и неосязаемые друг для друга.



Как пузыри умирают? Если пузырь появляется с точно нулевой космологической постоянной, он не может раздуться, и процесс воспроизводства на нём прервётся. Только такие вакуумы являются суперсимметричными частями Ландшафта. Таким образом, суперсимметричные регионы Ландшафта представляют собой кладбища вселенных по крайней мере в двух смыслах. Во-первых, жизнь в известном нам виде не может существовать в суперсимметричных мирах, а во-вторых, такое пространство не способно породить новые пузыри.

Аналогии часто помогают глубже понять какую-то одну сторону вопроса, но оказываются некорректными при рассмотрении вопроса в целом. Так, аналогия между раздувающимся пространством и эволюцией живых существ оказывается некорректной в отдельных деталях, например в том, что среди раздувающихся пузырей отсутствует конкуренция, которая всегда присуща эволюционирующим биосистемам. Кроме того, дарвиновская эволюция предполагает наследование при-

Если бы мы могли выстроить ряд фотографий приматов, начиная от пресловутого «пропавшего звена» пять миллионов лет назад и заканчивая мной или вами, то увидели бы непрерывную череду изменения признаков. Если мы будем игнорировать индивидуальные различия отдельных особей, то удивимся, насколько каждое следующее поколение похоже на предыдущее. Только накопленные за более чем тысячу поколений изменения будут заметны при взгляде на эти фотографии. То же самое будет справедливо для любых типов жизни. Большие структурные изменения происходят очень редко, и когда они возникают, то почти всегда ведут в эволюционный тупик. Любог человек, родившийся с двумя головами, тремя ногами или без почек, не проживёт сколько-нибудь долго (если только не призвать на помощь современную медицину), и подобные существа имеют крайне мало шансов оставить конкурентоспособное потомство.

В этом состоит радикальное отличие биологической эволюции от эволюции космического ландшафта. Изменение ландшафта, которое происходит при зарождении и раздувании нового пузыря, не носит инкрементального характера. Давайте рассмотрим этот процесс с точки зрения геологии. Геологически соседние долины различаются. Долина Аспен Вэлли в Скалистых горах лежит на высоте 2400 метров, что более чем на 600 метров ниже, чем Двойные озёра на другой стороне Перевала Независимости. Помимо разности высот, эти места различаются и своей природой. Если существует другая долина, настолько похожая на Аспен Вэлли, что мы, оказавшись в ней, не заметили бы разницы, то, скорее всего, она расположена очень далеко от неё.

То же самое касается и космического ландшафта. Высоты соседних долин не совсем одинаковые. И это может привести к тому, что соседние долины будут отличаться набором бран или потоков, что, в свою очередь, приведёт к различиям в списке элементарных частиц, другим значениям фундаментальных констант и даже размерности пространства. Когда вакуум-родитель порождает пузыря-потомка, результатом будет скорее чудовищная мутация, а не небольшое инкрементальное отличие.

Не является ли вечная инфляция, порождающая неисчислимые пузыри новых миров всевозможных видов, дикой фантазмагорической галлюцинацией? Я так не думаю. Экспоненциальное расширение про-



странства представляется достаточно твёрдо установленным фактом, который не оспаривает ни один космолог. Возможность существования более чем одной долины ни в коей мере не является чем-то необычным с точки зрения теории, так же как не подлежит сомнению, что раздувающиеся пузыри будут скатываться в области, лежащие на меньшей высоте. Это сегодня общепризнано.

Новым является то, что теория струн даёт нам математическое обоснование возможности существования огромного количества долин с разнообразными свойствами вакуума в них. Многих физиков этот факт очень тревожит. Но наиболее серьёзные струнные теоретики признают, что эта аргументация выглядит достаточно солидно<sup>1</sup>.

Рассмотрим последние этапы космической эволюции нашего фрагмента пространства, непосредственно предшествующие современной эпохе инфляции, последующего разогрева и возникновения жизни. Откуда мы пришли, перед тем как упали с инфляционного обрыва? Наиболее разумный ответ: из соседней долины, лежащей на большей высоте. Чем эта долина отличается от нашей? Теория струн способна дать ответ и на этот вопрос: потоки имели другие значения, браны были расположены по-другому и модули компактификации отличались от наших. Возможно, в процессе похода через горы к обрыву часть бран аннигилировала друг с другом, а остальные перестроились, потоки сместились, а сотни модулей изменились, чтобы создать новый вариант машины Руба Голдберга. И с новым порядком пришли новые Законы Физики.

## Парадоксальные отношения между детьми и родителями

В общей теории относительности Эйнштейна могут существовать такие решения, которые бросают вызов нашей способности представлять различные геометрические формы и их отношения. Ярким примером такого решения служат чёрные дыры. Ещё один чрезвычайно

---

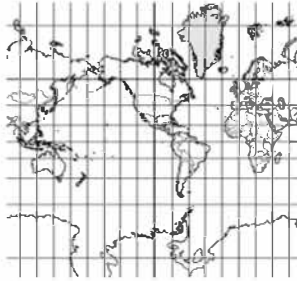
<sup>1</sup> Я не хочу сказать, что существует всеобщее согласие. По крайней мере один очень опытный и авторитетный струнный теоретик, Том Бэнкс, утверждает, что рассуждения, касающиеся Ландшафта, являются неубедительными.

интересный и любопытный пример — это геометрия пространства внутри раздувающихся пузырей. Снаружи пузырь выглядит как расширяющаяся сфера, окружённая доменной стенкой или мембраной. Энергия, высвобождающаяся за счёт процессов, происходящих внутри пузыря, преобразуется в кинетическую энергию быстро ускоряющейся доменной стенки. Спустя некоторое время пузырь будет расширяться практически со скоростью света. Можно было бы ожидать, что наблюдатель внутри пузыря будет видеть конечный мир, который в каждый момент ограничен расширяющейся стенкой. Но это не так. Вид изнутри пузыря оказывается совершенно неожиданным.

В пятой главе мы познакомились с тремя основными типами расширяющейся вселенной: закрытой и ограниченной вселенной Александра Фридмана, плоской вселенной и открытой вселенной с отрицательной кривизной пространства. Все три стандартных типа вселенных однородны и ни один из них не имеет края или стенки. Можно было бы подумать, что обитатель пузыря обнаружит расширяющуюся доменную стенку и придёт к выводу, что его вселенная не относится ни к одному из трёх стандартных типов. Это ошибочное предположение, потому что на самом деле обитатель пузыря будет наблюдать вокруг себя *бесконечную* открытую вселенную с отрицательной кривизной пространства! Как конечный расширяющийся пузырь может выглядеть изнутри бесконечной вселенной?! Это пример одного из удивительных парадоксов неевклидовой эйнштейновской геометрии.

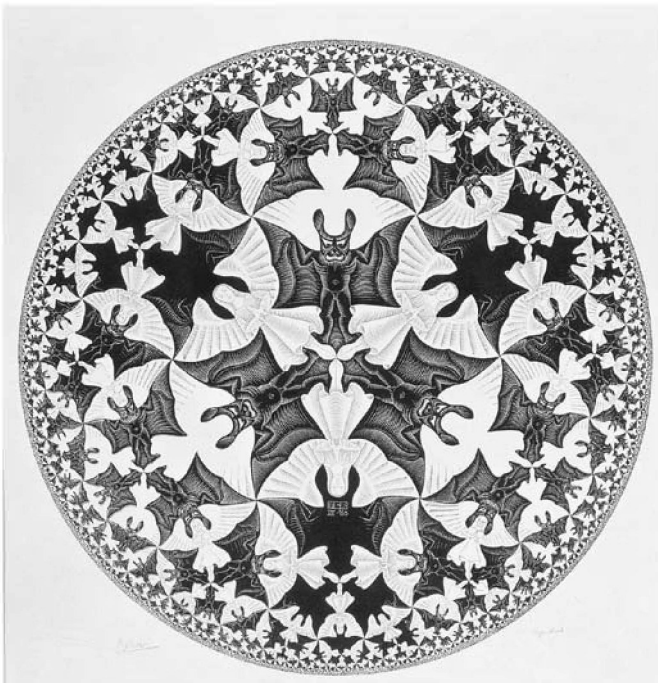
Я постараюсь дать вам некоторое представление о том, как разрешается этот парадокс. Начнём с карты Земли. Сферическая поверхность Земли не может быть отображена на плоскости без искажений. Например, в проекции Меркатора Гренландия выглядит почти столь же большой, как Северная Америка, и много большей, чем Южная Америка и Африка. Конечно же, она и близко не так велика, как эти континенты. Но для отображения поверхности Земли на плоскость такое искажение масштаба необходимо.

То же самое получится, если мы пытаемся отобразить на плоскость поверхность с отрицательной кривизной. Нарисовать такое пространство непросто, но к счастью, один знаменитый художник уже сделал эту работу. «Ангелы и дьяволы» Эшера представляют собой не что иное, как изображённое на плоском листе бумаги пространство



с отрицательной кривизной. В исходном пространстве все ангелы имеют один и тот же размер, и то же самое касается и демонов.

Представьте себе вместо ангелов галактики и вы получите представление о вселенной с отрицательной кривизной. Для того чтобы изобразить такую вселенную на плоскости, пришлось исказить масштаб, сделав объекты на краю меньше, чем объекты в центре.



На самом деле расстояние от центра пространства до границы является бесконечным. Чтобы добраться до края, необходимо пройти мимо бесконечного количества демонов (или ангелов). А поскольку каждый демон имеет тот же размер, что и все остальные, расстояние тоже оказывается бесконечным. Тем не менее все это бесконечное пространство умещается внутри круга, когда он отображается на плоскость. Имея это в виду, не так уж трудно представить себе бесконечные геометрии, вписывающиеся в конечные пузыри.

Особенно странным выглядит то, что если астроном захочет изучить расширяющиеся доменные стенки, он обнаружит, что они находятся бесконечно далеко. Внутри пузыря пространство оказывается безграничным, несмотря на то что в любой момент времени внешний наблюдатель видит пузырь как ограниченную сферу. Нельзя сказать, что астроном внутри пузыря не может обнаружить свет, приходящий от доменной стенки, потому что этот свет исходит не от границы пространства, а скорее от границы времени — момент его испускания соответствует моменту Большого взрыва, происшедшего в далёком прошлом. Это наиболее парадоксальная ситуация — бесконечно расширяющаяся вселенная внутри конечного расширяющегося пузыря.

Зная, что мы живём в открытой Вселенной с отрицательной кривизной, можно предположить, что наша карманная вселенная эволюционировала от чего-то, что в прошлом представляло собой пузырь в экспоненциально расширяющемся пространстве. Это утверждение выглядит достаточно логичным и непротиворечивым, но подтвердить его, по-видимому, невозможно. Наблюдаемая Вселенная слишком велика, и пока что мы видели только малую её часть. Мы даже не имеем достаточно данных, чтобы наверняка утверждать, искривлённая она или плоская.

А что можно сказать о нашей Вселенной сегодня? Может ли расширяющийся пузырь альтернативного вакуума возникнуть внутри нашей Вселенной и поглотить её? И что произойдёт с нами, если нас проглотит такой пузырь? Ответ, который сегодня предлагает теория струн, состоит в том, что мы в одночасье окажемся в среде, в которой жизнь будет невозможной. Как вы помните, все наблюдательные данные указывают на то, что космологическая постоянная и, соответственно, энергия вакуума в нашем мире чрезвычайно малы. Но нет никаких

причин, по которым внутри нашей Вселенной не мог бы возникнуть пузырь, обладающий ещё меньшей энергией вакуума. Ещё мы знаем, что есть такие места на Ландшафте, а именно кладбища вселенных: суперсимметричные области, где космологическая постоянная равна нулю. Если подождать достаточно долго, то мы окажемся именно в таком вакууме. К сожалению, как я объяснил в главе 7, даже такие инопланетные формы жизни, как суперструнные теоретики, вероятно, не смогли бы выжить в суперсимметричном мире. Суперсимметричная вселенная может быть чрезвычайно элегантной, но Законы Физики в таком мире не допускают существования обычной химии. Суперсимметричный мир — это не просто кладбище Вселенной, это — смертный приговор любой жизни на химической основе.

Если перспектива быть в конечном итоге проглоченными враждебной суперсимметричной средой неизбежна, то хотя бы сколько времени это займёт? Может ли это случиться завтра, в следующем году, через миллиард лет? Как и любая квантовая флуктуация, это может произойти в любой момент. Квантовая механика говорит только о среднем времени ожидания этого момента или о вероятности того, что это произойдёт в ближайшее время. На самом деле это вряд ли произойдёт в ближайший миллиард, триллион или квадриллион лет. Лучшие оценки показывают, что наш мир будет существовать ещё по крайней мере гуголплекс<sup>1</sup> лет, а возможно, и дольше.

## Два взгляда на историю

Сложно вообразить себе, что концепция населённого ландшафта может оказаться неверной, поскольку она следует из проверенных принципов. Тем не менее существуют серьёзные возражения против неё, вызывающие интерес. Пожалуй, самый неудобный вопрос, который может служить обобщением всей критики населённого ландшафта, можно сформулировать следующим образом:

«Вы утверждаете, что все прочие карманные вселенные лежат за горизонтом. По определению горизонт разделяет мир на две области,

<sup>1</sup> Число «гугол» определяется как  $10^{100}$ , то есть как единица и сто нулей. А гуголплекс — это десять в степени гугол.

которые не могут никаким образом обмениваться информацией друг с другом, то есть они друг для друга абсолютно ненаблюдаемы. Означает ли это, что другие карманы *принципиально необнаружимы*? Если да, то в чём состоит отличие их существования от их несуществования для нас? Почему мы должны считать существующими миры, которые никаким образом не связаны с нами, о которых мы никогда не сможем узнать и которые не оказывают на нас никакого воздействия? В этом разрезе идея населённого ландшафта относится скорее к метафизике, чем к физике».

Поскольку я считаю этот вопрос крайне важным, я посвятил ему всю следующую главу. На самом деле я легко мог бы написать даже целую книгу на тему горизонта событий и, вероятно, скоро так и сделаю. Но сейчас давайте просто сравним два способа изложения истории Вселенной. Первый способ тесно связан с обычными наблюдениями. Мы наблюдаем Вселенную изнутри при помощи телескопов, расположенных на поверхности Земли. Даже при наблюдениях из космоса, со спутника, результаты наблюдений всё равно возвращаются на Землю для анализа.

Наблюдения, производимые с Земли, ограничены объектами, расположенными до горизонта. Не только мы не видим ничего за горизонтом, но и ничто, находящееся за горизонтом, не может оказать на нас никакого влияния. Так почему бы не построить теорию, которая ограничивает область своего применения нашим обычным наблюдаемым пространством? Это прекрасный прагматичный взгляд, и я его горячо одобряю.

Какова же история Вселенной с точки зрения типичного земного наблюдателя? Хорошей отправной точкой может служить фрагмент пространства, оказавшийся в потенциальной ловушке в некоторой высокогорной долине. Чрезвычайно большая энергия вакуума приводит к появлению силы всемирного отталкивания, которая настолько велика, что мгновенно разрывает на куски даже субатомные частицы, такие как протоны. Мы видим, что наш изначальный мир чрезвычайно суров. К тому же он очень мал: горизонт событий находится в нём на расстоянии не большем, чем радиус протона, и доступные наблюдателю расстояния — микроскопические; возможно, они ненамного больше планковской длины. Очевидно, что никакой реальный наблюдатель



не сможет выжить в этой среде, но давайте пока игнорировать этот факт.

Через некоторое время пузырь начинает раздуваться, увеличивая доступную для наблюдения область пространства. Наблюдатель обнаруживает себя в окружении несколько более дружелюбной среды: космологическая постоянная уменьшается, а горизонт увеличивается. Тем не менее космологическая постоянная в новой долине всё ещё слишком велика для комфортного существования. Но пузырь снова раздувается, что приводит к дальнейшему уменьшению космологической постоянной. Такие резкие изменения могут происходить несколько раз. Наблюдатель последовательно проходит через целую череду миров, непригодных для жизни. В конце концов пузырь оказывается на нулевой высоте, с нулевой энергией вакуума, в полностью суперсимметричном мире. Пузырь эволюционирует до открытого мира с отрицательной кривизной, и на этом его эволюция завершается. Вероятность того, что в процессе эволюции от начального состояния до кладбища вселенных пузырь пройдёт через состояние, пригодное для возникновения жизни, чрезвычайно мала.

Но давайте предположим, что пузырь всё-таки пройдёт в своей эволюции стадию вселенной, близкой по параметрам к нашей, прежде чем свалится в суперсимметричное кладбище. Это очень маловероятно, учитывая, насколько редки удовлетворяющие нас долины, но это может случиться. Разовьётся ли в нём жизнь? Это очень сильно зависит от того, каким путём наш фрагмент пространства оказался в благоприятной для жизни долине. Одним из огромного количества вариантов является сваливание пузыря в долину с инфляционного обрыва. Это хорошо. Инфляция приводит к возникновению гостеприимной вселенной. Но если фрагмент пространства попадает в долину другим путём, тогда наша ставка проиграна. Если пузырь не задержится на некоторое время на краю обрыва, вселенная, скорее всего, никогда не получит достаточно тепла и вещества для формирования звёзд, галактик, планет и в конечном итоге — возникновения жизни.

С точки зрения наблюдателя, который видит сменяющую друг друга череду условий, заканчивающуюся на кладбище вселенных, вероятность возникновения жизни крайне мала. Но теперь давайте представим, что мы могли бы оказаться снаружи нашей Вселенной и увидеть



Мегаверсум в целом. При взгляде из Мегаверсума история — это *не последовательность* событий. История Мегаверсума — это огромное количество *параллельных* процессов, множество эволюционирующих параллельных карманных вселенных. По мере эволюции Мегаверсума карманные вселенные заполняют весь Ландшафт. Поэтому видится совершенно неизбежным, что какая-то, пусть и очень малая, часть этих вселенных окажется в процессе своего развития на обрыве, упав с которого окажется в долине, пригодной для жизни, наполнившись в процессе падения веществом и энергией. Кого заботят остальные миры, для которых всё закончится плохо? Жизнь возникнет там, где это возможно, и только там, где это возможно.

Ещё раз о полезности биологической аналогии. Представьте себе дерево жизни, каждая ветвь которой представляет отдельный вид. Если вы будете подниматься по этому дереву, начиная от ствола, и будете случайным образом сворачивать на каждой развилке, вы очень быстро доберётесь до конца последней ветки, символизирующего вымирание вида. Любой вид рано или поздно вымирает, но если скорость возникновения новых видов превышает скорость их исчезновения, дерево продолжает жить и разрастаться. Исследуя любой один конкретный путь развития конкретного вида от возникновения до вымирания, вы, скорее всего, придёте к выводу, что вероятность возникновения разумной жизни равна нулю. Но рассматривая дерево в целом как растущий и развивающийся организм, мы с уверенностью можем сказать, что рано или поздно оно породит ветвь разумного вида. Как мы видим, параллельное представление эволюции приводит к гораздо более оптимистичным выводам.

## Многомирие

Что было бы, если бы Германия победила во Второй мировой войне? Или как выглядела бы сегодня жизнь, если бы астероид, 65 миллионов лет назад убивший динозавров, пролетел мимо Земли? Идея параллельных миров, расходящихся разными путями в критических точках исторического процесса, — излюбленная тема писателей-фантастов. Однако в настоящей науке я всегда отвергал подобные идеи как легкомысленную

чушь. И вдруг, к своему удивлению, я обнаружил, что говорю и думаю о подобных вещах. Фактически вся моя книга как раз и посвящена параллельным вселенным: Мегаверсум представляет собой мир карманных вселенных, изолированных друг от друга, из-за того что они оказываются за пределами горизонтов друг друга.

Я далеко не первый физик, который всерьёз рассматривал возможность того, что реальность — что бы ни означало это слово — содержит помимо нашего собственного огромное количество альтернативных миров с историями, отличными от истории нашего мира. Этот вопрос является частью продолжающейся по сей день дискуссии об интерпретации квантовой механики. Где-то в середине 1950-х годов молодой аспирант Хью Эверетт III предложил радикально отличающуюся от принятой тогда интерпретацию квантовой механики, которую он назвал *многомировой интерпретацией*. Гипотеза Эверетта утверждает, что на каждом перекрёстке истории мир ветвится на множество параллельных вселенных, каждая из которых имеет свою альтернативную историю. Хотя это звучит как махровая спекуляция, некоторые из величайших физиков современности были доведены странностями квантовой механики до того, чтобы принять идеи Эверетта. Среди них Ричард Фейнман, Мюррей Гелл-Манн, Стивен Вайнберг, Джон Уилер и Стивен Хокинг. Многомировая интерпретация послужила источником вдохновения для антропного принципа, который впервые сформулировал в 1974 году Брэндон Картер.

