

# **Леонард Сасскинд**

## **Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики**

# **Леонард Сасскинд**

## **Битва при черной дыре**

### **Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики**

*Что вдыхает жизнь в эти уравнения и создает Вселенную, которую они могли бы описывать?*

*– Стивен Хокинг*

### **Введение**

*Столько надо было грокнуть, а начинать приходилось почти что с нуля.*

*– Роберт Хайнлайн. Чужой в стране чужих*

Где-то в восточноафриканской саванне немолодая львица выслеживает себе ужин. Она бы предпочла медлительную добычу преклонного возраста, но все, что есть, – лишь молодая резвая антилопа. Внимательные глаза жертвы идеально размещены по сторонам ее головы, чтобы в ожидании нападения держать под наблюдением всю окружающую местность. Глаза же хищника смотрят прямо вперед, фокусируясь на жертве и оценивая расстояние.

На этот раз «широкоугольные сканеры» антилопы пропустили хищника, подобравшегося на расстояние броска. Сильные задние лапы львицы толкают ее к перепуганной жертве. Извечная погоня начинается снова.

Пусть и обремененная годами, большая кошка – отличный спринтер. Поначалу отрыв сокращается, но от резких движений мощные мускулы львицы испытывают кислородное голодание и постепенно слабеют. Вскоре природная выносливость антилопы побеждает: в какой-то момент относительная скорость кошки и ее добычи меняет знак, сокращавшееся прежде отставание начинает расти. Львица чувствует, что фортуна ей изменила, Ее Королевское Величество признаёт поражение и возвращается в свою засаду в кустах.

Пятьдесят тысяч лет назад усталый охотник находит заваленный камнем вход в пещеру. Если отодвинуть тяжелое препятствие, получится безопасное место для отдыха. В отличие от своих обезьяноподобных предков, охотник стоит выпрямившись. Но в этой позе он безуспешно толкает валун. Выбирая более подходящий угол, он отставляет ноги подальше. Когда положение его тела оказывается почти горизонтальным, основная компонента приложенной силы начинает действовать в нужном направлении. Камень сдвигается.

Расстояние? Скорость? Перемена знака? Угол? Сила? Компонента? Что за невероятно сложные вычисления происходят в мозгу охотника, не говоря уже о кошке? Эти технические понятия обычно встречаются в учебниках физики для старших классов. Где кошка научилась измерять не только скорость добычи, но и, что более важно, относительную скорость? Брал ли охотник уроки физики, чтобы разобраться с понятием силы? И еще тригонометрии, чтобы использовать синусы и косинусы для вычисления компонент?

Истина, конечно же, в том, что у всех сложных форм жизни есть встроенные инстинктивные представления о физике, которые жестко «прошиты» эволюцией в их

нервной системе<sup>1</sup>. Без этого предустановленного физического «софта» выжить было бы невозможно. Мутации и естественный отбор сделали всех нас физиками, даже животных. Большой объем мозга у людей позволил этим инстинктам развиваться в понятия, которыми мы оперируем сознательно.

## Самоперепрошивка

На деле все мы являемся *классическими*<sup>2</sup> физиками. Мы «нутром чувствуем» силу, скорость и ускорение. Роберт Хайнлайн в научно-фантастическом романе «Чужой в стране чужих» (1961) придумал слово «грокать»<sup>3</sup> для выражения этого глубоко интуитивного, почти физиологического понимания явления. Я грокаю силу, скорость и ускорение. Я грокаю трехмерное пространство. Я грокаю время и число 5. Траектории камня или стрелы поддаются гроканью. Но мой стандартный встроенный грокер ломается, когда я пытаюсь применить его к десятимерному пространству-времени, или к числу  $10^{1000}$ , или, что еще хуже, к миру электронов и принципу неопределенности Гейзенберга.

С наступлением XX века наша интуиция попала в колоссальную аварию; физика неожиданно оказалась сбита с толку совершенно незнакомыми явлениями. Моему деду по отцовской линии было уже десять лет, когда Альберт Майкельсон и Эдвард Морли открыли, что орбитальное движение Земли сквозь гипотетический эфир невозможно зарегистрировать<sup>4</sup>. Электрон был открыт, когда деду стало за двадцать; когда ему стукнуло тридцать, была опубликована специальная теория относительности Альберта Эйнштейна, а когда он перешагнул порог средних лет, Гейзенберг открыл принцип неопределенности. Никаким способом эволюционный пресс не мог бы привести к выработке интуитивного понимания миров, столь радикально отличающихся от привычного нам. Но что-то в наших нервных системах, по крайней мере у некоторых из нас, оказалось готово к фантастической перепрошивке, позволяющей не только интересоваться малопонятными явлениями, но и создавать математические абстракции, порой совершенно контринтуитивные, для объяснения этих явлений и манипуляции с ними.