На первый взгляд многомировая интерпретация Эверетта имеет мало общего с вечной инфляцией Мегаверсума. Однако мне думается, что это практически одно и то же. Я уже неоднократно подчёркивал, что квантовая механика не предсказывает поведение системы в будущем на основе её состояния в прошлом. Вместо этого она предсказывает вероятность реализации того или иного исхода эксперимента, или, правильнее, вероятность результата наблюдения. Эта вероятность описывается фундаментальным математическим объектом квантовой механики — *волновой функцией*.

Если вы немного знакомы с квантовой механикой и в курсе, что Шрёдингер открыл волновое уравнение, описывающее поведение электронов, то вы слышали и о волновой функции. Я хотел бы, чтобы вы забыли всё это. Волновая функция Шрёдингера представляет со-

бой очень частный случай гораздо более общей концепции, и именно на этой более общей идее я хочу сейчас заострить ваше внимание. В любой момент, например прямо сейчас, есть многое на свете, друг читатель, что можно наблюдать в подлунном мире. Я мог бы поднять взгляд на окно над моим рабочим столом и посмотреть, не взошла ли луна. Или я мог бы сидеть и планировать эксперимент с двумя щелями (см. главу 1), а затем наблюдать расположение пятен на экране. Ещё один эксперимент мог бы состоять в наблюдении за нейтроном, который был «приготовлен» в определённое время, скажем, десять минут назад. Как вы помните из главы 1, нейтроны, не связанные в ядре, неустойчивы. В среднем (но только в среднем) нейтрон распадается в течение двенадцати минут на протон, электрон и антинейтрино. В этом случае суть наблюдения могла бы состоять в том, чтобы определить, распался нейтрон по истечении десяти минут или по-прежнему пребывает в первоначальном виде. Каждый из этих экспериментов предполагает более одного возможного результата. В самом общем смысле волновая функция представляет собой список вероятностей для всех возможных результатов всех возможных наблюдений состояний рассматриваемой системы. Если быть более точным, то она представляет собой список квадратных корней всех этих вероятностей.

Распад нейтрона является хорошей иллюстрацией для начала разговора о волновой функции. Для упрощения рассуждений предположим, что эксперимент по наблюдению нейтрона может иметь только два исхода: нейтрон либо распался, либо нет. Список вероятностей в этом случае будет очень коротким — в нём будет только две записи для волновой функции. Если первоначально нейтрон находится в нераспавшемся состоянии, то список значений его волновой функции будет состоять из двух записей: 1 и 0. Другими словами, вероятность, что первоначально нейтрон находится в нераспавшемся состоянии, равна 1, а вероятность того, что он распался, равна 0. Но уже через короткое время появляется крохотная вероятность, что нейтрон распадётся. Теперь две записи значений волновой функции в нашем списке будут отличаться от 1 и 0. Первое значение будет чуть меньше 1, а второе — чуть больше 0. Чуть больше чем через десять минут эти вероятности сравняются, а ещё через десять минут они поменяются местами:

вероятность того, что нейтрон остался целым, будет стремиться к нулю, а вероятность того, что он распался на протон, электрон и антинейтрино, — к единице. Квантовая механика содержит ряд правил, позволяющих рассчитать эволюцию волновой функции со временем. В своей наиболее общей форме волновая функция описывает систему, включающую в себя всё: всю наблюдаемую Вселенную, включая наблюдателей, проводящих эксперименты. Так как в этой системе может быть более одного сгустка материи, который может быть назван наблюдателем, теория должна быть самосогласованной в отношении описания всех процессов наблюдений. Волновая функция содержит полное квантово-механическое описание системы, и, следовательно, нам необходимо доказать согласованность теории, например, для случая, когда два наблюдателя встречаются в одном месте, чтобы обсудить результаты своих наблюдений.

Рассмотрим наиболее известный из всех мысленных экспериментов — знаменитый (или я должен сказать «печально известный»?) эксперимент с котом Шрёдингера. Представьте себе, что в полдень, в 12:00, кот помещается в закрытый ящик вместе с нейтроном и пистолетом. Когда нейтрон распадается (случайно), образующийся при распаде электрон активирует цепь, которая вызывает пистолетный выстрел, убивающий кота.

Практикующий квантовый механик — назовём его Ш. — пытается проанализировать эксперимент, написав волновую функцию — список вероятностей для различных результатов. Ш. не может учесть всю Вселенную, поэтому он ограничивает описание системы только теми объектами, которые находятся внутри ящика. Моменту полудня соответствует только одна запись: «Кот жив, нейтрон цел, пистолет заряжен». После этого Ш. проделывает некие математические манипуляции, чтобы решить уравнение и узнать, что будет дальше. Но результат его вычислений не является точным предсказанием, будет кот жив или мёртв. Результатом будет новое значение волновой функции, которая теперь состоит из двух записей: «Кот жив, нейтрон цел, пистолет заряжен» и «Кот мёртв, нейтрон распался, пистолет выстрелил». Волновая функция расщепляет ход истории на две ветви: «живую» и «мёртвую», а её численные значения являются квадратными корнями из вероятностей реализации этих двух исходов.

Ш. может открыть ящик и проверить, жив кот или нет. Если кот жив, то Ш. может смело выбросить ветвь волновой функции, приводящую к смерти кота. Эта ветвь, если продолжить её дальше во времени, будет содержать всю информацию о мире, в котором кот был застрелен, но так как Ш. обнаружил кота живым, эта информация ему больше не нужна. Существует термин для процесса исчезновения побочных ветвей волновой функции при выполнении акта наблюдения. Его называют *редукцией волновой функции*. Это очень удобный трюк, позволяющий физику сосредоточиться только на тех вещах, которые впоследствии могут представлять интерес. К примеру, «живая» ветвь содержит информацию, которая может заинтересовать Ш. Если он проследит эту ветвь в будущее, он сможет определить вероятность того, что пистолет впоследствии случайно выстрелит и застрелит самого Ш. (что будет возмездием за издевательство над котом). Редукция волновой функции, происходящая при каждом акте наблюдения, является ключевым моментом знаменитой копенгагенской интерпретации квантовой механики, которую отстаивал Нильс Бор.

Но редукция волновой функции не является компонентом математического аппарата квантовой механики. Это некое дополнительное математическое правило, которое ввёл Бор для описания результата наблюдения. Это волюнтаристское правило стало головной болью для нескольких поколений физиков. По большей части проблема состоит в том, что Ш. ограничивает описываемую систему только теми объектами, которые находятся в ящике, но в конце эксперимента Ш. сам становится частью системы, производя акт наблюдения. Сегодня уже нет сомнений, что последовательное описание обязательно должно включать Ш. как часть системы. Вот как оно должно выглядеть.

Волновая функция теперь описывает всё, что находится в ящике, а также фрагмент физической материи, который мы называем Ш. Первоначальная волновая функция по-прежнему состоит только из одной записи, но теперь эта запись выглядит следующим образом: «Кот жив, пистолет заряжен, нейтрон цел, Ш. ничего не знает о здоровье кота». Спустя некоторое время Ш. открывает ящик. Теперь волновая функция состоит из двух записей: «Кот жив, пистолет заряжен, нейтрон цел, Ш. знает, что кот жив» и «Кот мёртв, пистолет выстрелил, нейтрон распался, Ш. знает, что кот мёртв». Как видите, нам удалось включить

Ш. в описание системы без привлечения идеи редукции волновой функции.

Но теперь предположим, что у нас появился ещё один наблюдатель — назовём его Б. Б. отсутствовал в комнате в тот момент, когда Ш. проводил своё живодёрский эксперимент. Когда Б. открывает дверь, чтобы посмотреть, что происходит в лаборатории, он видит один из двух исходов. Поскольку нет никакого смысла в отслеживании нереализованной ветви, получается, что появление Б. приводит к редукции волновой функции. Похоже, что нам не избежать этой лишней операции. Но давайте попробуем включить в волновую функцию и Б. Отправной точкой будет система, включающая всё, что находится в ящике, и два сгустка материи, называемые Ш. и Б. Начальное состояние системы теперь будет описываться так: «Кот жив, пистолет заряжен, нейтрон цел, Ш. ничего не знает о здоровье кота, и Б. ничего не знает о здоровье кота». Когда Ш. открывает ящик, волновая функция расщепляется на две ветви: «Кот жив, пистолет заряжен, нейтрон цел, Ш. знает, что кот жив, и Б. ничего не знает о здоровье кота» и «Кот мёртв, пистолет выстрелил, нейтрон распался, Ш. знает, что кот мёртв, и Б. ничего не знает о здоровье кота». Наконец, когда Б. входит в комнату, первая ветвь волновой функции принимает вид: «Кот жив, пистолет заряжен, нейтрон цел, Ш. знает, что кот жив, и Б. знает, что кот жив». Я оставляю читателю возможность самому сформулировать описание остальных ветвей. Главное, что мы сумели описать эксперимент без привлечения редукции волновой функции.

А теперь предположим, что есть ещё один наблюдатель, именуемый Э. Ничего страшного. Вы наверняка уже поняли, по какому шаблону следует действовать: единственный способ избежать редукции волновой функции — включить в квантовое описание всю наблюдаемую Вселенную, а также все ветви её волновой функции. Предлагаемая интерпретация является альтернативой прагматичному правилу Бора, требующему завершать описание любого эксперимента редукцией волновой функции.

Эвереттовский способ представления волновой функции описывает бесконечное ветвящееся дерево всевозможных исходов. Большинство физиков — последователей Бора — представляло себе ветви волновой функции как математическую фикцию, за исключением одной-един-

ственной ветви, которая остаётся после акта наблюдения. Редукция волновой функции является полезным инструментом для отсеечения ненужных ветвей, но многие физики считают это правило произвольным вмешательством внешнего наблюдателя — процедурой, не основывающейся на базовом математическом аппарате квантовой механики. Почему математика должна включать в описание все возможные ветви, если их единственная роль — быть отброшенными на последнем этапе?

По мнению сторонников многомировой интерпретации, все ветви волновой функции одинаково реальны. На каждой развилке мир ветвится на две или более альтернативные вселенные, которые продолжают вечно существовать бок о бок. В представлении Эверетта реальность постоянно ветвится, но с одной оговоркой: различные ветви никогда не взаимодействуют друг с другом после того, как они разошлись. На «живой» ветви дух мёртвого кота никогда не будет преследовать Ш. в ночных кошмарах. Правило Бора — это просто трюк, позволяющий отрезать лишние ветви, которые вполне реально существуют, несмотря на то что не оказывают в будущем никакого воздействия на наблюдателя.

Стоит отметить ещё один момент. С течением времени мы на определённом этапе истории получаем невероятно разветвлённую волновую функцию, и в её описании присутствует невообразимое количество копий каждого возможного варианта развития событий. Рассмотрим бедного Б., пока он ещё не вошёл в комнату. Волновая функция, разветвляющаяся в момент, когда Ш. открывает ящик, разделяет историю всех входящих в описание системы объектов, в том числе и Б., на две ветви, причём состояние Б. в каждой из этих ветвей одинаково. Количество ветвей, содержащих вас, читающих эту книгу, практически бесконечно. В этом контексте понятие вероятности имеет смысл только как относительная частота различных результатов. Один из результатов является более вероятным, чем другой, если он присутствует в большем количестве ветвей.

С точки зрения эксперимента различий между многомировой и копенгагенской интерпретациями нет. Никто не спорит с тем, что на практике копенгагенское правило редукции волновой функции даёт правильные вероятности экспериментальных результатов. Но эти две



интерпретации глубоко различаются в отношении философского смысла этих вероятностей. Копенгагенцы придерживаются консервативного взгляда, считая, что вероятность есть мера возможности получения определённого результата при проведении большого числа повторяющихся экспериментов. Представьте себе монету. Если монета «правильная», вероятность любого исхода (орёл или решка) равна одной второй. Это означает, что если подбросить монету достаточно большое количество раз, то примерно в половине случаев она упадёт решкой, а в половине — орлом. Чем больше количество подбрасываний, тем ближе полученный результат будет к идеальному соотношению 50 на 50. Подобные рассуждения применимы и при бросании игральной кости. Каждая из граней кости при достаточно большом числе бросаний будет выпадать (с точностью до погрешности) с частотой одна шестая. Обычно никто не применяет статистику к единственному броску монеты или игральной кости. Но многомировая интерпретация делает именно это. Она имеет дело с единичными событиями способом, комичность которого особенно хорошо видна на примере подбрасывания монеты. Идея, что при подбрасывании монеты мир расщепляется на два параллельных — мир орла и мир решки, — не кажется слишком перспективной.

Почему же физиков настолько беспокоят вероятности, которыми оперирует квантовая механика, что они вынуждены обращаться к таким странным идеям, как многомировая интерпретация? Почему Эйнштейн так настойчиво утверждал, что «Бог не играет в кости»? Чтобы понять то недоумение, которое вызывает квантовая механика, полезно спросить себя: «Почему в ньютоновском мире абсолютной определённости тем не менее возникает необходимость обращаться к статистическим методам?» Ответ прост: вероятности возникают в ньютоновской физике по той простой причине, что мы почти никогда не знаем точных начальных условий эксперимента. Если бы в эксперименте с подбрасыванием монеты мы имели точную информацию о строении и движении руки экспериментатора, информацию обо всех воздушных потоках в комнате и информацию обо всех других факторах, влияющих на исход эксперимента, никакие вероятности нам бы не потребовались. Каждый бросок приводил бы к совершенно определённому результату. Вероятность — это удобный трюк, позволяющий компенсировать нашу не-

Вероятность не играет фундаментальной роли в законах Ньютона.

Но в квантовой механике ситуация принципиально иная. Из-за принципа неопределённости не существует способа точно предсказать результат эксперимента — принципиально не существует. Основные уравнения квантовой теории определяют эволюцию волновой функции, и ничего более. Вероятность лежит в самом фундаменте квантовой теории. Это *не* удобный трюк, используемый для компенсации недостатка информации. Кроме того, уравнения, которые определяют эволюцию волновой функции, не предусматривают внезапного отсечения ненужных ветвей. Редукция волновой функции — это лишь удобный трюк.

Эта проблема становится особенно острой в космологическом контексте. Обычные эксперименты типа эксперимента с двумя щелями, который я описал в главе 1, можно повторять снова и снова, как и подбрасывание монеты. Каждый фотон, который проходит через экспериментальную установку, можно рассматривать как отдельный эксперимент. Проблема состоит не в необходимости накопления огромного количества статистических данных. Она состоит в том, что мы не можем набрать нужную статистику в космическом масштабе. Вряд ли мы сумеем повторить много раз Большой взрыв, чтобы собрать статистику о результатах. По этой причине многие космологи склоняются к философии многомировой интерпретации.

Пионерская идея Картера по объединению антропного принципа с многомировой интерпретацией состояла в следующем: предположим, что волновая функция ветвится не только при описании таких простых вещей, как местоположение электрона, распад нейтрона или жизнь и смерть кота, но в каждой ветви работают различные Законы Физики. Если предположить, что все ветви одинаково реальны, то получится, что существует множество миров с различными вакуумами. На современном языке мы могли бы сказать, что каждой точке на Ландшафте соответствует своя ветвь. Всё остальное ничем не отличается от того, что я уже рассказывал ранее в этой книге, за исключением того, что вместо различных областей Мегаверсума мы будем говорить о различных вариантах реальности. Чтобы пояснить основную мысль, я приведу цитату из главы 1, а затем изменю в ней несколько слов. Исходная

цитата звучит так: «Где-то в Мегаверсуме эта константа имеет такое значение, а где-то — сякое. Мы живём в одном маленьком кармане, в котором значения констант таковы, что позволяют существовать жизни нашего типа». А вот изменённая цитата: «На какой-то из ветвей волновой функции эта константа имеет такое значение, а на какой-то — сякое. Мы живём на одной отдельной ветви, где значения констант таковы, что позволяют существовать жизни нашего типа». Хотя две цитаты кажутся похожими, они несут в себе две совершенно различные идеи существования альтернативных вселенных. Похоже, что у нас есть ещё один способ достижения разнообразия вселенных, которое могло бы придать смысл антропной аргументации. Я мог бы добавить, что разные сторонники антропного принципа имеют разные мнения о том, какая из версий теории параллельных вселенных правильна. Хотите знать моё мнение? Я считаю, что оба варианта являются взаимодополняющими описаниями одной и той же сущности.

Рассмотрим ситуацию более подробно. Ранее в этой главе я описал два представления вечной инфляции, параллельное и последовательное. Параллельное представление признаёт существование гигантского Мегаверсума, наполненного неисчислимыми карманными вселенными, которые, будучи отделены друг от друга горизонтами, не взаимодействуют друг с другом. Это представление созвучно многомировой интерпретации Эверетта. А как насчёт последовательного представления?

Рассмотрим один пример. Представим сформировавшийся пузырь пространства, свойства которого определяются его положением в одной из долин Ландшафта. Для удобства дадим названия всем соседним долинам. Пусть долина, в которой находится пузырь, называется Центральной долиной. К востоку и западу от неё лежат Восточная и Западная долины, каждая — несколько ниже Центральной. С Западной долины можно добраться до ещё двух близлежащих долин, одну из которых мы назовём Шангри Ла, а другую — Долиной смерти. Долина смерти на самом деле не долина, а довольно плоское плато, расположенное на нулевой высоте. Восточная долина также имеет несколько соседей, до которых легко добраться, но мы не будем озадачиваться их названиями.

Представьте, что вы находитесь в Центральной долине, в то время как ваша карманная вселенная находится в стадии инфляционного раз-

дувания. Из-за того, что поблизости находятся долины, лежащие на более низком уровне, вакуум вашей долины является метастабильным: в любой момент в нём может возникнуть пузырь, который поглотит вас. Итак, вы осматриваетесь и изучаете свойства окружающего вас пространства. Вы можете обнаружить, что всё ещё находитесь в Центральной долине, или понять, что уже совершили переход в Восточную или Западную долину. Долина, которую вы в данный момент населяете, определяется случайным образом согласно законам квантовой механики, во многом таким же образом, как квантовая механика определяет судьбу кота Шрёдингера.

Предположим теперь, что вы обнаружили себя в Западной долине. С тем же успехом вы могли бы отбросить ветвь вашей волновой функции, которая соответствует Восточной долине. Она не имеет никакого значения для вашего будущего. Спустя время, если вам повезёт, вас может поглотить пузырь, свойства пространства которого определяются благоприятной для жизни долиной Шангри Ла. Но вы с таким же успехом можете оказаться и в Долине смерти. На каждом перекрёстке Бор и его копенгагенская банда подскажут вам, как рассчитать вероятность для каждого исхода. Затем они поручат вам произвести редукцию волновой функции, для того чтобы избавиться от сверхнормативного багажа тех ветвей, которые не соответствуют исходу вашего эксперимента. Вот это и есть последовательное представление.

Моё мнение вам, должно быть, уже очевидно. Последовательное представление — когда вы постоянно остаётесь в пределах горизонта вашей карманной вселенной, наблюдая события и избавляясь от ненужного багажа, — это боровская интерпретации квантовой механики. Параллельное представление Мегаверсума, наполненного множеством невзаимодействующих карманных вселенных, соответствует интерпретации Эверетта. Я нахожу в этом соответствии приятную логичность. Возможно, в конце концов мы обнаружим, что квантовая механика имеет смысл только в контексте ветвящегося Мегаверсума и что Мегаверсум имеет смысл только как ветвящаяся реальность эвереттовской интерпретации.

Независимо от того, говорим мы на языке Мегаверсума или многомировой интерпретации, параллельное представление совместно с гигантским ландшафтом теории струндаёт нам два элемента, которые

способны превратить антропный принцип из глупой тавтологии в мощный инструмент познания. Но параллельное представление основывается на предположении о реальности существования областей пространства и времени, которые всегда находятся вне досягаемости для любых мыслимых способов наблюдений. У некоторых людей это вызывает чувство тревоги. Меня это тоже беспокоит. Если безбрежное море карманных вселенных действительно находится за недостижимыми горизонтами, то параллельное представление и вправду видится больше метафизикой, чем наукой. Следующая глава будет целиком посвящена горизонтам и вопросу, действительно ли они являются непреодолимыми барьерами.



## Глава 12

# БИТВА ПРИ ЧЁРНОЙ ДЫРЕ

В иные дни я успевала поверить в десяток невозможностей до завтрака!

— *Льюис Кэрролл (пер. Н. М. Демуровой)*

«Вы можете только беспомощно смотреть, как тепло охватывает вас. Вскоре драгоценные жидкости вашего организма начнут кипеть, а затем испарятся. Станет настолько горячо, что атомы вашего тела начнут отрываться друг от друга. Но, как предсказано, в конечном итоге вы вернётесь к нам в виде чистого света и сияния.

Но не бойтесь. Вы перейдёте на другую сторону без боли и страданий. В своём нынешнем облике вы будете потеряны для нас навсегда, мы больше никогда не сможем общаться с вами, по крайней мере до тех пор, пока наши пути вновь не пересекутся. Но, друг мой, из вашего нынешнего места обитания вы всегда будете видеть нас и знать, как мы живём без вас. Удачи».

История мученичества и воскресения? Человек в балахоне, утешающий мученика перед аутодафе? Пересечение грани, отделяющей жизнь от смерти? Ничего подобного. Это выдумка, но имеющая право на существование, о межзвёздном путешественнике, который решится нырнуть в чёрную дыру и скрыться от нас за её горизонтом. И действие происходит не в церковном приделе, а в звездолёте, несущем в своём чреве физика-теоретика.

Если привязываться к тематике этой конкретной книги, то речь может идти о пересечении космического горизонта вечно раздувающейся Вселенной. Но мы вернёмся к космическим горизонтам несколько позже.

Спиритуалисты считают, что общение с умершими возможно: всё, что для этого требуется, — это правильный медиум, адепт тёмных наук. Вы можете догадаться, что я думаю по этому поводу, но, по иронии судьбы, я был одним из главных воинов, защищавших в Битве при чёрной дыре тезис о возможности общения с нежитью, обитающей по ту сторону горизонта событий. Война длилась четверть века, но теперь все кончено.

Протагонистами этой драмы выступали Стивен Хокинг со своим главным штабом из генерал-релятивистов<sup>1</sup>, с одной стороны, и мы с Герардом 'т Хоофтом — с другой. Так продолжалось первые пятнадцать лет. Позже к нам подошло подкрепление в составе группы струнных теоретиков.

Герард 'т Хоофт — голландец. Если считать по общему вкладу в науку, то голландцы, безусловно, являются величайшими физиками в мире. Христиан Гюйгенс, Хендрик Антон Лоренц, Виллем де Ситтер, Хейке Камерлинг-Оннес, Джордж Уленбек, Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс, Герхард Казимир Хендрик, Мартинус Велтман, Герард 'т Хоофт — вот лишь несколько величайших имён. Лоренц и 'т Хоофт, возможно, величайшие физики в истории. Герард 'т Хоофт больше, чем кто-либо другой, олицетворяет дух физики Лоренца, Эйнштейна и Бора.

Несмотря на то что 'т Хоофт младше меня на шесть лет, я всегда испытывал перед ним благоговейный трепет.

Герард — не только герой нашей войны, но и мой большой друг. Хотя он и является гораздо более сильным физиком, чем я, наши точки зрения на науку вообще и физику в частности были всегда очень близки. На протяжении многих лет мы часто обнаруживали, что решаем одни и те же головоломки, беспокоимся об одних и тех же парадоксах, и даже наши догадки о способе решения той или иной проблемы совпадали. Мне кажется, что и я, и Герард — весьма консервативные

<sup>1</sup> Генерал-релятивист — непереводаемая игра слов. Саскинц так называет специалистов по общей теории относительности (*general relativity*). — *Примеч. пер.*



физики, которые согласятся на радикальное решение, только если все прочие пути окажутся тупиковыми. Ну и наконец, он бесстрашен!

Если Герард — консерватор, то Стивен Хокинг суший Ивел Книвел<sup>1</sup> от физики. Храбрый до безрассудства, Стивен представлял немалую угрозу для обитателей Кембриджа, рассекая на своей инвалидной коляске по университетским дорожкам со скоростью гоночного болида. И его стиль в физике во многих отношениях похож на его манеру вождения инвалидной коляски — отчаянные, леденящие дух авантюры. Но, как и Ивел Книвел, Стивен порой попадал в катастрофы.

Недавно Стивену исполнилось шестьдесят. Празднование его дня рождения меньше всего было похоже на день рождения 60-летнего физика. Семинары и лекции по физике — понятно: куда же без них? Но прибавьте к этому музыку, танцы, знаменитую рок-звезду из U2, двойника Мэрилин Монро и хор физиков. Это было колоссальное событие для СМИ.

Чтобы дать вам представление об отношениях, которые много лет связывали меня с ним, я процитирую кусочек из поздравительной лекции, которую прочёл на этом празднике:

«Стивен, как все мы знаем, — самый упрямый и тем доводящий до бешенства человек во Вселенной. Мои с ним научные отношения, я полагаю, можно назвать противоборством. Мы глубоко расходимся по вопросам, касающимся чёрных дыр, информации и тому подобных вещей. Временами он заставлял меня рвать волосы от досады, — и вы теперь ясно видите результат. Уверяю вас — когда мы начали спорить более двух десятилетий назад, вся моя голова была покрыта волосами».

В этот момент я увидел в дальней части зала Стивена с его озорной улыбкой и продолжил:

«Могу также сказать, что из всех физиков, которых я знаю, он оказал самое большое влияние на меня и мой образ мышления. Почти все, о чём я думал начиная с 1983 года, в том или ином смысле отвечало на его глубочайший вопрос о судьбе информации, падающей в чёрную дыру. Хотя я твёрдо убеждён, что его ответ был ошибочным, сам вопрос Стивена вкупе с требованием убедительного ответа вы-

<sup>1</sup> Роберт Крейг «Ивел» Книвел — американский трюкач, получивший мировую известность благодаря своим рискованным трюкам на мотоцикле. — *Примеч. пер.*

нудил нас переосмыслить основания физики. Результатом стала совершенно новая парадигма, которая сегодня обретает форму. Я глубоко польщён возможностью отметить здесь монументальный вклад Стивена и особенно его блистательное упрямство».

Это было три года назад, но Стивен Хокинг до сих пор уверен, что он был прав, а мы с 'т Хоофтом ошибались.

В первые дни войны было множество перебежчиков, пытавшихся оказаться на стороне победителя, какой бы ни была его позиция. Но Стивен, что делает ему честь, не складывал своё оружие до тех пор, пока дальнейшее сопротивление было уже не просто бесполезно, а невозможно. После чего он изящно и безоговорочно капитулировал. И справедливости ради надо заметить, что если бы Хокинг воевал с меньшим фанатизмом, мы, наверное, знали бы о чёрных дырах гораздо меньше, чем знаем сегодня.

Точка зрения Хокинга была простой и прямолинейной: горизонт чёрной дыры — это «точка невозврата». Всё, что пересекает горизонт, оказывается в ловушке. Для того чтобы вернуться из-под горизонта, необходимо превысить скорость света, а это, согласно Эйнштейну, совершенно невозможно. Люди, атомы, фотоны, любые формы сигналов, способных нести сообщения, не способны преодолеть скорость света. Ни один объект или сигнал не способен выбраться из-под горизонта во внешний мир. Горизонт чёрной дыры — это идеальная тюремная стена. Наблюдатель, ожидающий весточки из этой тюрьмы, может прождать вечность, но не дожждётся ни единого бита информации. По крайней мере, так считал Хокинг.

Чтобы получить представление о физике чёрной дыры, не вдаваясь в сложные математические подробности общей теории относительности, нам нужна удачная аналогия. К счастью, она у нас есть. Я не помню, кто впервые её использовал, но я узнал о ней от канадского физика Билла Унру. Вернёмся к бесконечному мелкому озеру, которое мы уже использовали в предыдущей главе для иллюстрации раздувания Вселенной. Но сейчас нам не нужны трубы для подачи воды, расположенные под всем дном. Вместо этого мы соорудим сток в центре. Отверстие в дне озера будет позволять воде вытекать, возможно, падая с большой высоты на острые смертельные скалы под сливом. Добавим также несколько лодок с наблюдателями. Наблюдатели должны соблю-

дать два правила. Во-первых, они могут общаться только с помощью поверхностных волн, то есть ряби на поверхности озера. Например, они могут шевелить пальцами в воде, чтобы производить волны. Второе правило — это ограничение скорости передвижения относительно воды. Лодке ни при каких обстоятельствах не разрешается двигаться быстрее, чем поверхностные волны.

Начнём с наблюдателей, расположенных вдали от центра, где движение воды незаметно. Это не означает, что вода там вообще не движется: она очень медленно перемещается к центру озера, но наблюдатели этого практически не замечают. Однако по мере приближения к сливному отверстию поток воды ускоряется, и в непосредственной окрестности от слива скорость движения воды становится больше скорости поверхностных волн. Волны, исходящие из этой области, будут засосаны потоком воды в слив, даже если они распространяются в противоположном от слива направлении. Очевидно, что любая лодка, неосторожно оказавшаяся в этом месте, обречена быть засосанной в сливное отверстие и разбитой о скалы под ним. При этом существует некая граница, где скорость движения воды в точности соответствует скорости поверхностных волн. Эта граница и есть так называемая *точка невозврата* (слово «точка» здесь, разумеется, означает философскую метафору, а не геометрический объект). После того как вы пересекли границу, обратного пути для вас больше не существует. Нет даже возможности передать сообщение тем, кто остался снаружи. Именно такую точку невозврата представляет собой горизонт чёрной дыры, за исключением того, что в случае чёрной дыры уже не вода, а само пространство-время низвергается внутрь неё со скоростью света. Никакой сигнал не может выйти из-под горизонта, не превысив скорость света, которую Эйнштейн постулировал как максимально возможную. Теперь вам должно быть понятно, почему Стивен был так уверен в том, что информация, упавшая за горизонт чёрной дыры, безвозвратно потеряна для всех, кто остался снаружи.

Но Стивен сам создал оружие, которое повернулось против него. Опираясь на большую работу Якова Бекенштейна, Стивен в начале 1970-х показал, что чёрные дыры имеют ненулевую температуру. Они не являются абсолютно холодными, как считали физики ранее. Чем больше чёрная дыра, тем ниже её температура, но как бы ни была велика

чёрная дыра, её температура никогда не будет равна абсолютному нулю. К примеру, чёрная дыра, образовавшаяся в результате коллапса звезды, согласно Хокингу, будет иметь температуру всего лишь на одну десятимиллионную долю градуса выше абсолютного нуля. Но не ноль!

Хокинг рассудил, что чёрная дыра, как и любой другой объект с ненулевой температурой, будет излучать энергию. Раскалённая кочерга, вынутая из камина, излучает свет оранжевого или красного цвета. Тёплые предметы излучают в инфракрасном диапазоне, не видимом человеческому глазу. Независимо от того, насколько холоден предмет, если его температура не равна абсолютному нулю, он будет излучать энергию в виде электромагнитных волн. В случае чёрной дыры это излучение называется *излучением Хокинга*. Это было одним из величайших открытий Хокинга.

Далее: всё, что излучает, теряет энергию. Но масса и энергия — это две стороны одной и той же сущности, если верить Эйнштейну. Выходит, что с течением времени чёрные дыры теряют массу, и это происходит до тех пор, пока они полностью не испарятся, оставив после себя только фотоны хокинговского излучения.

Любопытно, что масса любого объекта, который падает в чёрную дыру, неизбежно излучается обратно в виде излучения Хокинга. Энергия смелого межзвёздного путешественника, который отважно пересечёт горизонт, в итоге возвращается в виде «чистого света и сияния».

Но, по утверждению Хокинга, из-за того что скорость распространения сигнала не может превышать скорость света, никакая информация из чрева чёрной дыры не может выйти из-под горизонта вместе с излучением Хокинга. Эта информация оказывается в ловушке — когда чёрная дыра испаряется, она исчезает.

Впервые я услышал об этом в 1980 году, когда Стивен, Герард и я участвовали в работе небольшой конференции в Сан-Франциско. Мы с Герардом были глубоко обеспокоены выводами Стивена и считали, что он не прав. Но ни один из нас не мог понять, что именно неправильно в его рассуждениях. Меня не покидало ощущение глубокого дискомфорта. Перед нами стоял парадокс очень серьёзного масштаба: разрешение этого парадокса в конечном итоге могло открыть перспективы для более глубокого понимания неуловимой связи между гравитацией и квантовой механикой.

Проблема состояла в том, что вывод Хокинга нарушал один из краеугольных физических принципов. Хокинг, безусловно, понимал это. Именно поэтому он нашёл проблему потери информации при испарении чёрной дыры настолько захватывающей. Но мы с 'т Хоофтом чувствовали, что принцип сохранения информации слишком глубоко встроен в логические основы физики, чтобы отменить его, даже при наличии такого странного объекта, как чёрная дыра. Если мы правы, то должен существовать какой-то механизм, который позволяет биту информации, провалившемуся под горизонт чёрной дыры, вернуться обратно с излучением Хокинга, открывая тем самым для узников, заключённых в чреве чёрной дыры, возможность подать весточку наружу.

Никто, конечно, не отстаивал идею, что информация возвращается из чёрной дыры в легко воспринимаемой форме. Она выходит в таком виде, что её практически невозможно расшифровать. Но дискуссия шла не о практических аспектах. Речь была о соблюдении законов природы и принципов физики.

Что именно представляет собой информация, особенно если она зашифрована до неузнаваемости? Чтобы понять это, обратимся к аналогии с тюрьмой. Допустим, главарь мафии, сидящий в тюрьме, хочет отправить сообщение своему человеку на свободе. Сначала он записывает сообщение: «Передайте братьям Пиранья, чтобы они поставили десять тысяч на Малыша». Чтобы затруднить работу цензору, он дописывает в конец ещё ряд поддельных сообщений, например, несколько страниц текста из энциклопедии «Британника». Затем главарь записывает сообщение на наборе карт, по одной букве на каждую карту. Если перебирать карты в правильном порядке, то можно прочесть и содержательную часть сообщения в начале, и текст из «Британники» в конце. После этого главарь шифрует сообщение. У него есть для этого специальный алгоритм. Он начинает тасовать колоду карт, но не случайным образом, а согласно определённому правилу. После этого он ещё раз тасует колоду, руководствуясь этим же правилом. Он повторяет эту процедуру снова и снова десять миллионов раз. Сообщение затем передаётся сообщнику на свободе.

Отдельные карты являются аналогами отдельных фотонов излучения Хокинга, испускаемых чёрной дырой.

, получивший сообщение? Если он не знает правил перетасовки карт, то не имеет на руках ничего, кроме бессмысленной случайной последовательности букв, которая не несёт никакой информации. Но тем не менее информация в этом наборе карт есть. Применяв алгоритм перетасовки в обратном порядке десять миллионов раз, сообщник может получить их исходную последовательность, и после этого буквы, написанные на картах, сложатся в осмысленный текст. Эта информация содержалась в колоде, даже будучи зашифрованной. Если бы сообщник не знал правил перетасовки, информация всё равно присутствовала бы в колоде.

Рассмотрим другую ситуацию. Предположим, тюремный цензор, просматривая передаваемую на волю колоду, уронил её на пол, и карты рассыпались в произвольном порядке. После чего он собрал карты и сложил колоду случайным образом. И так — десять миллионов раз... Теперь, даже если сообщник на свободе и знает алгоритм перетасовки, он не сможет восстановить исходную последовательность. Информация в такой колоде на этот раз действительно потеряна. Случайная перетасовка не только шифрует сообщение, но и полностью уничтожает содержащуюся в нём информацию.

Суть спора между Хокингом, 'т Хоофтом и мной состояла не в обсуждении практических методов восстановления сообщений, получаемых из-под горизонта чёрной дыры. Наш спор касался принципиальной возможности существования таких методов. Мы с Герардом утверждали, что природа шифрует информацию, но никогда не уничтожает её. Стивен же придерживался точки зрения, что чёрные дыры вносят принципиально неустранимый элемент случайности в любой процесс, уничтожая любую информацию, прежде чем она покинет чёрную дыру в виде хокинговского излучения. Ещё раз обращаю ваше внимание, что суть вопроса состояла не в технической, а в принципиальной, фундаментальной возможности или невозможности восстановить информацию.

Внимательный читатель может задать несколько напрашивающихся вопросов. Разве не вносит квантовая механика элемент случайности в законы природы? Разве не должна уничтожать информацию квантовая дрожь? Это не очень просто объяснить, но ответ на второй вопрос: «Нет». Квантовая информация не настолько детализирована, как

классическая последовательность символов, и случайность в квантовой механике — очень специфического рода. Хокинг же утверждал, что помимо обычной неопределённости, допускаемой стандартными законами квантовой механики, в недрах чёрной дыры возникает совершенно новый, не имеющий аналогов в других областях физики, вид неопределённости.

Давайте разовьём аналогию с тюрьмой. Представьте себе, что сообщник отправил в тюрьму сообщение с некоторой уникальной информацией. В действительности мы можем даже представить себе, что в тюрьму поступает постоянный поток сообщений. Но тюрьма не резиновая. Он не может вместить в себя весь бумажный поток, поступающий в неё неопределённо долго. В какой-то момент охранникам придётся сложить всю эту макулатуру в мусорный бак и вывезти за пределы тюрьмы. По словам Хокинга, в тюрьму поступают осмысленные сообщения, из тюрьмы выходят мусорные баки, но в самой тюрьме информация, содержащаяся во входящих сообщениях, уничтожается этим новым видом неопределённости. Но мы с 'т Хоофтом сказали: «Нет! Сообщения, находящиеся в мусорном баке, по-прежнему содержат информацию. Она неуничтожима». Мы утверждали, что квантовые биты<sup>1</sup>, которые попадают в чёрную дыру, всегда можно восстановить, если только вы знаете алгоритм восстановления.

Однако позиция, которую отстаивали мы с 'т Хоофтом, приводит нас к ещё одной проблеме. Мы настаивали на том, что информация способна возвращаться из-под горизонта, но как это может происходить, если для этого требуется превысить скорость света?

Какой механизм может это обеспечить? Напрашивающийся ответ: этого не может быть никогда.

Давайте отправим в чёрную дыру сообщение с нарочным, в качестве которого завербуем межзвёздного путешественника. Согласно законам общей теории относительности, сообщение вместе с путешественником должно навсегда исчезнуть под горизонтом. С другой стороны, чтобы спасти основные принципы квантовой механики, мы с 'т Хоофтом утверждали, что биты информации этого сообщения будут пере-

<sup>1</sup> Бит — это технический термин, обозначающий единицу информации. Грубо говоря, один бит информации содержит ответ на вопрос, предполагающий только два варианта ответа: да или нет.



Это как если бы сообщение было в последний момент вырвано из рук курьера в воротах тюрьмы и переложено в вывозимый оттуда мусорный бак непосредственно перед пересечением курьером точки невозврата.

Этот конфликт принципов создал весьма серьёзную дилемму. С одной стороны, общая теория относительности говорит, что биты, упавшие под горизонт, должны продолжить свой путь в недра чёрной дыры. С другой стороны, правила квантовой механики не допускают потерю информации для внешнего мира. Была, правда, одна возможность разрешить эту дилемму. Вернёмся снова к аналогии с тюрьмой. Предположим, что перед тюремными воротами сидит охранник с ксерокопировальным аппаратом, который ксерит каждое входящее сообщение. Одну копию он пропускает в тюрьму, а вторую шифрует и отправляет обратно. Казалось, такое объяснение должно было удовлетворить всех. Сидящие в тюрьме будут получать входящие сообщения в незашифрованном виде, а их подельники на свободе убедятся в том, что отправляемая ими в тюрьму информация не теряется.

## Все права

Тут-то и начинается самое интересное. Существует фундаментальный принцип квантовой механики, который гласит, что квантовая ксерокопировальная машина невозможна. Квантовая информация не может быть скопирована абсолютно точно. Независимо от того, насколько хорошо машина копирует одни виды информации, она всегда будет плохо копировать другие. Я называю это *принципом квантовой нексерокопируемости*. Специалисты по квантовой информации называют его *теоремой о запрете клонирования*. Эта теорема говорит о невозможности создания идеальной копии произвольного неизвестного квантового состояния.

Чтобы понять принцип квантовой нексерокопируемости, рассмотрим отдельный электрон. Принцип неопределённости Гейзенберга говорит, что невозможно одновременно точно знать положение и скорость электрона. Теперь предположим, что некий квантовый ксерокс способен абсолютно точно скопировать состояние электрона. После этого мы

смогли бы абсолютно точно измерить положение электрона в одной копии состояния (пренебрегая его скоростью) и абсолютно точно измерить скорость электрона во второй копии, получив таким образом знание, запрещённое принципом неопределённости.

Итак, перед нами новая дилемма: общая теория относительности говорит нам, что информация должна падать за горизонт к центру чёрной дыры, а квантовая механика требует, чтобы та же информация оставалась снаружи чёрной дыры. При этом теорема о запрете клонирования утверждает, что возможна только одна копия каждого бита. Это был тупик, в который мы Хокингом и 'т Хоофтом загнали себя. В начале 1990-х ситуация стала совершенно непонятной: кто же прав? Наблюдатель снаружи, ожидающий соблюдения принципов квантовой механики, для которого биты информации должны задерживаться чуть выше горизонта, шифроваться и возвращаться обратно в виде хокинговского излучения? Или наблюдатель, который падает на чёрную дыру через горизонт, справедливо ожидающий, что находящаяся у него в кармане депеша будет в целостности и сохранности доставлена им прямо в центр чёрной дыры?

Разрешение парадокса в конечном итоге потребовало введения двух новых физических принципов физики, которые мы с 'т Хоофтом озвучили в начале 1990-х годов. Оба эти принципа очень странные, гораздо более странные, чем идея Хокинга о том, что информация может быть безвозвратно потеряна, настолько странные, что никто, кроме нас с 'т Хоофтом, сначала в них не поверил. Но как сказал однажды Шерлок Холмс доктору Ватсону: «Отбросьте всё невозможное — то, что останется, и будет ответом, каким бы невероятным он ни оказался».