Скорость первой вызвала потребность в перепрошивке – огромная скорость, соперничающая с самим светом. Ни одно животное до двадцатого века не двигалось быстрее сотни миль в час (160 км/ч), и даже по сегодняшним меркам скорость света столь велика, что для всех, кроме ученых, он как бы и не движется вовсе, а просто мгновенно появляется, когда его включают. Древним людям не требовалось прошивок для работы со сверхвысокими скоростями, такими как скорость света.

Перепрошивка в вопросе о скорости произошла внезапно. Эйнштейн не был мутантом; десять лет, пребывая в полной безвестности, он бился над тем, чтобы заменить свою старую ньютоновскую прошивку. Но физикам того времени, должно было казаться, что среди них неожиданно появился человек нового типа – некто, способный видеть мир не как трехмерное пространство, а как четырехмерное *пространство-время*.

Потом Эйнштейн бился еще десять лет, на сей раз уже на виду у всех физиков, за объединение того, что он назвал специальной теорией относительности, с ньютоновской теорией гравитации. Итогом этих усилий стала общая теория относительности, которая глубоко изменила все наши традиционные представления о геометрии. Пространство-время

---

<sup>1</sup> Никто в действительности не знает, что из этого «прошивается» изначально, а что осваивается в ранний период жизни, но это различие здесь непринципиально. Суть в том, что ко времени созревания нервной системы опыт – индивидуального происхождения или эволюционного – дает нам обширные инстинктивные знания о том, как ведет себя физический мир. «Прошит» этот опыт или усвоен в очень молодом возрасте – его очень трудно утратить.

<sup>2</sup> Слово «классический» относится к физике, в которой не требуется учитывать квантовую механику.

<sup>3</sup> Грокать (англ. to grok) – исчерпывающе и интуитивно понимать что-либо.

<sup>4</sup> Знаменитый эксперимент Майкельсона – Морли впервые показал, что скорость света не зависит от движения Земли. Это привело к парадоксам, которые были в итоге разрешены Эйнштейном в его специальной теории относительности.

стало пластичным, способным искривляться и сворачиваться. На присутствие материи оно реагирует в чем-то подобно резиновому листу, прогибающемуся под нагрузкой. Прежде пространство-время было пассивным, его геометрические свойства – неизменными. В общей теории относительности пространство-время становится активным игроком: оно может деформироваться массивными объектами, такими как планеты и звезды, но это невозможно представить без сложной дополнительной математики.

В 1900 году, за пять лет до появления на сцене Эйнштейна, другая, еще более удивительная смена парадигмы началась вслед за открытием того, что свет состоит из частиц, называемых фотонами или, иногда, световыми квантами. Фотонная<sup>5</sup> теория света была лишь предвестником грядущей революции; умственные упражнения на этом пути оказались намного абстрактнее всего, что встречалось прежде. Квантовая механика – это нечто большее, чем новый закон природы. Она вызвала изменение правил классической логики, то есть обычных правил мышления, которые каждый здравомыслящий человек использует в рассуждениях. Она казалась безумной. Но безумна она или нет, – физики смогли перепрошить себя в соответствии с новой логикой, которую называют квантовой. В главе 4 я объясню все, что вам понадобится знать о квантовой механике. Приготовьтесь, что будете сбиты толчком. Это случается со всеми.

Относительность и квантовая механика с самого начала невзлюбили друг друга. Попытки насильственно их «поженить» имели катастрофические последствия – на каждый вопрос, заданный физиками, математика выдавала чудовищные бесконечности. Полвека ушло на то, чтобы помирить квантовую механику со специальной теорией относительности, но в конце концов математические несовместимости были устранены. К началу 1950-х годов Ричард Фейнман, Юлиан Швингер, Синъитиро Томонага и Фримен Дайсон<sup>6</sup> заложили фундамент для объединения *специальной* теории относительности и квантовой механики, получивший название квантовой теории поля. Однако *общая* теория относительности (эйнштейновский синтез специальной теории относительности с ньютоновской теорией гравитации) и квантовая механика оставались непримиримы, причем явно не от недостатка миротворческих усилий. Фейнман, Стивен Вайнберг, Брайс Де Витт и Джон Уилер пытались проквантовать уравнения Эйнштейна, но все получали в итоге лишь математический абсурд. Пожалуй, это было и неудивительно. Квантовая механика правила миром очень легких объектов. Гравитация, напротив, представлялась значимой только для очень тяжелых скоплений материи. Казалось, не существует ничего достаточно легкого, чтобы существенна была квантовая механика, и вместе с тем достаточно тяжелого, чтобы надо было учитывать гравитацию. В результате многие физики во второй половине двадцатого столетия считали поиски такой объединенной теории бесполезным занятием, подходящим лишь для сумасшедших ученых и философов.