## Дополнительность чёрных дыр

Нильс Бор был самым философствующим из всех отцов современной физики. Философская революция, которая сопровождала создание квантовой механики, заставила Бора сформулировать его знаменитый *принцип дополнительности*. Дополнительность квантовой механики стала манифестом для многих её приложений, но любимым примером Бора был корпускулярно-волновой дуализм, возникший в физике после того, как Эйнштейн ввёл понятие фотона. Свет — это частицы или волны? Эти два представления выглядят настолько различными, что кажутся несовместимыми.

И тем не менее свет — это и волны, и частицы. Или более точно: в некоторых экспериментах свет ведёт себя как поток частиц. Очень слабый луч света, падающий на флюоресцирующий экран, оставляет на нём крошечные точечные пятнышки — доказательства дискретной природы света, состоящего из неделимых фотонов. С другой стороны, если этих точек достаточно много, они образуют на экране интерференционную картину — явление, которое имеет смысл только для волн. Всё зависит от того, как вы регистрируете свет и что хотите измерить в ходе эксперимента.

Оба эти описания являются *дополнительными*, а не противоречивыми.

Ещё одним примером дополнительности является принцип неопределённости Гейзенберга. В классической физике описание состояния частицы предполагает точное задание её положения в пространстве и импульса. Но в квантовой механике вы можете точно задать либо положение частицы, либо её импульс, и никогда — то и другое одновременно. Утверждение «частица имеет точное положение и импульс» следует заменить утверждением «частица имеет точное положение *или* точный импульс». Соответственно свет — это частицы *или* волны. Использование того или другого описания зависит от цели эксперимента.

Соединение квантовой механики с общей теорией относительности приводит к новому виду дополнительности — *дополнительности чёрных дыр*. Не существует однозначного ответа на вопрос: «Кто прав: на-

блюдатель, который остаётся снаружи горизонта чёрной дыры и регистрирует всю информацию, которая поступает к нему с поверхности, лежащей чуть выше горизонта, или наблюдатель, который везёт с собой сообщение, направляясь к центру чёрной дыры?» Каждый прав в своём собственном контексте: их свидетельства являются взаимодополняющими описаниями двух различных экспериментов. С одной стороны, экспериментатор, остающийся снаружи чёрной дыры, может бросать на неё предметы и регистрировать фотоны, приходящие с поверхности, расположенной чуть выше горизонта, наблюдать воздействие гравитационного поля чёрной дыры на траектории частиц, пролетающих вблизи горизонта, и т. п. С другой стороны, второй экспериментатор, готовящий эксперимент в своей лаборатории, может затем упасть вместе с лабораторией в чёрную дыру, пересечь горизонт и продолжить свои эксперименты на пути к её центру.

*Дополнительные* описания этих двух экспериментов различаются настолько радикально, что вызывают сомнения в справедливости постулированного нами принципа. Внешний наблюдатель видит<sup>1</sup> вещество, падающее на горизонт, замедляющееся и замирающее чуть выше него. Вблизи горизонта вещество распадается на отдельные частицы и, наконец, возвращается обратно в виде хоккингского излучения. Фактически внешний наблюдатель видит, как его отчаянный коллега испаряется и возвращается обратно в виде света и сияния.

Но опыт внешнего наблюдателя не имеет ничего общего с опытом наблюдателя свободно падающего. Свободно падающий наблюдатель благополучно пересекает горизонт, даже не замечая этого. Ни удара, ни высокой температуры, никакого иного свидетельства, что он прошёл «точку невозврата». Если чёрная дыра является достаточно большой, скажем, радиусом в несколько миллионов световых лет, он будет падать в неё миллионы лет, не ощущая никакого дискомфорта. По крайней

---

<sup>1</sup> Я использую слово «видеть» в физическом смысле. Это значит: реконструировать события из набора экспериментальных данных, в данном случае — из хоккингского излучения. Такая реконструкция невероятно сложна, но не невозможна в принципе. В конце концов, мы же способны реконструировать реальный мир на основе отражённого от окружающих нас предметов света, падающего в наши глаза.

мере, пока он не достигнет центра чёрной дыры, где приливные силы, являющиеся следствием неоднородности гравитационного поля, станут настолько сильными, что... нет, лучше даже не думать о том, что с ним произойдёт.

Два столь разных описания создают впечатление неразрешимого противоречия. Но как мы узнали от Бора, Гейзенберга и их последователей, единственный вид противоречий, который следует принимать во внимание, это когда два различных описания ведут к предсказанию различных результатов одного и того же эксперимента. Если же речь идёт о двух принципиально несовместимых экспериментах, то нет и никакого повода беспокоиться о противоречивости описаний. Свободно падающий в чёрную дыру наблюдатель никогда не сможет обменяться опытом с оставшимся снаружи: после благополучного пересечения горизонта он находится вне контакта со всеми наблюдателями, которые остались по ту сторону. Поэтому дополнительность чёрных дыр — совершенно законная физическая вещь, какой бы странной она ни казалась.

Я упомянул о квантово-механической революции в физике. Другой крупной революцией начала XX века стала теория относительности Эйнштейна. Некоторые явления зависят от характера движения наблюдателя. Например, мы не можем с абсолютностью утверждать, что два события, разделённые пространственным промежутком, произошли одновременно. Их последовательность может быть разной для разных наблюдателей, движущихся друг относительно друга. Скажем, один наблюдатель увидит две последовательные вспышки света, в то время как другой заявит, что они произошли одновременно.

Принцип дополнительности чёрных дыр является новым и более сильным принципом относительности. Ещё раз: описание событий зависит от состояния движения наблюдателя. Оставаясь в покое снаружи чёрной дыры, вы видите одну картину. Свободно падая внутрь чёрной дыры, вы видите те же события в совершенно другом представлении.

Дополнительность и относительность — плоды величайших умов XX века — объединены теперь в радикально новое видение пространства, времени и информации.

## Голографический принцип

Возможно, ошибка, которую допустил Хокинг, состоит в том, что он представлял, что бит информации имеет определённую пространственную локализацию. Простым примером квантового бита является поляризация фотона. Каждый фотон обладает спином, проекция которого на направление движения фотона называется *спиральностью*. Представьте себе электрическое поле фотона в виде стрелочки, перпендикулярной направлению его движения. Конец этой стрелочки вращается в плоскости, перпендикулярной направлению движения фотона, описывая в пространстве винтовую спираль. Эта спираль может закручиваться как по, так и против часовой стрелки подобно правой или левой резьбе на винте. В первом случае фотоны, составляющие пучок света, называются *правыми*, а во втором — *левыми*. Используемые в повседневной жизни винты и шурупы почти всегда имеют правую резьбу, но это не проявление какого-то закона природы, а исключительно следствие того, что в человеческой популяции правши преобладают над левшами. Фотоны могут с равной вероятностью быть как правыми, так и левыми. Это явление носит название *круговой поляризации фотонов*.

Поляризация одиночного фотона содержит один-единственный квантовый бит информации. Сообщения, передаваемые азбукой Морзе, могут отправляться в виде последовательности фотонов, имеющих различную поляризацию, кодирующую точки и тире.

Итак, каждый фотон может нести с собой один бит информации. Что можно сказать о локализации этого бита информации в пространстве? В квантовой механике местоположение фотона не может быть определённым, потому что нельзя с одинаковой точностью определить местоположение и импульс фотона.

Означает ли это, что бит информации вообще не имеет какого-то определённого места в пространстве?

Вы можете не знать точно, где находится фотон, но способны точно определить его местоположение, если поставите именно такую экспериментальную задачу. Просто нельзя определить *одновременно* точное местоположение фотона и его импульс. После того как вы точно определите местоположение фотона, вы будете точно знать, где нахо-

ации, который он несёт. В рамках обычной квантовой механики и теории относительности любой наблюдатель согласится с вами. В этом смысле квантовый бит информации имеет определённое местоположение. По крайней мере, так всегда считалось.

Но принцип дополнительности чёрных дыр утверждает, что расположение информации не является определённым даже в этом смысле. Один из наблюдателей находит информационные биты где-то глубоко под горизонтом, а другой видит те же биты, излучаемые обратно с поверхности, лежащей над самым горизонтом. Всё выглядит так, будто информация всё-таки не имеет определённого местоположения в пространстве.

Существует альтернативный способ представления этой проблемы. В этом представлении биты информации всё-таки обладают определённым местоположением, но оно находится вовсе не там, где вы думаете. Это — голографический взгляд на природу, порождённый размышлениями о чёрных дырах. Как же работает голографический принцип?

Рисунок, фотография или картина не являются тем реальным миром, который они отображают. Это плоская, неполная, лишённая трёхмерной глубины проекция реального мира. Повертите рисунок перед собой, посмотрите на него под другим углом — вы не увидите ничего нового сверх того, что на нём уже изображено. Он двумерен, в то время как реальный мир трёхмерен. Художник, используя особенности восприятия и законы перспективы, попросту надул вас, заставив ваш мозг додумывать несуществующую информацию и воссоздавать в воображении трёхмерную картину. Не существует никакой возможности определить, является изображённая фигура далёким великаном или близким карликом. Не существует никакой возможности определить, является изображённый человек существом из плоти и крови или восковой фигурой. Мозг домысливает информацию, которая реально не содержится в наборе разноцветных мазков на холсте или в зёрнах серебра на поверхности фотобумаги.

Изображение на экране компьютера также представляет собой двумерную поверхность, заполненную светящимися пикселями. Фактические данные, хранящиеся в памяти компьютера, содержат информацию о цвете и интенсивности отдельных пикселей. Подобно картине или



фотографии, экран компьютера является очень плохим представлением реальной трёхмерной сцены.

Что следует сделать, чтобы достоверно сохранить полную информацию о трёхмерном объекте, включая также информацию о его внутренностях? Ответ очевиден: вместо набора пикселей, заполняющих плоскость, нам потребуется набор пространственных элементов — *вокселей*, заполняющих объём отображаемой сцены.

Заполнение пространства вокселями — гораздо более сложная задача, чем заполнение поверхности пикселями. Например, если экран компьютера имеет разрешение тысяча на тысячу пикселей, то для его заполнения вам понадобится миллион пикселей. Но если мы хотим заполнить объём с таким же разрешением, нам понадобится миллиард вокселей.

Однако голографический метод записи изображений преподносит нам сюрприз. Голограмма представляет собой двумерный образ — изображение на плёнке, позволяющее однозначно восстанавливать полноценные трёхмерные изображения. Вы можете ходить вокруг восстановленного голографического изображения и рассматривать его со всех сторон. Вы способны однозначно определить, какой из объектов находится ближе, а какой дальше. Изменив своё собственное местоположение, вы можете добиться того, что дальний объект станет ближним, а ближний — дальним. Голограмма является двумерным изображением, но она содержит полную информацию о трёхмерной сцене. Однако если вы будете просто рассматривать фотопластинку с изображением голограммы, вы не увидите ничего осмысленного: изображение реального мира на голографической пластинке зашифровано.

Информация на голограмме, пусть и зашифрованная, может содержаться в виде отдельных пикселей. Конечно, за всё приходится платить: чтобы описать объём размером в  $1000 \times 1000 \times 1000$  вокселей, голограмма должна состоять из одного миллиарда пикселей.

Одной из неожиданностей современной физики стало открытие, что мир является своего рода голографическим изображением. Но ещё более удивительным оказалось то, что количество пикселей, которые содержит голограмма, пропорционально площади поверхности, окружающей описываемую сцену, а не её объёму. Это как если бы трёхмерный объём в один миллиард вокселей потребовал для своего

полного описания всего миллиона пикселей на плоском экране компьютера! Представьте себя в огромной комнате, в окружении стен, пола и потолка. Или лучше представьте себя внутри большой сферы. Голографический принцип утверждает, что всё, что находится в комнате, представляет собой голографическое изображение, записанное на двумерной поверхности, ограничивающей эту комнату. То есть на самом деле вы и вся прочая обстановка комнаты — всё это *квантовая голограмма*, записанная на ограничивающей объём поверхности. Эта голограмма представляет собой двумерный массив крошечных пикселей, а отнюдь не вокселей, каждый из которых имеет размер порядка планковской длины! Конечно, природа квантовой голограммы и способ кодирования трёхмерных данных сильно отличаются от принципа работы обычных голограмм. Но они имеют одну общую особенность: изображение трёхмерного мира полностью зашифровано.

Теперь нам понятно, как следует поступать с чёрными дырами. Поместим чёрную дыру в центре большой сферической комнаты. Всё — чёрная дыра, космический путешественник, корабль-матка с внешним наблюдателем — хранится в виде голографической информации, записанной на сферической поверхности, окружающей сцену. Две разные картины, которые мы пытались примирить при помощи принципа дополнительности чёрных дыр, — это просто две различные реконструкции одной и той же голограммы, но с использованием различных алгоритмов!

Голографический принцип не встретил радушного приёма, когда мы с 'т Хоофтом выдвинули его в начале 1990-х годов. Моё личное мнение было, что этот принцип верен, но что должно пройти не одно десятилетие, прежде чем мы узнаем достаточно о квантовой механике и гравитации, чтобы доказать его справедливость. Однако всё изменилось всего три года спустя, когда в 1997 году молодой физик Хуан Малдасена взорвал физический мир статьёй под названием «Предел больших  $N$  в суперконформной теории поля и супергравитация». Неважно, что означают эти слова, суть в том, что Малдасена, умело соединив теорию струн с  $D$ -бранами Полчински, обнаружил полное голографическое описание если не нашего мира, то мира, достаточно похожего на наш, чтобы это описание стало убедительным аргументом

в пользу голографического принципа. Чуть позже Эд Виттен поставил свою печать одобрения на голографический принцип, опубликовав совместно с Малдасеной статью «Пространство анти-де Ситтера и голография». После этого можно было с уверенностью сказать, что голографический принцип созрел для роли одного из краеугольных камней современной теоретической физики. Он был использован для решения проблем, которые на первый взгляд не имеют ничего общего с чёрными дырами.

Что общего имеет голографический принцип с дополнительностью чёрных дыр? Ответ: «Всё!» Голограммы представляют собой невероятно зашифрованный набор данных, предназначенный для декодирования. Декодирование может быть произведено либо путём математической обработки, либо при помощи освещения голограммы светом лазера. Когерентное лазерное излучение на физическом уровне реализует математический алгоритм.

Представьте себе сцену, содержащую большую чёрную дыру и различные предметы, которые могут в неё падать, а также выходящее наружу излучение. Всю эту сцену можно описать при помощи квантовой голограммы, локализованной на далёкой поверхности, окружающей содержащее сцену пространство. Но теперь у нас существуют два возможных способа — два алгоритма — для декодирования голограммы. Первый алгоритм воссоздаёт сцену так, как она выглядит для наблюдателя, который находится снаружи горизонта чёрной дыры и наблюдает излучение Хокинга, выносящее обратно все биты, попавшие под горизонт. Второй алгоритм восстанавливает сцену такой, какой бы её увидел некто, падающий в чёрную дыру. У нас есть одна голограмма, но два способа её восстановления.

## Пузыри вокруг нас

Вероятно, слишком опрометчиво было бы заявить, что трёхмерный мир является полной иллюзией. Но предположение о том, что биты информации располагаются вовсе не обязательно там, где вы ожидали бы их обнаружить, в настоящее время является широко признанным. Каковы его последствия для Вселенной из мыльной пены из

, на чём мы остановились в конце прошлой главы.

Я рассказал вам о двух способах представления истории: последовательном и параллельном. Согласно последовательному представлению, каждый наблюдатель видит вокруг себя небольшую часть Мегаверсума. Остальные его части никогда не будут доступны наблюдению, потому что они удаляются со сверхсветовой скоростью. Граница между тем, что можно, и тем, что нельзя увидеть, — это горизонт. К сожалению, остальные карманные вселенные Мегаверсума — все эти Неверленды — навсегда скрыты от нас за горизонтом. С позиции классических принципов общей теории относительности мы можем сколько угодно фантазировать о существовании и свойствах этих других миров, но никогда ничего про них не узнаем. Они не имеют для нас никакого практического значения, и они не имеют смысла с точки зрения научного подхода.

Они являются предметом изучения метафизики, а не физики.

Но, с другой стороны, точно такой же вывод оказался ошибочным в отношении горизонта чёрной дыры. На самом деле космический горизонт вечно раздувающейся Вселенной математически очень похож на горизонт чёрной дыры. Давайте вернёмся к бесконечному озеру, заполненному лодками и наблюдателями. Чёрная дыра была очень похожа на опасный слив, горизонт — на точку невозврата. Давайте сравним эту модель с моделью вечно расширяющегося озера, питающегося системой труб, проложенных вдоль всего дна, когда плавающие в нём наблюдатели удаляются друг от друга в соответствии с законом Хаббла. Если вода подаётся в озеро с постоянной скоростью, мы получим наиболее точный аналог вечной инфляции.

Каждая отдельная лодка будет окружена границей, похожей на горизонт вблизи слива. Представьте себе лодки, плавающие вокруг корабля-матки. Если случайно или по умыслу одна из них окажется за пределами точки невозврата, она просто не может вернуться обратно и даже обмениваться сообщениями с кораблём-маткой. Единственное различие между горизонтом чёрной дыры и космическим горизонтом раздувающегося пространства состоит в том, что в одном случае мы находимся снаружи, а в другом — внутри горизонта. Но во всём остальном горизонты чёрной дыры и раздувающегося пространства одинаковы.

Для кого-то находящегося снаружи чёрной дыры все события в жизни отправившегося в чёрную дыру исследователя находятся за горизонтом. Но эти события составляют предмет физики, а не метафизики. Они телеграфируются наружу в виде омлета из голографического кода излучением Хокинга. Как для сообщения, передаваемого заключённым из тюрьмы, не имеет значения, знаем мы код или нет, — сообщение всё равно присутствует в передаваемой колоде карт.

Существуют ли такие же «карты», прилетающие к нам из миллиардов карманных вселенных, находящихся за космическим горизонтом? Космические горизонты изучены не столь хорошо, как горизонты чёрных дыр. Но если очевидное сходство между ними может служить какой-то подсказкой, то карты, прилетающие к нам из-за космических горизонтов, должны представлять собой такие же фотоны, из которых состоит излучение Хокинга. К этому моменту вы, надеюсь, уже догадались, что ими являются фотоны космического микроволнового фонового излучения, которые всё время приходят к нам со всех направлений. Эти посланники из-за космического горизонта несут нам сообщения от всего Мегаверсума.

Джордж Смут, один из пионеров в обнаружении реликтового излучения, в порыве сверхэнтузиазма однажды сравнил карту реликтового излучения с ликом бога. Но мне кажется, что для пытливых умов зашифрованная голограмма бесконечных карманных вселенных является гораздо более интересной и точной интерпретацией этой картины.



## Глава 13

# ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ

## Слоганы

Одна тема проходит связующей нитью сквозь весь наш длинный и извилистый тур от фейнмановских диаграмм до бурлящих вселенных — наша собственная Вселенная представляет собой необыкновенное место, которое, как кажется, было фантастически хорошо сконструировано для нашего существования. Эта уникальность не является тем, что можно приписать случайному стечению обстоятельств. Это слишком маловероятно. Такое явное совпадение вызывает к объяснению.

Чрезвычайно популярным не только среди широкой публики, но и среди многих учёных<sup>1</sup> является объяснение, что некий «суперархитектор» создал Вселенную с определённым благожелательным замыслом. Сторонники этой точки зрения — разумного замысла — утверждают, что он вполне научно и идеально согласуется со всеми космологическими и биологическими фактами. Разумный демиург не только выбрал для своего замысла отличные Законы Физики, но также направил биологическую эволюцию, проведя её в обход тупиковых ветвей от бактерий до человека разумного. Но это объяснение, будучи эмоционально успока-

---

<sup>1</sup> , например, книгу Пола Дэвиса «Бог и Новая физика» (Paul Davies, *God and the New Physics*, 1983).

ивающим, является интеллектуально неудовлетворительным. Оно оставляет без ответа вопросы, кто создал самого демиурга, какой механизм использовал демиург для вмешательства в ход эволюции, нарушает ли демиург Законы Физики для достижения своих целей, подчиняется ли демиург законам квантовой механики?

Сто пятьдесят лет назад Чарльз Дарвин предложил для науки о жизни ответ, который стал краеугольным камнем современной биологии, — механизм, который не требует ни цели, ни демиурга. Случайные мутации в сочетании с конкуренцией за возможность воспроизводства объясняют всё разнообразие видов, которые в конечном итоге заполнили все экологические ниши, включая существ, которые выживают благодаря своему остроумию. Но физика, астрономия и космология пока не могут похвастаться такими успехами. Дарвинизм может объяснить возникновение человеческого мозга, но уникальность Законов Физики по-прежнему остаётся загадкой. Эта головоломка, возможно, сдастся, наконец, под напором физической теории, сыгравшей в физике такую же роль, какую теория Дарвина сыграла в биологии.

Физические механизмы, о которых я рассказывал в этой книге, имеют два ключевых сходства с теорией Дарвина.

Первое из них — это огромный ландшафт возможностей — чрезвычайно богатое пространство всевозможных конструкций<sup>1</sup>. Существует более 10 000 видов птиц, более 300 000 видов жуков и миллионы видов бактерий. Общее же число возможных видов, несомненно, неизмеримо больше.

Является ли число возможных биологических видов настолько же большим, как и число различных вариантов вселенных? Это зависит от того, что именно мы подразумеваем под возможным биологическим видом. Одним из способов определения числа всех возможных био-

---

<sup>1</sup> Уже спустя довольно большое время после того, как я написал эту главу, когда книга была на заключительном этапе редактирования, мне довелось прочитать эссе Ричарда Докинза, озаглавленное «Дарвин-триумфатор», в котором Докинз использует термин «Ландшафт» точно так же, как я использую его здесь. Некоторые из его концепций оказались настолько похожими на те, которые я излагал в этой книге, что сначала я подумал, что Докинз каким-то образом получил доступ к файлам на моём компьютере. Но если он украл мою работу, то он должен был решить проблему путешествий во времени, поскольку «Дарвин-триумфатор» был написан в 1991 году.



логических конструкций является перебор всех вариантов последовательностей пар нуклеотидов в большой молекуле ДНК. Молекула человеческой ДНК содержит около миллиарда пар оснований, и для каждого основания есть четыре варианта. Общее количество возможных вариантов оказывается невероятно огромным:  $4^{1\,000\,000\,000}$  (или порядка  $10^{600\,000\,000}$ ). Это намного больше, чем  $10^{500}$  — количество всевозможных долин Ландшафта, подсчитанное струнными теоретиками путём перебора всех возможных конфигураций потоков. Но разумеется, большинство из вариантов последовательностей ДНК оказываются нежизнеспособными. С другой стороны, большинство из  $10^{500}$  вакуумов также являются непригодными для жизни. В любом случае оба числа настолько велики, что они выходят далеко за пределы наших способностей их представить.

Второе ключевое сходство — это сверхплодотворный механизм воплощения всевозможных «чертежей» «в железе». Дарвиновский механизм включает репликацию, конкуренцию и задействует для своей работы огромное количество атомов углерода, кислорода и водорода. Механизм вечной инфляции также предполагает экспоненциальную репликацию, но — объёма пространства.

Как говорилось в главе 11, процесс заселения ландшафта имеет сходство с биологической эволюцией, но также он имеет по крайней мере два очень больших различия. Первое из них обсуждалось в главе 11. Биологическая эволюция вдоль заданной филы состоит из последовательности практически неотличимых друг от друга индивидуальных организмов, и чтобы обнаружить отличие, необходимо сравнивать организмы, отстоящие друг от друга на много поколений. Но если мы проследим генеалогию нескольких поколений пузырей, то мы в каждом следующем поколении будем обнаруживать большие отличия в энергии вакуума, массах частиц и прочих Законах Физики. Если бы дети так сильно отличались от родителей, это сделало бы дарвиновскую эволюцию невозможной. Количество монстров-мутантов будет настолько превосходить численность относительно нормального потомства, что выживание их вида в условиях конкуренции с другими видами станет невозможным.

Как же тогда Мегаверсум оказался настолько богат разными «видами», если биологическая эволюция в тех же условиях заходит в тупик?

Ответ лежит во втором большом различии между двумя видами эволюции: различные карманные вселенные не конкурируют между собой за место под солнцем и за пищевые ресурсы. Было бы интересно посмотреть на воображаемый мир, в котором биологическая эволюция происходит в среде, где ресурсы настолько неограниченны, что у организмов нет необходимости вести борьбу за существование. Возникнет ли в таком мире разумная жизнь? В большинстве моделей дарвиновской эволюции борьба за существование является ключевым фактором. Что произошло бы без неё? Рассмотрим частный случай: последний шаг в развитии нашего собственного вида. Около 100 000 лет назад кроманьонцы боролись за существование с неандертальцами. Кроманьонцы выиграли, потому что они были умнее, крупнее, сильнее и сексуальнее. Это привело к улучшению генофонда человеческой расы. Но предположим, что ресурсы были бы неограниченными и что сексуальность не была бы необходима для размножения. Привело бы это к уменьшению популяции кроманьонцев? Конечно нет. Все, кто выжил в условиях борьбы за существование, тем более выжили бы в условиях её отсутствия. Более того, многие из тех, кто в этой борьбе погиб, тоже выжили бы. Но и неандертальцев тоже было бы больше. Больше было бы и тех и других и, возможно, ещё и каких-нибудь третьих. Все население возрастало бы экспоненциально. В мире неограниченных ресурсов отсутствие конкуренции не замедлило бы эволюцию разумных существ, но привело бы к тому, что их оказалось бы больше одного вида.

Есть и третий, после физики и биологии, контекст, в котором те же две составляющих — ландшафт и Мегаверсум — крайне важны для нашего существования. В природе существует огромное разнообразие типов планет и других астрономических тел: горячие звёзды, холодные астероиды, гигантские пылевые облака и много чего ещё. И снова оказывается, что ландшафт возможностей в этом контексте чрезвычайно богат. Одни только различия в расстоянии от родительской звезды до планеты дают нам большое разнообразие природных условий. Что касается механизма, который превращает возможность в актуальность — Большого взрыва и последующей гравитационной конденсации вещества, — то только в наблюдаемой части Вселенной этот механизм, по самой пессимистичной оценке, должен был создать порядка  $10^{22}$  планет.

В каждом из этих случаев ответ на вопрос о нашем собственном существовании точно такой же: имеется много существ/планет/карманных вселенных и многих других возможных конструкций. Количество их настолько велико, что чисто статистически некоторые из них окажутся жизнеспособными/приспособленными для возникновения разумной жизни. Большинство же существ/вселенных/небесных тел нежизнеспособны/непригодны для жизни. Нам просто повезло. Это и есть смысл антропного принципа. Нет никакой магии, нет никакого сверхъестественного демиурга, а есть лишь самый обычный закон больших чисел.

Мой друг Стив Шенкер — один из мудрейших физиков, который я знаю, любит формулировать свои тезисы в виде слоганов. Он считает, что если важная серьёзная идея не может быть сформулирована в виде пары коротких фраз, то такая идея не заслуживает внимания. Мне кажется, что он прав. Вот некоторые примеры слоганов, иллюстрирующих развитие физики.

Ньютоновская механика:

Пространство и время абсолютны

Специальная теория относительности:

Пространство и время относительны

и

Скорость света является инвариантом

Общая теория относительности:

Принцип эквивалентности:  
гравитация неотличима от ускорения

Квантовая механика:

Принцип неопределённости Гейзенберга:  
положение и скорость не могут быть точно  
определены одновременно

Космология:

Большой взрыв

Однако лучший научный слоган, который я знаю, относится не к физике и космологии, а к теории эволюции:

Выживание приспособленных  
Естественный отбор  
Эгоистичный ген

Если бы мне пришлось сократить эту книгу до единственного слогана, то, на мой взгляд, он выражал бы единый принцип, общий для биологии и космологии:

## Ландшафт возможностей населён актуальностями Мегаверсума

Между биологическим или планетарным механизмом эволюции и вечной инфляцией, заселяющей Ландшафт, существует одно досадное различие. В первых двух случаях мы можем непосредственно наблюдать результаты работы эволюционного механизма. Мы воочию видим разнообразие биологических форм и типов планет вокруг нас.

Хотя астрономические объекты наблюдать сложнее, чем изучать животный и растительный мир на Земле, но даже без помощи телескопа мы можем увидеть планеты, Луну и звёзды. Однако гигантское море карманных вселенных, созданных вечной инфляцией, скрывает от нас космический горизонт событий. Проблема, конечно, в эйнштейновском ограничении максимальной скорости. Если бы мы смогли превысить скорость света, то не было бы никаких проблем с путешествиями в далёкие карманные вселенные и обратно. Мы могли бы избороздить весь Мегаверсум. Но увы, просверливание червоточины сквозь пространство к далёкой карманной вселенной — это фантазия, которая нарушает фундаментальные физические принципы. Существование других карманных вселенных остаётся и всегда будет оставаться гипотезой, но эта гипотеза обладает огромной силой в отношении объяснения устройства мира.

## Консенсус?

Если идеи, которые я изложил, окажутся верными, то наш взгляд на мир расширится далеко за пределы глухой провинции у бескрайнего моря Мегаверсума к чему-то гораздо более грандиозному: большому пространству, большому промежутку времени и большому множеству возможностей. Если всё правильно, то сколько времени займёт сдвиг парадигмы? Как пресловутый лес, смены парадигм лучше всего видны на расстоянии. В периоды смены принципов, на которые мы опираемся, всё выглядит слишком запутанным, вода становится слишком мутной, чтобы по-

зволить ясно увидеть какую-либо перспективу хотя бы на несколько лет вперёд. В такие времена наблюдателю со стороны практически невозможно понять, чьи идеи заслуживают внимания, а чьи — пустые спекуляции. Это трудно предвидеть даже инсайдерам. Цель написания этой книги не в том, чтобы убедить читателя в правильности моей собственной точки зрения. Научными аргументами лучше всего сражаться на страницах научных журналов и в семинарских аудиториях. Моя цель в том, чтобы показать расстановку сил в войне новых идей, чтобы обычные читатели смогли почувствовать свою сопричастность к этой войне, посмотреть на неё изнутри, ощутить азарт сражения и радость открытия так, как ощущаю их я.

Меня всегда захватывали истории появления и развития новых научных идей. Я пытался понять, как великие мастера прошлого приходили к своим открытиям. Однако не все великие мастера мертвы. В настоящее время — прямо сейчас, в это чудесное время — живут и творят такие титаны, как Вайнберг, Виттен, 'т Хоофт, Полчински, Малдасена, Линде, Виленкин ... я счастлив, что могу наблюдать, как они сражаются за новую парадигму. Поскольку я сам являюсь непосредственным участником этих событий, я возьму на себя смелость воссоздать их образ мыслей. Начнём с физиков.

Стивен Вайнберг, пожалуй, более, чем любой другой физик, ответствен за открытие Стандартной модели физики элементарных частиц. Стив не склонен к скоропалительным суждениям, и я уверен, что он перепроверяет все доказательства так тщательно, как никто другой. Из его трудов и лекций очевидно, что он хотя и не принимает как истину в последней инстанции, но, по крайней мере, не отвергает возможность того, что некоторые из вариантов антропного принципа могут играть определённую роль в предопределении Законов Физики. Тем не менее отдельные его работы выражают сожаление о «потерянной парадигме». В своей книге «Мечты об окончательной теории», изданной в 1992 году, он пишет:

«Если благоприятное для нас значение космологической постоянной подтверждается наблюдениями, то будет разумно сделать вывод, что наше собственное существование играет важную роль в объяснении, почему Вселенная является именно такой. Чего бы это ни стоило, я надеюсь, что это не так. Как физик я хотел бы видеть, что

мы способны делать точные предсказания, а не расплывчатые заявления о том, что некоторые константы должны лежать в диапазоне, который является более или менее благоприятным для жизни. Я надеюсь, что теория струн действительно послужит основой для окончательной теории и что эта теория будет обладать достаточной предсказательной силой, чтобы дать нам возможность вычислить значения всех фундаментальных констант, включая космологическую постоянную. Будущее покажет...»

Вайнберг написал эти слова под впечатлением открытия гетеротической теории струн и компактификации многообразий Калаби — Яу. Но теперь он знает, что теория струн не оправдала надежд на то, что она станет альтернативой антропному принципу.

Эд Виттен — один из величайших математиков в мире и пифагореец в душе. Он построил свою карьеру вокруг элегантно и красивой математики, которая родилась из теории струн. Его способность погружаться в математические глубины захватывает дух. Неудивительно, что он относится к тем моим коллегам, которые упорно не желают отказываться от поиска той магической математической «серебряной пули», которая уберёт произвол в выборе Законов Физики и свойств элементарных частиц. Если такая пуля и существует, то именно Виттен имеет все шансы её найти. Долгое время его поиски не имели успеха, несмотря на то что он сделал больше, чем кто-либо другой для создания математических инструментов, необходимых при изучении Ландшафта. Я не думаю, что ему вообще нравится текущее направление развития теории.

Если Виттен являлся движущей силой развития математического аппарата теории струн, то Джо Полчински был главным поставщиком «деталей» для этой гигантской машины. Вместе с блестящим молодым стэнфордским<sup>1</sup> физиком Рафаэлем Буссо Джо предпринял первую попытку собрать из этих деталей модель Ландшафта с огромным дискретуумом вакуумов. В многих дискуссиях Джо настаивал, что альтернативы населённому Ландшафту не существует.

---

<sup>1</sup> Сегодня Буссо занимает должность профессора в Калифорнийском университете в Беркли.



Мой старый товарищ по оружию Герард 'т Хоофт всегда был настроен скептически в отношении претензий теории струн на роль «теории всего» и недавно написал мне:

*На самом деле никто не может мне объяснить, что означает утверждение, будто теория струн содержит  $10^{100}$  вакуумных стран. Прежде чем сделать такое утверждение, вы должны сначала дать строгое определение, что такое теория струн, а у нас нет такого определения. И сколько вообще этих вакуумов:  $10^{500}$  или  $10^{10\,000\,000\,000}$ ? Поскольку такие «детали» все ещё висят в воздухе, я чувствую себя крайне неудобно перед антропными аргументами.*

*Однако я не исключаю некоторые варианты антропного принципа. В конце концов, мы живём на Земле, не на Марсе, Венере или Юпитере именно по антропным соображениям. Это, однако, заставляет меня отличать дискретный антр. принцип от континуального. Дискретный значит что-то вроде: постоянная тонкой структуры является обратным значением целого числа и равна  $1/137$ , что требует поправок высших порядков. Континуальный означает, что эта константа равна  $1/137,018945693459823497634978634913498724082734\dots$  и т. д., и все эти десятичные знаки определяются антр. принц. Я считаю это неприемлемым. Теория струн, как мне представляется, утверждает, что первые 500 десятичных знаков имеют антропное происхождение, а остальные — математическое. Я думаю, что слишком рано делать такие предположения».*

Нужно уточнить, что понимает 'т Хоофт под дискретным антропным принципом. Это означает, что Ландшафт не должен содержать так много вакуумов, чтобы среди них можно было найти вакуум с любыми значениями физических констант. Иными словами, он готов частично примириться с антропными рассуждениями, если число различных возможностей окажется конечным.

Стоит отметить, что, несмотря на свой скептицизм, Герард не исключает антропного объяснения, но вместе с тем не предлагает и альтернативного объяснения для факта невероятно тонкой настройки космологической постоянной. Однако в своём скептическом отношении к окончательной «теории всего», я думаю, он прав.

Том Бэнкс — ещё один скептик. Том — один из глубоких мыслителей в мире физики, и его разум всегда открыт для новых идей. Его

скептицизм, как и скептицизм 'т Хоофта, относится не столько к антропной аргументации, сколько к определению Ландшафта, который даёт теория струн. Тому принадлежит множество важных вкладов в эту теорию, но по его же собственному мнению, Ландшафт метастабильного вакуума может оказаться иллюзией. Том утверждает, что теория струн и теория вечной инфляции ещё недостаточно хорошо поняты, чтобы с уверенностью утверждать, что Ландшафт — это математическая реальность. Если критерием является определённость, то я согласен с ним. Но Бэнкс чувствует, что математика теории струн может оказаться не только неполной, но и вообще ошибочной. Пока что его аргументы не выглядят убедительными, но они вызывают серьёзную озабоченность.

А что думают обо всём этом более молодые физики? В целом они открыты новым идеям. Хуан Малдасена в свои тридцать с небольшим лет оказал огромное влияние на всех теоретиков своего поколения. Его работа превратила голографический принцип в практический инструмент. Как и Виттена, его часто посещают великие математические озарения; как и Полчински, он оказал огромное влияние на физическую интерпретацию математических результатов. Относительно Ландшафта он однажды бросил: «Я надеюсь, что это неправда». Подобно Виттену, Малдасена надеется на единственность как Законов Физики, так и истории Вселенной. Однако же, когда я спросил его, питает ли он какую-нибудь надежду на то, что на самом деле никакого Ландшафта не существует, он ответил: «Нет. Боюсь, что нет».

В Стэнфордском университете — моём доме — существует более-менее единодушное, по крайней мере среди физиков, мнение, что Ландшафт существует. Мы должны стать его исследователями, научиться ориентироваться в нём и составить его карту. У нас есть два тридцатилетних лидера: Шамит Качру и Ева Сильверстейн. Оба заняты конструированием гор, долин и обрывов на Ландшафте. Если бы я захотел назвать кого-нибудь современным Рубом Голдбергом, то это, безусловно, был бы Шамит. Только не поймите меня неправильно. Я не хочу сказать, что он делает плохие машины. Напротив, Шамит лучше, чем кто-либо другой из струнных теоретиков, умеет приспособливать сложные детали этих машин для конструирования моделей Ландшафта. А антропный принцип? Он идёт в комплекте с Ландшафтом. Он со-

ставляет неотъемлемую часть рабочей предпосылки для всех моих ближайших коллег в Стэнфордском университете, как молодых, так и старых.

На другом конце страны, в Нью-Джерси, находятся два величайших в мире центра теоретической физики: Принстон с его физическим факультетом и Институт перспективных исследований. Однако в двадцати милях к северу, в Нью-Брансуике, есть ещё один локомотив, тянущий физику вперёд, — Ратгерский университет. Одной из его достопримечательностей является звезда по имени Майкл Дуглас. Как и Виттен, Дуглас и гениальный физик, и серьёзный математик. Но для нашей истории гораздо более важно, что он ещё и отважный исследователь Ландшафта. Дуглас поставил перед собой задачу изучения статистики Ландшафта, вместо того чтобы исследовать свойства отдельных долин. Он использует методы математической статистики, чтобы оценить, какие свойства являются наиболее распространёнными, какой процент долин лежит на той или иной высоте, какова вероятность, что долина, экспоненциально стремящаяся к суперсимметричному состоянию, окажется пригодной для жизни. Несмотря на то что он предпочитает использовать термин «статистический подход» вместо термина «антропный принцип», справедливо будет сказать, что Дуглас находится на антропной стороне баррикады.

Космологи разделились по этому вопросу поровну. Джим Пиблс из Принстонского университета — патриарх американской космологии. Пиблс был пионером в каждом космологическом открытии. Ещё в конце 1980-х годов он одним из первых начал подозревать, что космологические данные свидетельствуют о существовании чего-то вроде ненулевой космологической постоянной. Напоминаю: это было в конце 1980-х годов! Обсуждая с ним космологические проблемы, я был поражён невинным признанием, что, по его мнению, многие черты Вселенной можно объяснить только с привлечением антропной аргументации.

Сэр Мартин Рис, британский Королевский астроном, — одержимый энтузиаст Ландшафта, Мегаверсума и антропного принципа. Мартин — ведущий европейский космолог и астрофизик. Многие аргументы, которые я использовал для обоснования антропного принципа, я узнал от него и от американского космолога Макса Tegmarka.

С Андреем Линде и Александром Виленкиным вы уже знакомы. Подобно Рису и Тегмарку, они принадлежат к лагерю сторонников антропного принципа. Линде так выразил своё мнение:

*«Те, кому не нравится антропный принцип, обычно отрицают его с порога. Разумеется, этот принцип не является универсальным оружием — это просто полезный инструмент, позволяющий сосредоточиться на фундаментальных физических проблемах, которые могут иметь антропное решение, отделяя их от всего остального. Вы можете любить или ненавидеть антропный принцип, но я уверен, что в конечном итоге вам придётся его использовать».*

Стивен Хокинг работает вместе с Мартином Рисом в Кембридже, но у меня нет сомнений, что его взгляды очень во многом совпадают с моими. Вот цитата из лекции, прочитанной Стивеном в 1999 году:

*«Я буду описывать то, что я вижу в качестве возможной основы для квантовой космологии на базе М-теории. Я не стану ограничивать себя в предположениях и рискну утверждать, что антропный принцип имеет важное значение при выборе решения для представления нашей Вселенной из всего зоопарка решений, допускаемых М-теорией».*

Это говорит о том, что мы со Стивеном наконец-то хоть в чём-то сошлись во мнениях.

Но не все космологи с этим согласны. Среди наиболее известных в этой области американцев Пол Стейнхардт и Дэвид Спергель являются наиболее яростными противниками всего, что даже отдалённо пахнет антропным принципом. Стейнхардт, чьи чувства я более или менее представляю, утверждает, что он ненавидит Ландшафт и надеется, что эту гипотезу рано или поздно опровергнут. Но, как и Малдасена, он пока что не может придумать, как это сделать. Вот выдержка из работы Стейнхардта:

*«Я надеюсь, что в ближайшие десятилетия физики, наконец, воплотят в жизнь свою мечту о подлинно научной “окончательной теории” и будут оглядываться на нынешнее повальное увлечение антропным принципом как на безумие тысячелетия».*

Отец инфляционной теории Алан Гут сохраняет нейтралитет. Алан истово верует в густонаселенный Ландшафт. Именно он придумал термин «карманная вселенная». Но не будучи струнным теоретиком, он всё же благожелательно относится к идее дискретуума. Другими

словами, он менее привержен идее о том, что количество возможных вакуумных состояний экспоненциально велико. Что касается антропного принципа, то я подозреваю, что Алан — латентный верующий. Всякий раз, когда я его вижу, я спрашиваю, не определился ли он, на что он неизменно отвечает<sup>1</sup>, что пока нет.

Напоследок я припас своего старого друга Дэвида Гросса. Мы с Дэвидом дружим больше сорока лет. Всё это время мы сражались друг с другом, споря до хрипоты, иногда отчаянно, но всегда с большим уважением к мнению друг друга. Я думаю, что когда мы станем двумя старыми несносными ворчунами, мы всё равно будем продолжать сражаться. Возможно, мы уже ими стали.

Без сомнения, Дэвид — один из величайших физиков в мире. Он наиболее известен как один из главных архитекторов квантовой хромодинамики, то есть динамики адронов<sup>2</sup>. Но важно, что он уже давно занимает должность одного из наиболее высокопоставленных генералов в армии струнных теоретиков. В середине 1980-х, будучи профессором в Принстоне, Дэвид со своими коллегами Джеффом Харви, Эмилем Мартинекком и Райаном Ромом произвёл сенсацию, обнаружив гетеротическую теорию струн. Эта новая версия теории струн выглядит гораздо больше похожей на реальный мир элементарных частиц, чем любая предыдущая. Кроме того, в то же самое время Эд Виттен со своими сотрудниками Энди Строминджером, Гари Горовицем и Филиппом Канделасом изобрёл компактификацию многообразий Калаби — Яу (и тоже в Принстоне). Когда эти работы были обнародованы, мир физики ахнул: результаты выглядели настолько реалистичными, что казалось, лишь несколько месяцев отделяет нас от окончательной,

---

<sup>1</sup> Я уже собирался отдать в редакцию окончательный вариант этой книги, когда Гут опубликовал статью, в которой он написал: «Идею, согласно которой наблюдаемые нами законы физики определяются не какими-то фундаментальными закономерностями, а всего лишь требованием, чтобы их мог кто-нибудь изучать, часто называют антропным принципом. Хотя в некотором контексте этот принцип может показаться явно религиозным, объединение инфляционной космологии с ландшафтом теории струн делает антропный принцип вполне жизнеспособным». Алан, ты что, вчера родился?

<sup>2</sup> Я с радостью сообщаю, что пока я писал эту книгу, Гросс и двое его коллег получили за создание КХД Нобелевскую премию.

завершённой, уникальной теории элементарных частиц. Мир затаил дыхание... и не дышит до сих пор... и уже посинел.

Судьба оказалась зла. Чем больше проходит времени, тем яснее становится, что энтузиазм принстонцев в лучшем случае оказался преждевременным. Но Дэвид никогда не лелеял надежды, что серебряная пуля, которая оправдывает этот энтузиазм, будет быстро обнаружена. Что же касается меня, то я подозреваю, что в конце концов гетеротическая теория станет очень важной деталью для гигантской машины Руба Голдберга. Её сходство со Стандартной моделью впечатляет. Но я также думаю, что это не единственная необходимая деталь. Потoki, браны, сингулярности и другие фишки способны расширить гетеротический ландшафт до таких пределов, которые авторы первоначальной теории даже не представляли.

Гросс, как я уже сказал, является очень грозным интеллектуальным противником, и он очень резко возражает против антропного принципа. Хотя его резоны скорее идеологические, нежели научные, их следует обсудить. Его беспокоит аналогия с религией. Кто знает, не сотворён ли этот мир богом? Но учёные — реальные учёные — должны противостоять искушению объяснить природные явления, включая возникновение Вселенной, божественным вмешательством. Почему? Потому что как учёные мы понимаем, что у человека существует настоятельная необходимость в вере, необходимость в утешениях, которые легко затмевают разумные суждения. Очень легко попасть в соблазнительную ловушку утешительной сказки. Поэтому мы сопротивляемся всем попыткам объяснения мира, основанным на чём-либо ином, кроме Законов Физики, математики и вероятности.

Наряду со многими теоретиками Дэвид выражает опасение, что антропный принцип, как и религия, — слишком утешительное и простое объяснение. Он опасается, что если мы приоткроем дверь, даже самую щёлочку для антропного принципа, он совертит нас склониться к ложным убеждениям и отвратит будущих молодых физиков от поиска серебряной пули. Дэвид красноречиво цитирует обращение Уинстона Черчилля к ученикам его школы: «Никогда, никогда, никогда, никогда, никогда, никогда, никогда, никогда не сдавайтесь! Никогда не сдавайтесь! Никогда не сдавайтесь! Никогда не сдавайтесь!» Но бран-

ное поле физики усеяно трупами упрямых стариков, которые не знали, когда надо сдаваться.

Озабоченность представляется мне вполне реальной, и я не хочу преуменьшать опасность, однако я всё же думаю, что всё не так плохо, как он утверждает. Я ни секунды не беспокоюсь о подрастающем поколении — им хватит моральной силы, чтобы избежать ловушки. Если идея населённого ландшафта окажется ошибочной, я уверен, они поймут это. Если аргументы, указывающие на существование  $10^{500}$  вакуумов, неверны, молодые струнные теоретики и математики обнаружат это. Если теория струн ошибочна, возможно, из-за математической несогласованности, она останется валяться на обочине дороги, и вместе с ней будет выброшен и ландшафт теории струн. Но если это произойдёт, то мы останемся вообще без каких-либо рациональных объяснений иллюзии разумного замысла Вселенной.

С другой стороны, если теория струн верна и Ландшафт существует, мы сможем обосновать существование нашей долины при помощи новых и усовершенствованных математических или физических методов. Мы сможем узнать об особенностях соседних мест и изучить инфляционный обрыв, с которого мы упали. И наконец, мы сможем доказать, что строгое применение математических методов приведёт нас к открытию других долин, мало отличающихся от нашей, за исключением непригодной для жизни среды обитания. Дэвид не отвергает мои аргументы, но уклоняется от прямого ответа, потому что такой ответ противоречил бы нашим ранним надеждам, что тоже является своего рода религией.

У Гросса есть ещё один аргумент. Он спрашивает: «Разве не слишком высокомерно полагать, что жизнь может быть только такой, какой мы её знаем — на основе углерода, воды и т. д. Откуда мы знаем, что в совершенно чуждых нам условиях не может существовать совершенно чуждая нам жизнь?» Кто готов утверждать, что некоторые странные формы жизни не могли бы развиваться в межзвёздном пространстве, в космической пыли, в облаках межзвёздного газа, в атмосферах планет-гигантов, таких как Юпитер или Сатурн? В этом случае ихтиотропный принцип осетрологов потеряет всякий смысл. Аргумент, что для существования жизни необходима жидкая вода и узкий диапазон температуры, также окажется несостоятельным. Рассуждая в том же ключе,



мы придём к выводу, что если жизнь может возникнуть без галактик, то и вайнберговское объяснение малости космологической постоянной тоже потеряет свою силу.

Я думаю, что правильный ответ на эту критику состоит в том, что существует некое предположение, являющееся неотъемлемой частью антропного принципа, которое гласит: *«Жизнь — это чрезвычайно деликатная вещь, и она требует особых условий»*. Я не могу этого доказать. Это просто часть гипотезы, наделяющей антропный принцип объяснительной силой. Возможно, мы должны перевернуть аргумент и сказать, что успех предсказания Вайнберга подкрепляет гипотезу о том, что существование разумной жизни требует наличия галактик или по крайней мере звёзд и планет.

Какова альтернатива парадигмы населённого ландшафта? Моё мнение состоит в том, что как только мы устраняем сверхъестественного агента, не остаётся ничего, что могло бы объяснить удивительно тонкие настройки природы. Населённый ландшафт играет в физике и космологии ту же роль, которую дарвиновская эволюция играет в биологии. Случайные ошибки копирования и естественный отбор являются единственным естественным объяснением, как такой сложный орган, как глаз, может сформироваться из обычной материи. Населённый ландшафт и богатое разнообразие, предсказываемое теорией струн, — единственное естественное объяснение экстраординарных уникальных свойств нашей Вселенной, создающих условия для нашего существования.

Самое время остановиться и ответить на потенциальные критические замечания, которые могут быть высказаны в адрес этой книги, а именно на упреки в одностороннем освещении проблемы. Где альтернативные объяснения значения космологической постоянной? Разве не существует аргументов против существования гигантского ландшафта? Как насчёт других теорий помимо теории струн?

Заверяю вас, что я не игнорирую альтернативных точек зрения. На протяжении десятилетий многие люди, включая самых прославленных физиков, пытались объяснить, почему космологическая постоянная должна иметь очень малое или даже нулевое значение. Подавляющее большинство учёных сходится на том, что ни одна из этих попыток не увенчалась успехом. Мне просто нечего сообщить вам на этот счёт.

Что касается серьёзных математических попыток развенчать Ландшафт, то я знаю только одну. Автор этой попытки является блестящим математическим физиком, и, насколько я знаю, он по-прежнему уверен в справедливости своей критики ККАТ-конструкции. Его возражение базируется на чрезвычайно сложном математическом исследовании особых многообразий Калаби — Яу. Некоторые авторы возражали против его критики, но теперь это уже несущественно. Майкл Дуглас и его коллеги обнаружили множество примеров, позволяющих избежать означенной проблемы. Тем не менее ради честной оценки ситуации мы не должны исключать возможность того, что Ландшафт является всего лишь математическим миражом.

Наконец, относительно альтернатив теории струн. Есть одна популярная теория, называемая «петлевой гравитацией». Это очень интересная теория, но она далеко не так хорошо развита, как теория струн. В любом случае, даже самый известный приверженец петлевой гравитации Ли Смолин считает, что она не является истинной альтернативой теории струн, а может рассматриваться лишь как *альтернативная формулировка* теории струн.

Как бы мне ни хотелось сбалансировать книгу, приводя альтернативные объяснения, мне попросту не удаётся их найти. Противные аргументы сводятся либо к органическому неприятию антропного принципа («я его ненавижу»), либо к идеологическим возражениям («он неприемлем»).

Два специфических аргумента стали предметом вышедших недавно научно-популярных книг хорошо известных физиков, но оба, на мой взгляд, потерпели неудачу. Я займу ещё немного вашего времени, чтобы объяснить почему.

## Законы природы эмерджентны

Это любимая идея некоторых теоретиков, занимающихся конденсированными средами. Они изучают свойства материалов, состоящих из простых атомов и молекул. Главным адептом этой идеи является нобелевский лауреат Роберт Лафлин<sup>1</sup>. По сути — это старая теория эфира,

<sup>1</sup> Роберт Лафлин, «Другая Вселенная» (A Different Universe, 2005).

которая утверждает, что вакуум представляет собой некую специфичную материальную среду. Идея эфира была популярна в XIX веке, когда Фарадей и Максвелл пытались представлять электромагнитные поля как напряжения в эфире. Но после Эйнштейна эфир снискал себе дурную славу. Лафлин захотел воскресить старую идею, представляя Вселенную заполненной веществом со свойствами, аналогичными свойствам сверхтекучего гелия. Сверхтекучий гелий является примером вещества с особыми, *эмерджентными*, то есть «возникающими», свойствами, которые проявляются (возникают), только когда огромное количество атомов собираются вместе в макроскопических количествах. Жидкий гелий в сверхтекучем состоянии проявляет удивительные свойства. Например, он может течь без какого-либо трения. Сверхтекучая жидкость во многом похожа на хиггсовскую жидкость, которая заполняет пространство и придаёт частицам их свойства. В двух словах теорию Лафлина можно выразить, сказав, что мы живём в пространстве, заполненном подобной субстанцией. Если говорить более строго, то само пространство является такой эмерджентной субстанцией! Помимо этого, Лафлин считает, что гравитация — это тоже эмерджентное явление.

Одной из основных тем современной физики является исследование иерархической структуры эмерджентных явлений. Начнём с небольшого набора атомов или молекул. Собираясь в более крупную структуру, они образуют объект с новыми свойствами, которыми не обладали исходные кирпичики. Изучив свойства этого нового объекта, вы можете забыть, откуда он взялся, и начать строить из подобных ему объектов более крупные и сложные структуры. И снова у этих структур появятся новые свойства, отсутствовавшие у их составляющих. Вы снова можете забыть про свойства исходных объектов и т. д., пока не придёте к свойствам конечного макроскопического объекта. Одним из наиболее интересных свойств таких систем является то, что не имеет значения, с каких микроскопических структур вы начинаете, — это не приводит ни к каким различиям в эмерджентном поведении: свойства конечного макроскопического объекта всегда получаются одними и теми же, в определённых пределах<sup>1</sup>. По этой причине Лафлин счита-

<sup>1</sup> Разумеется, слишком большие изменения в исходном микроскопическом состоянии могут привести к совершенно другому макроскопическому результату — например, к кристаллу вместо сверхтекучей жидкости.

ет, что нет никакого смысла в поисках фундаментальных объектов природы, поскольку варьирование свойств таких основных объектов в широком диапазоне всё равно приведёт к тем же самым Законам Физики — гравитации, Стандартной модели и т. д. — в нашем крупномасштабном мире. В реальных макроскопических материалах существуют различные виды возбуждений, напоминающие по поведению элементарные частицы, но в действительности являющиеся коллективными движениями атомов. Звуковые волны, например, ведут себя так, как будто они состоят из квантов, называемых фононами. И поведение этих фононов подозрительно похоже на поведение фотонов и других частиц.

Есть две серьёзные причины сомневаться в том, что законы природы похожи на законы эмерджентных материалов. Первая причина заключается в особых свойствах гравитации. Чтобы проиллюстрировать это, рассмотрим свойства сверхтекучего гелия, хотя с таким же успехом можно было бы взять и любой другой материал. Со сверхтекучей жидкостью происходит множество интересных вещей. В ней могут существовать волны, ведущие себя как скалярные поля, и объекты, называемые вихрями, похожие на торнадо, движущиеся сквозь жидкость. Но в ней нет ничего такого, что напоминало бы чёрные дыры. И это не случайно. Чёрные дыры обязаны своим существованием гравитационным силам, которые описываются общей теорией относительности Эйнштейна. Но ни один материал не обладает свойствами, которыми общая теория относительности наделяет пространство-время. Для этого есть очень веские причины. В главе 10, где я описывал чёрные дыры, мы увидели, что свойства мира, в котором царствуют квантовая механика и теория относительности, радикально отличаются от всего, что может породить одно только обычное вещество. В частности, голографический принцип — опора современного понимания чёрных дыр — кажется, требует совершенно нового поведения вещества, которого я не видел в известных мне конденсированных средах. На самом деле это признаёт и Лафлин, только он использует данный факт в пользу точки зрения, согласно которой чёрные дыры не могут иметь многих приписываемых им свойств, например хоккингского излучения, в то время как большинство физиков не сомневается в реальности последнего.

Но предположим, что кто-то сумел найти эмерджентную систему, обладающую именно такими свойствами, которые нам нужны. Свойства эмерджентных систем не очень гибкие. Такие системы могут иметь в своей основе очень широкое разнообразие исходных микроскопических состояний, но, как я уже говорил, эти микросостояния приводят к достаточно ограниченному набору конечных макросостояний. Например, вы можете в достаточно широких пределах варьировать структуру и свойства атома гелия, но это не приведёт к каким-либо существенным отличиям в свойствах образуемой гелием сверхтекучей жидкости. Важно лишь, чтобы атомы гелия вели себя как соударяющиеся и отскакивающие друг от друга бильярдные шары. Нечувствительность к начальному микроскопическому состоянию — это та вещь, за которую физики больше всего любят эмерджентные системы. Но вероятность того, что одно из небольшого числа возможных фиксированных конечных состояний окажется состоянием с невероятно тонко настроенными свойствами нашего мира, крайне незначительна. В частности, Лафлин так и не даёт объяснения наиболее драматической из этих прекрасных настроек — небольшой, но ненулевой космологической постоянной. Идея построения Вселенной на основе эмерджентных свойств конденсированных сред представляется мне тупиковой.

## Естественный отбор и Вселенная

Ли Смолин попытался объяснить специфические свойства мира — антропные свойства — путём прямой аналогии с дарвиновской эволюцией<sup>1</sup>, причём не в общем вероятностном смысле, как в моей аналогии, которую я приводил ранее, а в гораздо более узком, конкретном смысле. К чести Смолина, он почти сразу же понял, что теория струн способна описать гигантский набор возможных вселенных, и попытался использовать этот факт при построении своей теории. Хотя я и чувствую, что идея Смолина ведёт в тупик, я считаю, что его титанические усилия заслуживают более серьёзного анализа. Вот суть его теории.

<sup>1</sup> Ли Смолин, «Жизнь космоса» (Lee Smolin, *The Life of the Cosmos*).

В любой вселенной, в которой есть гравитация, могут образовываться чёрные дыры. Смолин рассуждает о том, что может происходить внутри чёрных дыр, в частности в точке сингулярности. Он считает, на мой взгляд, совершенно обоснованно, что вместо коллапса пространства в точке сингулярности происходит воскрешение вселенной. Новые вселенные рождаются внутри чёрных дыр. Если это так, считает Смолин, то чёрные дыры формируются во вселенных, которые сами находятся внутри чёрных дыр, которые формируются во вселенных — и т. д., что приводит к эволюции в направлении максимальной *приспособленности* вселенных. Под приспособленностью Смолин понимает способность производить большое количество чёрных дыр и, таким образом, плодить многочисленное потомство. Затем Смолин предполагает, что наша Вселенная обладает наибольшей приспособленностью из всех возможных, то есть законы природы в нашем кармане таковы, что они приводят к максимально возможному количеству чёрных дыр. Из чего он заключает, что в антропном принципе нет никакой необходимости. Вселенная не приспособлена идеально для жизни, она идеально приспособлена для производства чёрных дыр.

Идея гениальна, но я не понимаю, что она объясняет. Мы сталкиваемся с двумя серьёзными проблемами. Во-первых, идея Смолина слишком похожа на дарвиновскую, и она требует, чтобы одно поколение отличалось от другого очень небольшими нарастающими изменениями. Как я уже отмечал ранее, модель, предлагаемая ландшафтом теории струн, работает прямо противоположным образом. В оправдание Смолина я должен сказать, что все наши знания о Ландшафте были получены уже после того, как он опубликовал свою теорию. В то время, когда Смолин разрабатывал свою теорию, рабочей парадигмой струнных теоретиков был плоский суперсимметричный регион ландшафта, где все изменения действительно происходят очень маленькими шажками.

Вторая проблема — космологическая, и она имеет очень мало общего с теорией струн. Нет никаких оснований полагать, что мы живём во вселенной, максимально приспособленной для производства чёрных дыр. Смолин приводит ряд аргументов, пытаясь доказать, что любые изменения законов природы в нашей Вселенной приведут к уменьшению количества образующихся в ней чёрных дыр, но я нахожу эти ар-

гументы малоубедительными. В главе 5 я объяснял, что всё обстоит как раз наоборот и что это поистине чудо, что наша Вселенная катастрофически не наполнена чёрными дырами. Относительно небольшое увеличение неоднородности вещества на начальном этапе приведёт к тому, что всё вещество Вселенной сколлапсирует в чёрные дыры задолго до образования звёзд и галактик. Кроме того, увеличение масс элементарных частиц опять же приведёт к росту количества чёрных дыр, поскольку вещество будет более восприимчиво к гравитационному притяжению. На самом деле вопрос следует ставить по-другому: «Почему во Вселенной так мало чёрных дыр?» Ответ, который кажется мне наиболее естественным, заключается в том, что многие, может быть даже большинство карманных вселенных, имеют гораздо больше чёрных дыр, чем наша, но они представляют собой места со слишком неблагоприятными условиями, в которых жизнь не смогла сформироваться.

И вообще аргумент, что мы живём в мире, который максимально приспособлен для собственного воспроизведения, имеет, на мой взгляд, существенные недостатки. Пространство действительно воспроизводится — на этом зиждется хорошо изученный механизм инфляции, — но максимально приспособленная для воспроизводства вселенная не имеет ничего общего с нашим собственным миром. Наиболее приспособленная в смолинском смысле вселенная — это такая вселенная, которая наиболее быстро реплицирует сама себя, а для этого необходима большая космологическая постоянная. Но нет никакого соответствия между приспособленностью для воспроизведения и приспособленностью для поддержания разумной жизни. Наша Вселенная с её ультрамалой космологической постоянной и нехваткой чёрных дыр является очень малоприспособленной для репликации.

Вернувшись к аналогии с деревом жизни, мы увидим, что в биологии приспособленность к максимальной репродуктивности и приспособленность к мышлению тоже не пересекаются. Максимально приспособленными в этом смысле существами являются не люди, а бактерии.

Бактерии размножаются настолько быстро, что единственная клетка способна за 24 часа произвести более десяти триллионов потомков! По некоторым оценкам, общее количество бактерий на Земле состав-



Человек, возможно, в каких-то отношениях и более приспособлен, но только не в отношении воспроизводства. Мир, который способен поддерживать жизнь, также является очень приспособленным, но опять же, не в отношении его способности к воспроизводству.

Пойдём другим путём. Представьте себе Грегора Замзу в тот роковой день, когда он проснулся в облике гигантского таракана<sup>1</sup>. Очнувшись от тумана сна, он спрашивает себя: «Что я за существо?» Следуя логике Смолина, ответ должен быть таким: «С большой вероятностью я должен принадлежать к классу существ, которые наиболее приспособлены для воспроизводства и поэтому наиболее распространены в природе. Следовательно, я — бактерия».

Но через несколько секунд отражение в зеркале покажет ему ложность первого предположения. Перефразируя Декарта, он может заключить: «Я мыслю, значит, я не бактерия. Я — какое-то особенное, замечательное существо с недюжинными умственными способностями. Я необычен. Я весьма далёк от критерия обычного». Мы так же ни секунды не сомневаемся в том, что мы не обычные, что мы не принадлежим к чему-то усреднённому. Мы не принадлежим к ветви Мегаверсума, которая наиболее приспособлена для воспроизведения. Мы принадлежим к ветви, которая может сказать: «Я мыслю, значит, космологическая константа должна быть очень мала».

Моя реакция на идеи Смолина была достаточно жёсткой. Но эта жёсткость относилась к конкретным техническим вопросам, а не к общей философии Смолина. Мне кажется, что Смолин заслуживает большого уважения за многие важные достижения. Смолин был первым, кто признал, что разнообразие вакуумов теории струн может играть важную позитивную роль в объяснении, почему мир такой, какой он есть. Он также был первым, кто попытался использовать это разнообразие для объяснения уникальных свойств нашего мира.

Но важнее всего, что он сформулировал насущный вопрос, требующий ответа: «Каким образом, используя самые глубокие и мощные идеи современной физики, можно дать подлинно научное объяснение кажущейся очевидности разумного замысла?» Он решительно высту-

<sup>1</sup> Франц Кафка, «Превращение».

пил против предрассудков струнных теоретиков, и я думаю, что он был тогда более прав, чем они.

Как я уже неоднократно подчёркивал, мне не известны удовлетворительные объяснения особых свойств нашего кармана, кроме населённого ландшафта, объяснения, не требующие привлечения сверхъестественных сил. Но с нашим сегодняшним пониманием населённого ландшафта есть реальные проблемы, и некоторые из них весьма серьёзны. На мой взгляд, большая проблема состоит в том, как быть с вечной инфляцией — механизмом, который призван заселять ландшафт. Ни клонирование пространства, ни раздувание пузырей метастабильного вакуума серьёзными проблемами не являются. Оба этих явления основаны на наиболее надёжных принципах общей теории относительности и квантовой механики. Но никто не имеет чёткого понимания, как на основе этих явлений сделать какие-либо предсказания или хотя бы статистические предположения относительно нашей Вселенной.

Для Мегаверсума, заполненного бесконечными карманными вселенными, антропный принцип является эффективным инструментом отбора и исключения большинства из них из списка кандидатов на роль нашей Вселенной. Те вселенные, которые не допускают существования жизни, подобной нашей, могут быть брошены в мусорное ведро. Антропный принцип в такой формулировке обладает мощной объяснительной силой для ответов на вопросы типа: «Почему космологическая постоянная так мала?» Но большая часть полемики вокруг антропного принципа ставит на повестку дня более амбициозную идею: надежду на то, что он может заменить серебряную пулю в предсказании свойств всего окружающего мира.

Эти ожидания необоснованны. Нет никаких причин, по которым каждая особенность природы должны определяться возможностью существования жизни. Часть особенностей могут быть выведены из строгих математических рассуждений, некоторые — из антропного принципа, а некоторые представляют собой чистые случайности.

Как всегда, мир умных рыб (см. главу 6) является удобной аналогией для того, чтобы рассмотреть возможные перспективы.

Давайте посмотрим, как эти рыбы изучают свой мир.

Со временем осетрологам удалось убедить других рыб, что населённая ими планета вращается вокруг раскалённого светящегося ядерно-

— звезды, дающей энергию для нагревания воды. Теперь вопрос, которым были одержимы их лучшие умы, предстал в совершенно новом свете. Понимая, что температура океана зависит от расстояния до звезды, они сформулировали новую головоломку: «Почему орбитальное расстояние нашей планеты от источника тепла так тонко настроено?» Но ответ осетрологов был тем же самым: «Вселенная велика. В ней много звёзд и планет, и какая-то очень малая часть этих планет совершенно случайно оказалась на благоприятном для существования жидкой воды и рыб расстоянии от своих звёзд».

Но некоторые фишки не удовлетворились таким ответом. Они справедливо заметили, что температура на поверхности планеты зависит не только от орбитального расстояния. Светимость звезды — интенсивность, с которой она излучает энергию, — тоже должна входить в уравнение. «Мы могли бы находиться вблизи небольшой тусклой звезды или вдалеке от яркого гиганта. Существует целый набор вариантов. Ихтиотропный принцип даёт здесь сбой. Он никоим образом не может объяснить, почему наша планета находится именно на таком, а не на другом расстоянии от звезды».

Но в намерения осетрологов никогда и не входило объяснение каждой особенности природы. Их утверждение, что Вселенная является достаточно большой, чтобы содержать очень широкий набор вариантов природных условий, остаётся в силе. Аргумент, что ихтиотропный принцип не может объяснить всё, — это лишь логическая уловка, придуманная фишками для того, чтобы опровергнуть его.

Существует очень тесная параллель между этой историей и антропным принципом. Возьмём, например, космологическую постоянную и степень неоднородности ранней Вселенной. В главе 2 я рассказывал, как Вайнберг объясняет факт малости космологической постоянной. Если бы она была намного больше, то неоднородности, присутствующие в ранней Вселенной, не смогли бы превратиться в галактики. Но предположим, что исходная неоднородность была немного больше. В этом случае нас устроит и несколько большее значение космологической постоянной. Как и в случае орбитального расстояния и светимости звезды, есть целый набор взаимосвязанных значений космологической постоянной и степени неоднородности, приводящих к возникновению жизни или, по крайней мере, галактик. Антропный

принцип сам по себе бессилён для выбора между этими парами значений. Некоторые физики готовы принять это в качестве аргумента против антропного принципа. Ещё раз повторю, что я расцениваю это как логическую уловку.

Вполне возможно, что осетрологи с фишиками сумели в конце концов перейти к более конструктивному диалогу. Для этого они пригласили астрофишиков — экспертов по образованию и эволюции звёзд. Эти учёные рыбы изучили процесс формирования звёзд из гигантских газовых облаков и, как и ожидалось, обнаружили, что образующиеся звёзды обладают очень широким диапазоном светимостей. Не имея возможности непосредственного измерения светимостей различных звёзд, астрофишики тем не менее пришли к выводу, что звёзды, имеющие светимость в определённом диапазоне, должны встречаться чаще других. Астрофишики вычислили, что наиболее долгоживущие звёзды должны иметь светимость в диапазоне от  $10^{26}$  до  $10^{27}$  ватт. Их звезда, по всей видимости, попадает в этот диапазон.

Теперь за дело взялись осетрологи. При такой светимости звезды планета должна располагаться от неё на расстоянии около ста миллионов миль, чтобы климат планеты был умеренным, а на поверхности существовало достаточно жидкой воды. Это предположение не было настолько точным, как им хотелось бы. Как и любой вероятностный результат, оно могло оказаться и неправильным. Но все же это было лучше, чем полное отсутствие предположения.

Общим между двумя этими ситуациями — существованием жидкой воды и формированием галактик — является то, что одних только антропных (или ихтиотропных) соображений оказывается недостаточно для объяснения или предсказания всего на свете. Это неизбежно, если на Ландшафте оказывается более чем одна долина с пригодными для жизни условиями, а когда ландшафт состоит из  $10^{500}$  долин, вероятность существования множества пригодных для жизни долин выглядит достаточно высокой. Назовём пригодный для существования жизни вакуум *антропно приемлемым*. Обычные физика и химия в антропно приемлемой долине могут быть очень похожи на наши. Там могут существовать электроны, ядра, планеты, звёзды, галактики и законы гравитации, почти такие же, как и в нашем мире. Различия могут обнаруживаться лишь в таких вещах, которые

интересуют только физиков высоких энергий. Например, в природе существует множество частиц:  $t$ -кварк, тау-лептон и другие, — свойства которых вряд ли оказывают какое-то серьёзное влияние на обычный мир. Различия между такими мирами будет очень сложно обнаружить без помощи гигантских ускорителей заряженных частиц. Некоторые из этих вакуумов (включая наш собственный) могут содержать множество новых типов частиц, не оказывающих практически никакого влияния на обычную физику. Есть ли способ объяснить, почему мы живём в каком-то одном конкретном из этих антропно приемлемых вакуумов? Очевидно, что антропный принцип нам в этом не помощник, потому что все подобные вакуумы допускают существование жизни.

Этот вывод вызывает разочарование. Он оставляет теорию открытой для серьёзных обвинений в том, что она не обладает предсказательной силой, к которым учёные особенно чувствительны. Для решения этой проблемы многие космологи пытались дополнить антропный принцип дополнительными вероятностными предположениями. Например, вместо того чтобы спрашивать, почему масса  $t$ -кварка имеет конкретное значение, можно попытаться спросить, какова вероятность того, что масса  $t$ -кварка находится в определённом диапазоне.

Вот одно из таких предположений. В конце концов мы достаточно хорошо изучим Ландшафт, чтобы вычислить, какое количество долин будут содержать  $t$ -кварки с массами в том или ином диапазоне. На некоторые диапазоны масс придётся много долин, на некоторые — мало. Дальше очевидно: значение массы  $t$ -кварка, на которое приходится большее количество долин, более вероятно. Но для реализации такой программы исследований нам необходимо знать о Ландшафте гораздо больше, чем мы знаем сегодня. Но давайте поставим себя на место будущих исследователей, имеющих подробную карту Ландшафта, на которую нанесены все возможные вакуумы с любым мыслимым набором свойств. Самым естественным предположением будет, что относительная вероятность двух выбранных значений какой-либо константы будет соответствовать отношению количества вакуумов, в которых константа имеет выбранные значения. Например, если количество вакуумов, в которых масса какой-то частицы имеет значение  $M_1$ , вдвое больше количества вакуумов, в которых масса этой

что вероятность того, что частица имеет массу  $M_1$ , вдвое выше вероятности, что частица имеет массу  $M_2$ . Если бы нам повезло, то мы могли бы обнаружить, что определённое значение массы t-кварка соответствует самому большому числу долин. Рассуждая в этом ключе, мы могли бы предположить, что именно такое значение массы и должно быть у t-кварка в нашем мире.

Ни одно единичное предсказание такого рода, основанное на вероятности, не может подтвердить или опровергнуть теорию, но множество успешных статистических прогнозов способно придать нашей уверенности больший вес.

Идея заманчива, но есть серьёзные основания подвергнуть такую логику сомнению. Не забывайте, что Ландшафт — это всего лишь пространство возможностей. Если бы мы были фишиками, то могли бы аналогичным образом размышлять о ландшафте всевозможных планет, рассчитывая найти среди них любые варианты, допускаемые Законами Физики, например планеты, ядро которых состоит из чистого золота. Уравнения физики допускают существование как золотых, так и железных шаров<sup>1</sup>. Следуя такой логике, фишики могли бы прийти к выводу, что вероятность, что их планета имеет железное ядро<sup>2</sup>, точно такая же, как вероятность, что она имеет золотое ядро, но это очевидная ошибка.

В действительности мы хотим знать не количество *возможных* видов планет, а количество *реально* существующих планет каждого вида. Для этого нам нужны нечто большее, чем абстрактный подсчёт возможностей. Мы должны знать, как и в каких пропорциях синтезируются железо и золото в термоядерных процессах, происходящих в недрах звёзд.

Железо является наиболее стабильным из всех химических элементов. Среди всех атомных ядер труднее всего выбить протон или нейтрон из ядра железа. Следовательно, процессы термоядерного синтеза,

<sup>1</sup> Можно было бы подумать, что планеты в форме тетраэдров, кубов и даже морских ежей тоже допускаются уравнениями физики. Но это не так. Если планета достаточно массивна, чтобы удержать атмосферу, гравитация быстро придаст ей форму шара. Так что возможно далеко не всё.

<sup>2</sup> Ядро Земли состоит в основном из железа.

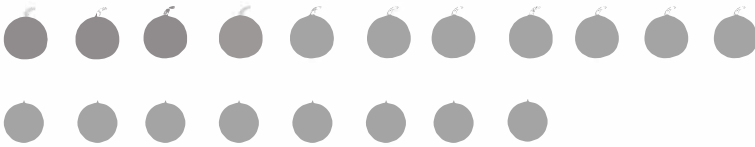
ах звёзд, будут приводить к синтезу гелия из водорода, затем лития, бериллия, бора, углерода и более тяжёлых элементов, вплоть до железа. В результате железо окажется наиболее распространённым во Вселенной химическим элементом по отношению к более тяжёлым, к которым относится и золото. Именно поэтому железо относительно дешево, а золото стоит более тысячи долларов за унцию. Золото значительно более редкий элемент, чем железо. Почти все планеты земной группы должны иметь железное ядро, а не золотое. По сравнению с вероятностью обнаружить планету с железным ядром вероятность обнаружить планету с золотым ядром стремится к нулю. Поэтому нам нужно научиться считать *актуальности*, а не возможности.

При подсчёте карманных вселенных мы должны руководствоваться той же логикой, которую использовали при подсчёте планет. И тут мы встречаемся с ужасной проблемой вечной инфляции. Из-за своей вечности вечная инфляция, по крайней мере, как мы её понимаем, производит бесконечное количество карманов и, соответственно, бесконечное разнообразие карманных вселенных. Это приводит нас к старой математической проблеме: как сравнить две бесконечности.

Какая из бесконечностей больше и насколько?

Проблема сравнения бесконечных чисел восходит к работам Георга Кантора, который в конце XIX века задался вопросом: как сравнить два множества, каждое из которых содержит бесконечное количество элементов? Для начала разберёмся, как мы сравниваем обычные числа. Представим, что у нас есть куча яблок и куча апельсинов. Очевидный ответ состоит в том, что нужно просто взять и пересчитать количество фруктов в каждой куче, но поскольку мы хотим знать всего лишь, какая куча больше, мы можем воспользоваться более простым способом, который даже не требует от нас умения считать. Выложим яблоки в одну линию, затем выложим рядом с ними апельсины так, чтобы рядом с каждым яблоком лежал апельсин. Если какие-то яблоки остались лишними, значит, яблок больше, чем апельсинов. Если остались лишние апельсины, значит, апельсинов больше, чем яблок. Если каждому яблоку соответствует ровно один апельсин, значит, количества яблок и апельсинов одинаковы.





Кантор утверждал, что то же самое можно проделать и с бесконечными (он назвал их трансфинитными) множествами. Возьмём для примера множество чётных и множество нечётных натуральных чисел. Каждое из них содержит бесконечное количество элементов, но какое из этих бесконечных чисел больше? Запишем элементы этих множеств один под другим и посмотрим, сумеем ли мы расположить их так, чтобы каждому чётному числу соответствовало одно нечётное. Математики называют это *взаимно однозначным соответствием*.

1	3	5	7	9	11	13	...
2	4	6	8	10	12	14	...

Обратите внимание, что эти два списка в конечном итоге должны содержать все чётные и все нечётные числа. Кроме того, они в точности совпадут поэлементно, на основании чего Кантор пришёл к выводу, что количество чётных чисел равно количеству нечётных, несмотря на то что оба множества бесконечны.

А что можно сказать про общее количество натуральных чисел? На первый взгляд кажется, что общее количество натуральных чисел вдвое больше, чем количество чётных. Но Кантор категорически не согласился с таким выводом. Множество чётных чисел может быть поставлено во взаимно однозначное соответствие с множеством всех натуральных чисел.

1	2	3	4	5	6	7	...
2	4	6	8	10	12	14	...

, которую построил Кантор, количество чётных чисел является точно таким же, как и количество всех натуральных чисел! Более того, множество чисел, кратных 10, — 10, 20, 30, 40 и т. д. — это бесконечное множество точно такого же размера, как и множество натуральных чисел. Натуральные числа, чётные или нечётные числа, числа, которые делятся на десять, — это всё примеры того, что математики называют бесконечными *счётными* множествами<sup>1</sup>, и все они имеют один и тот же размер.

Давайте проведём с бесконечными числами мысленный эксперимент. Представьте себе бесконечный мешок, в котором лежат все натуральные числа, записанные на клочках бумаги. Сначала тщательно потрясём мешок, чтобы все бумажки как следует перемешались. Теперь засунем в него руку и вытащим одну бумажку. Какова вероятность того, что записанное на бумажке число будет чётным?

Напрашивающийся ответ: 50 процентов. Поскольку половина чисел в мешке чётные, то и вероятность вытащить чётное число должна быть равна одной второй. Но мы не можем проделать такой эксперимент в реальном мире, потому что никто не может сделать бесконечный мешок для натуральных чисел. Для проверки теории мы можем прибегнуть к небольшой хитрости и использовать конечный мешок, содержащий, скажем, первую тысячу натуральных чисел. Если мы повторим эксперимент много раз, то обнаружим, что вероятность вытянуть чётное число действительно близка к одной второй. Затем мы можем провести этот же эксперимент с мешком, в котором находятся первые десять тысяч натуральных чисел. И опять мы обнаружим, что вероятность вытащить чётное число равна одной второй. Проводя эксперимент с первыми 100 000 натуральных чисел, с первым миллионом натуральных чисел, с первым миллиардом и т. д., мы каждый раз будем получать вероятность, равную одной второй. Разумно экстрапо-

<sup>1</sup> По мнению Кантора, не все бесконечности одинаковы. Натуральные числа, чётные числа, нечётные числа образуют бесконечное счётное множество. Количество действительных чисел, включающее все возможные дроби, иррациональные и трансцендентные числа, представляет собой гораздо большее множество, элементы которого не могут быть взаимно однозначно сопоставлены с элементами множества натуральных чисел. Но все бесконечные счётные множества имеют один и тот же размер! Карманные вселенные похожи на натуральные числа тем, что их тоже можно пересчитать.

, что вероятность по-прежнему останется равной одной второй.

Но погодите. Мы можем изменить содержимое мешка следующим образом. Положим в первом эксперименте в мешок *одну* тысячу первых чётных чисел и *две* тысячи первых нечётных. Теперь нечётных чисел в мешке вдвое больше, чем чётных, и вероятность вытащить чётное число равна одной третьей. Повторим эксперимент с первыми 10 000 чётных и первыми 20 000 нечётных чисел и снова получим вероятность, равную одной третьей. Как и в предыдущем эксперименте, мы можем экстраполировать этот результат на бесконечное количество чисел и прийти к выводу, что искомая вероятность равна одной третьей. На самом деле, изменяя условия эксперимента, мы можем получить любое значение вероятности.

Вечно раздувающаяся Вселенная — это бесконечный мешок, только наполненный не клочками бумажек с числами, а карманными вселенными. Это мешок, в котором любой наперёд заданный вариант вселенной — любая долина Ландшафта — содержится бесконечно счётное количество раз. Не существует очевидного математического способа сравнить количество экземпляров одного вида карманной вселенной с количеством другого и объявить, что один вариант является более вероятным, чем другой. Следствие из этого факта представляется очень тревожным: похоже, что нет способа определить относительную распространённость различных антропно-приемлемых вакуумов.

*Проблема меры* (мерой в космологии называется относительная частота встречаемости различных вакуумов) сильно беспокоит многих великих космологов, в частности Виленкина и Линде. Она может оказаться ахиллесовой пятой вечной инфляции. С одной стороны, очень трудно понять, как избежать вечной инфляции в какой-нибудь теории, содержащей интересный ландшафт. С другой стороны, не менее трудно понять, как использовать получившуюся теорию для предсказания чего бы то ни было в традиционном научном смысле.

В прошлом физика уже сталкивалась с многочисленными проблемами, связанными с бесконечными числами: с ультрафиолетовой катастрофой, успешно предотвращённой Максом Планком, или с расходимостями в первых вариантах квантовой теории поля. Даже

проблемы чёрных дыр, из-за которых спорили Хокинг и 'т Хоофт, тоже связаны с бесконечностью. Согласно расчётам Хокинга, горизонт чёрной дыры способен безвозвратно поглотить бесконечное количество информации. Всё это были глубокие проблемы трансфинитных или бесконечных чисел. И в каждом случае приходилось находить новые физические принципы, прежде чем мог быть достигнут какой-либо прогресс. В случае Планка это была квантовая механика, а именно открытие Эйнштейном того, что свет состоит из квантов. Бесконечные числа, досаждавшие квантовой теории поля, были побеждены только после открытия Кеннетом Вильсоном принципа перенормировки. История с чёрными дырами продолжается до сих пор, но контуры решения задачи уже намечены в виде голографического принципа. В каждом случае оказывалось, что классические методы расчёта завышали количество степеней свободы, которыми описывается мир.

Я считаю, что проблема меры также потребует новых крупных идей, прежде чем мы сможем понять, как делать предсказания относительно Ландшафта. Если бы меня попросили сделать какие-либо предположения, я бы сказал, что тут должно иметь место что-то типа голографического принципа и что информация, находящаяся за границами нашего горизонта, содержится в реликтовом излучении в нашем собственном кармане. Но если бы я был противником населённого ландшафта, я бы избрал целью моей атаки именно эту концептуальную проблему вечной инфляции.

Помимо проблемы меры имеются ещё и очень серьёзные проблемы, связанные с практическими трудностями в получении предсказаний, которые можно было бы проверить путём эксперимента или наблюдений. Но я думаю, что тут ситуация далеко не безнадежна. Существует несколько предсказаний, которые могут быть проверены в ближайшем будущем.

## Начало инфляции

В главе 5 я объяснил, как на раннем этапе существования Вселенной (который наблюдается в виде реликтового излучения) на финальной

стадии инфляции, которая завершила падение с обрыва в нашу долину, была достигнута чрезвычайно высокая однородность распределения вещества. Оставшиеся едва заметные неоднородности стали теми семенами, из которых выросли галактики. Мы наблюдаем комковатую структуру распределения вещества во Вселенной на всех масштабах, от крошечных космических пылинок до занимающих почти полнеба гигантских образований. Космические комки и возмущения, которые мы наблюдаем сейчас, являются ископаемыми остатками различных эпох. Важно помнить о простом правиле: чем больше масштаб неоднородности, тем от более ранней эпохи она осталась.

Если нам очень, очень повезло, то, возможно, самая крупная из наблюдаемых неоднородностей в распределении реликтового излучения несёт информацию о состоянии Вселенной непосредственно перед началом инфляционной фазы, иными словами, о том моменте, когда Вселенная зависла над инфляционным обрывом. Если это так, то самая крупная неоднородность должна быть чуть менее комковатой, чем более мелкие неоднородности, которые возникли, когда инфляция уже продолжалась какое-то время. И похоже, что действительно есть наблюдательные данные, свидетельствующие, что наиболее крупные неоднородности являются более гладкими, чем остальные. Будет совсем смело предположить, что эти самые крупномасштабные неоднородности могут нести информацию о формировании нашего пузыря в эпоху с большей, чем сейчас, космологической постоянной.

Если же нам повезло настолько, что инфляция не продолжалась слишком долго, чтобы уничтожить доказательства первоначальной кривизны пространства, то наш пузырь должен нести следы той эпохи. Если наша карманная вселенная родилась в процессе пузырьковой нуклеации, то её кривизна должна быть *отрицательной* — сумма углов космического треугольника всегда должна быть 180 градусов.

На сегодняшнем уровне точности наших наблюдений нам пока не удаётся найти никаких свидетельств отрицательной кривизны нашей Вселенной. С одной стороны, если инфляционная фаза продолжалась очень долго, то мы и не обнаружим никакой отрицательной кривизны. Но с другой стороны, если мы обнаружим отрицательную кривизну, то это будет неоспоримым доказательством того, что наша Вселенная

родилась в форме крошечного пузырька в вакууме с большей, чем нынешняя, космологической постоянной.

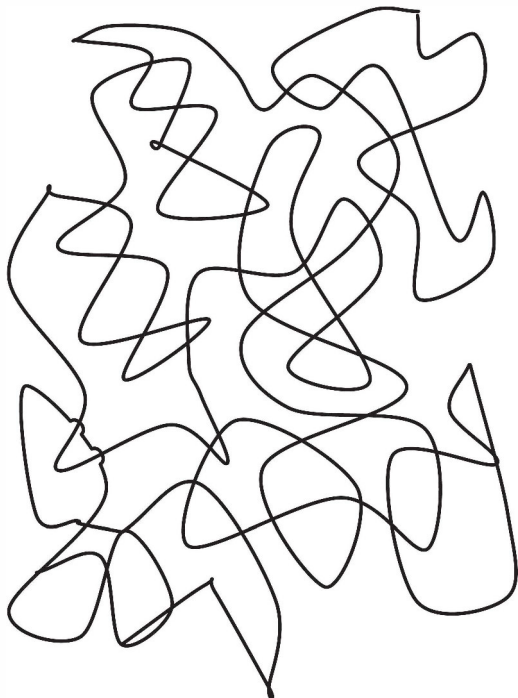
## Суперструны в небесах

Мы исчерпали далеко не все наши возможности исследования Вселенной. Возможно ли реально обнаружить суперструны? Очевидно, что они слишком малы для наших экспериментальных методов. Но ведь то же самое можно было сказать и о микроскопических квантовых флуктуациях, происходивших во время инфляционной фазы, однако в главе 5 мы увидели, что расширение Вселенной и гравитация удивительным образом превращают эти микроскопические возмущения во вполне наблюдаемые эффекты, проявляющиеся в неравномерности распределения фона реликтового излучения, и в конце концов именно они приводят к появлению видимых сегодня на небе галактик и звёзд. Сегодня мы наблюдаем последствия микроскопических квантовых флуктуаций в виде гигантского расширяющегося небесного свода, расписанного безумным художником-пуантилистом, и это — поистине невероятный факт, ставший полной неожиданностью для большинства физиков, привыкших воспринимать квантовые эффекты как нечто, присущее исключительно микромиру. Так что, наверное, не следует с порога отвергать мысль о том, что такие мелкие объекты, как суперструны, не способны произвести что-либо подобное, — скажем, превратить небосвод в гигантский холст Джексона Поллока.

Опираясь на работы Тибо Дамура, Александра Виленкина, Джо Полчински и других, теоретики принялись исследовать новые, чрезвычайно захватывающие явления, связанные с инфляционной фазой. Причиной инфляции является энергия вакуума, предшествовавшего нынешнему. Эта энергия никуда не исчезла после того, как Вселенная упала с потенциального обрыва в нашу сегодняшнюю долину Ландашафта, а преобразовалась в более простые формы энергии — в излучение и вещество, из которых состоит наша Вселенная.

Но энергия может существовать и в других формах. Часть энергии могла преобразоваться в потенциальную энергию чрезвычайно запутанного клубка струн, напоминающего моток шерсти, после того как

тот попал в лапы коту. Этот клубок может содержать не только обычные струны теории струн, но и D-струны, разработанные Полчински.



Если такой клубок возник в ранней Вселенной, то в процессе последующего расширения он тоже раздуется до огромных масштабов: крошечные микроскопические петли и узелки разрастутся до размеров в сотни миллионов световых лет. Но какая-то часть струн сохранится до настоящего времени, полощась, как гигантские бельевые верёвки на ветру, на просторах Вселенной. Эти струны не будут наблюдаться в оптические или радиотелескопы, но, к счастью, есть ещё один способ их обнаружить. Дамур и Виленкин показали, что такие космические струны будут излучать гравитационные волны (волноподобные возмущения гравитационного поля), которые, возможно, удастся зафиксировать уже в следующем десятилетии.

Обнаружение таких струн среди звёзд стало бы триумфом теории струн.



Изучая эти космические суперструны, если они действительно существуют, мы могли бы очень многое сказать если не обо всём Ландшафте, то, по крайней мере, о нашей ближайшей его окрестности. Полчински с коллегами тщательно изучили условия, при которых клубок струн превращается во вселенскую сеть. Эти условия очень чувствительны к таким вещам, как размерность Ландшафта, наличие бран и потоков в компактифицированных измерениях и т. п. Возможно, вместо того чтобы строить всё более гигантские ускорители элементарных частиц, нужно просто внимательнее присмотреться к звёздному небу над головой?

## Высокоэнергетическая физика

Астрономические и космологические наблюдения, вероятно, — дело будущего, а сегодня мы ещё не достигли пределов наших возможностей в лабораторных экспериментах. Самые большие надежды на получение в краткосрочной перспективе новых революционных сведений о Законах Физики всегда возлагались на высокоэнергетическую физику и её ускорители элементарных частиц. Возможно, мы уже приближаемся к пределу наших возможностей, но нет никаких сомнений в том, что мы сумеем раздвинуть границы наших знаний ещё по крайней мере на один порядок. Крупнейший в мире ускоритель и, вероятно, единственный достаточно большой, чтобы добыть для нас много новой информации, находится вблизи Женевы в Швейцария, в CERN'e (Европейский центр ядерных исследований). Он называется Большим адронным коллайдером, или БАК. Изначально он был задуман с целью изучения бозона Хиггса, но он также представляет собой идеальную машину для обнаружения суперсимметричных близнецов элементарных частиц.

В главе 8 я упомянул, что многие физики считают, что суперсимметрия поджидает нас буквально «за углом». Ещё 25 лет назад было выдвинуто предположение, согласно которому наличие суперсимметрии гарантирует, что гигантские квантовые флуктуации вакуума не приведут к возникновению огромной массы бозона Хиггса, которая обрушит Стандартную модель. Возможно, суперсимметрия действи-

тельно ждёт нас если не за ближайшим углом, то за следующим. Большинство физиков ожидают, что так оно и есть, по крайней мере такое впечатление создаётся при взгляде на количество публикаций по этой теме.

Но есть ещё одна возможность. Так же как и в ситуации с энергией вакуума (или с космологической постоянной), слишком большая масса бозона Хиггса привела бы к невозможности появления жизни в нашей карманной вселенной. Поэтому, возможно, решением является не суперсимметрия, а апелляция к антропному принципу. Если мир достаточно велик и Ландшафт достаточно разнообразен, то в каких-то отдельных областях Мегаверсума масса бозона Хиггса будет не слишком большой, чтобы предотвратить возможность появления жизни. Как и в случае с космологической постоянной, апелляция к суперсимметрии в этом случае окажется излишней.

Эти два объяснения не обязательно исключают друг друга. Возможно, что условием для того, чтобы масса бозона Хиггса в какой-то долине была мала, является существование рядом с ней, теперь уже буквально «за углом», другой, суперсимметричной долины. Возможно даже, что это условие характерно для всех долин с малой массой бозона Хиггса.

Или наоборот, может оказаться, что подавляющее большинство вакуумов с малой массой бозона Хиггса полностью лишены какой-либо суперсимметрии. Изучение Ландшафта всё ещё находится в зачаточном состоянии, и мы не знаем ответа на этот вопрос. Моё личное предположение состоит в том, что суперсимметрия не нужна, и я упоминал об этом в одной из статей. Но с тех пор я уже дважды поменял своё мнение, и, скорее всего, не в последний раз.

В попытке предсказать относительную вероятность обнаружения и необнаружения суперсимметрии мы снова приходим к проблеме меры. Возможно, мы должны на этом остановиться, но есть сильное искушение попытаться обойти препоны и прорваться вперёд. Такие теоретики, как Майкл Дуглас, Шамит Качру и другие, заняты разработкой методов, позволяющих подсчитать на Ландшафте количество разных мест с различными свойствами. Я имею в виду количество возможностей, а не количество реальных карманных Вселенных. Не имея никакой другой информации, мы могли бы прийти к выводу, что если

количество антропно приемлемых вакуумов с нарушенной суперсимметрией намного больше, чем число вакуумов вообще без суперсимметрии, то существование нарушенной суперсимметрии в нашем мире весьма вероятно. Но проблема меры представляет собой ещё одного огромного слона в комнате, который тихо посмеивается над нами.

Несмотря на реальные трудности в проверке гипотезы существования Ландшафта, вечной инфляции и антропного принципа, есть много способов верификации теории. Математическая согласованность может не впечатлять прагматичных экспериментаторов, но не следует её недооценивать. Согласованные теории, объединяющие квантовую механику и общую теорию относительности, пока ещё не созданы, поэтому у теории струн практически нет конкурентов. А если альтернативы нет и при этом теория струн предсказывает существование богатого ландшафта, то населённый ландшафт становится принимаемым по умолчанию — так сказать, «теорией, задающей шаг».

Но отказываться от перспектив более прямой проверки теории, конечно же, преждевременно. Это правда, что теория и эксперимент обычно идут рука об руку, но это не всегда так. Потребовалось более двух десятилетий, прежде чем теория инфляции Алана Гута была подтверждена наблюдениями, а на первых порах почти все признавали его идею интересной, но абсолютно непроверяемой. Я думаю, что даже сам Алан был скептически настроен в отношении перспектив подтверждения своей теории.

В ещё более щекотливом положении оказалась теория Дарвина. Она основывалась на общих наблюдениях над миром живой природы и очень прозорливом предчувствии. Но прямые экспериментальные подтверждения теории эволюции казались совершенно невозможными без наличия машины времени, способной переместить исследователя на миллионы, если не на миллиарды лет. В действительности гениальным биологам и химикам потребовалось около ста лет, чтобы найти способ экспериментальной проверки теории. Иногда теория должна идти впереди, чтобы освещать путь.



## Эпилог

Перед самой посадкой в гигантский «Геркулес», который должен был забрать нас с чилийской антарктической станции в Пунта-Аренас, мы с Виктором обнялись на прощание. Всё-таки русские очень эмоциональны и сентиментальны. Виктор был сильно расстроен нашим расставанием. Перед тем как выйти в пургу, я спросил его: «Виктор, находите ли вы Антарктиду красивой?» Он задумался на короткое время, а затем улыбнулся и тихо произнёс: «Да, она как некоторые женщины — красива и жестока». Если бы Виктор спросил, считаю ли я красивой нашу Вселенную и её Законы Физики, я, возможно, ответил бы: «Нет, она не красивая, скорее — симпатичная».

В этой книге я заклеил красоту, однозначность и элегантность как обманчивые миражи. Законы физики (в том смысле, в каком я определил их в главе 1) ни уникальны, ни элегантны. Мир, или, по крайней мере, наша его часть, представляется гигантской машиной Руба Голдберга. Но должен признаться, что и сам я так же не способен устоять перед очарованием однозначности и элегантности, как и все мои коллеги. Я тоже хочу верить, что главный принцип всех принципов, выходящий за рамки законов любой конкретной карманной вселенной, однозначен, элегантен и удивительно прост. Но результаты, получаемые при применении этого принципа, не обязаны быть элегантными. Квантовая механика, господствующая в микроскопическом мире атомов, очень элегантна, чего нельзя сказать о её подданных. Простые квантово-механические законы приводят к чрезвычайно сложным закономер-

, из которых состоят жидкости, газы и твёрдые тела, порождая как сорняки, так и розы. Мне кажется, я смог бы посчитать основополагающие принципы теории струн элегантными, если бы знал, что они собой представляют.

Я часто шучу, что если лучшими теориями являются те, которые содержат минимальное количество фундаментальных уравнений и постулатов, то теория струн на сегодняшний день является лучшей из всех — никто до сих пор не нашёл ни одного фундаментального уравнения и не сумел сформулировать ни одного постулата! Теория струн даёт все основания считать её очень элегантной математической конструкцией с высочайшей степенью самосогласованности, которой позавидует любая другая физическая теория. Но никто не знает, каковы её фундаментальные принципы. Никто не знает, каковы её основные «строительные блоки».

Строительные блоки — это наиболее простые объекты, из которых построено всё остальное. Для строителя — это кирпичи. Отношение между строительными блоками и составленными из них объектами асимметрично: можно возвести дом из кирпичей, но только пациент психиатрической лечебницы с тяжёлым расстройством восприятия решился бы строить кирпичи из домов.

Основные блоки науки зависят от контекста и состояния наших знаний. В XIX веке строительными блоками материи были атомы, перечисленные в таблице Менделеева. 92 элемента могли образовывать бесконечное разнообразие более сложных объектов, называемых молекулами. Позже было обнаружено, что атомы состоят из более мелких частиц, и они уступили роль строительных блоков электронам, протонам и нейтронам. Природа научила нас ожидать, что бóльшие вещи состоят из меньших. Физик, проникающий всё глубже и глубже в законы природы, ожидает наличия не наблюдаемой текущими методами субструктуры у объектов, считающихся на данном этапе развития науки строительными блоками. Сегодня считается, что обычная материя состоит из кварков и электронов. Как обычные люди, так и учёные часто задают вопрос: «Считаете ли вы, что открытие всё более элементарных кирпичиков будет продолжаться вечно или существует мельчайший строительный блок?» В наши дни этот вопрос часто принимает форму: «Существует ли что-нибудь меньшее, чем планковская

?» или: «Являются ли струны самыми фундаментальными объектами или они состоят из более мелких частей?».

Возможно, это некорректные вопросы. Методы работы теории струн более тонкие. Если мы сосредоточиваем внимание на каком-то конкретном регионе Ландшафта, то обнаруживаем, что всё здесь построено из определённого набора строительных блоков. Одни регионы Ландшафта могут содержать открытые и замкнутые струны, в других вся материя состоит из D-бран, в третьих элементарные строительные объекты похожи на обычные кванты силовых полей, собранные в струны, браны, чёрные дыры и много чего ещё. По отношению ко всем объектам, выделяемым в класс *фундаментальных*, другие объекты теории ведут себя как *составные* в том же смысле, в котором атомы и молекулы *состоят* из электронов, протонов и нейтронов.

Но по мере нашего перемещения из одного места Ландшафта в другое начинают происходить странные вещи. Строительные блоки меняются ролями с построенными из них объектами. Какой-нибудь конкретный составной объект начинает вести себя всё проще и проще, как если бы он представлял собой элементарный строительный блок. В то же время объект, который до этого был строительным блоком, начинает проявлять поведение, свидетельствующее о наличии сложной внутренней структуры. Ландшафт превращается в фантастический пейзаж, в котором по мере нашего продвижения по нему кирпичи и дома меняются ролями. *Всё здесь фундаментально и ничто не фундаментально.*

А что же за проблема с основными уравнениями теории? Что мешает взять за основу уравнения движения основных строительных блоков? Вот и ответ: какие блоки взять в качестве фундаментальных? Открытые струны? Закрытые струны? Мембраны? D0-браны? Ответ зависит от региона Ландшафта, который нас в данный момент интересует. А в регионе, который находится между регионами, для которых существуют два различных типа описания, выбор строительных блоков и основных уравнений вообще неоднозначен. Похоже, что мы столкнулись с новым типом математической теории, в которой традиционный подход, состоящий в выводе следствий из основных положений, расплывается по швам. Или прав 'т Хоофт, и настоящие строительные блоки на самом деле спрятаны более глубоко. Пока же следует констатировать, что мы

не знаем, как описать все математические конструкции теории струн и какие строительные блоки являются более фундаментальными, а какие — менее.

Пока я ещё надеюсь, что принципы теории струн или то, что стоит за ними, будут обладать элегантностью, простотой и красотой, по которым так изголодались теоретики. Но даже если уравнения и удовлетворяют эстетическим критериям физиков, это ещё не означает, что их решения будут простыми и элегантными. Стандартная модель, содержащая 30 непонятно как связанных друг с другом параметров, необъяснимую репликацию поколений частиц, силы, меняющиеся замысловатым образом, настолько сложна, что соответствующая ей теория струн почти наверняка будет иметь сложность и избыточность машины Руба Голдберга.

На мой собственный вкус, элегантность и простота иногда могут быть обнаружены в принципах, которые вообще невозможно записать в виде уравнений. Я не знаю ни одного уравнения, которое было бы более элегантным, чем два принципа, лежащие в основе теории Дарвина: случайные мутации и естественный отбор. Эта книга посвящена такому же мощному и простому принципу. Я считаю, что он заслуживает права называться элегантным, но снова повторю: я не знаю, как записать его в виде уравнения, разве что в виде слогана: *«Ландшафт возможностей населён актуальностями Мегаверсума»*.

И у нас остался последний важнейший вопрос: «Кто или что создало Вселенную и зачем?»

Есть ли в этом какая-то цель? Я не претендую на то, что знаю ответы. Те, кто смотрит на антропный принцип как на свидетельство существования доброжелательного создателя, останутся недовольны последними страницами моей книги. Законы гравитации, квантовой механики и богатый Ландшафт совместно с законом больших чисел — это всё, что нам нужно для объяснения благоприятности законов физики нашей Вселенной.

Но, с другой стороны, ничто из изложенного в этой книге не уменьшает вероятности того, что Вселенную создал некий разумный агент для каких-то своих целей. Экзистенциальный вопрос: «Почему существует нечто, а не ничто?» имеет не больше и не меньше шансов на ответ, чем имел до того, как кто-либо когда-либо что-либо слышал



о теории струн. Если существовал момент творения, то он скрыт от наших глаз и телескопов завесой инфляции, предшествовавшей Большому взрыву. Если это был Бог, то он постарался скрыть своё участие в акте творения.

Позвольте мне закончить эту книгу теми же самыми словами Пьера Симона Лапласа, которыми я её начал:

*«Я не нуждаюсь в этой гипотезе».*