Но другие считали такой взгляд близоруким. Для них мысль о двух несовместимых, даже противоречащих друг другу описаниях природы была интеллектуально непереносимой. Они верили, что гравитация почти наверняка играет важную роль в определении свойств мельчайших строительных блоков материи. Проблема лишь в том, что физика до них еще не докопалась. И на деле они оказались правы: с приближением к фундаменту мира, где расстояния слишком малы для непосредственного наблюдения, мельчайшие объекты сильнейшим образом воздействуют друг на друга посредством гравитации.

Сегодня широко признано, что гравитация и квантовая механика будут играть одинаково важные роли в определении законов поведения элементарных частиц. Но размеры фундаментальных строительных блоков природы столь невообразимо малы, что никого не удивит, если для их понимания вновь понадобится радикальная перепрошивка наших представлений. Новая схема, какой бы она ни оказалась, будет называться *квантовой гравитацией*. Даже не зная ее тонкостей, мы можем с уверенностью говорить, что новая

---

<sup>5</sup> Термин «фотон» не применялся до 1926 года, когда его ввел химик Гильберт Льюис.

<sup>6</sup> В 1965 году Фейнман, Швингер и Томонага получили за свою работу Нобелевскую премию. Но современному пониманию квантовой теории поля мы обязаны Дайсону в той же мере, как и остальным.

парадигма будет использовать очень непривычные концепции пространства и времени. Представление об объективной реальности точек пространства и моментов времени исчезает, отправляясь в небытие вслед за одновременностью,<sup>7</sup> детерминизмом<sup>8</sup> и птицей додо. Квантовая гравитация описывает гораздо более субъективную реальность, чем мы могли себе представить. Как мы увидим в главе 18, это реальность, которая во многих отношениях подобна призрачной трехмерной иллюзии, даваемой голограммой.

Физики-теоретики стремятся обрести надежную опору в этой «стране чужих». Как и в прошлом, мысленные эксперименты выявляют парадоксы и конфликты между фундаментальными принципами. Эта книга посвящена интеллектуальной битве вокруг единственного мысленного эксперимента. В 1976 году Стивен Хокинг задумался о бросании порции информации – книги, компьютера, даже просто элементарной частицы – в черную дыру. Черные дыры, считал Хокинг, – это безвозвратные ловушки, и для внешнего мира упавшая порция информации будет необратимо потеряна. Это внешне невинное заключение далеко не столь безобидно, как кажется: оно способно подорвать и опрокинуть все величественное здание современной физики. Случился какой-то страшный сбой: под угрозой оказался самый фундаментальный закон природы – закон сохранения информации. Тем, кто следил за событиями, было ясно: либо Хокинг ошибается, либо трехсотлетняя цитадель физики падёт.

Но поначалу мало кто обратил на это внимание. Почти два десятилетия дискуссия протекала практически незаметно. Мы с великим голландским физиком Герардом 'т Хоофтом вдвоем являли собой всю армию, которая сражалась на одной стороне интеллектуального фронта. Стивен Хокинг с небольшой армией релятивистов был на другой стороне. Вплоть до начала 1990-х годов большинство физиков-теоретиков, особенно специалистов по теории струн, не реагировали на угрозу, которую несло утверждение Хокинга, а затем большинство из них сочли его выводы ошибочными. Во всяком случае – пока ошибочными.

Битва при черной дыре была подлинной научной дискуссией, совершенно непохожей на псевдодebаты вокруг «теории разумного замысла» или реальности глобального потепления, где фальшивые аргументы, придуманные политическими манипуляторами, чтобы морочить голову наивным людям, совершенно не отражают реальных научных разногласий. Напротив, спор о черных дырах был настоящим. Выдающиеся физики-теоретики не могли прийти к согласию о том, каким физическим принципам доверять, а от каких отказаться. Следовать за Хокингом с его консервативными представлениями о пространстве-времени или за 'т Хоофтом и мной с нашими консервативными взглядами на квантовую механику? Обе точки зрения, казалось, ведут к лишь парадоксам и противоречиям. Либо пространство-время – сцена, на которой работают законы природы, – совсем не такое, каким мы привыкли его себе представлять, либо ошибочны великие принципы возрастания энтропии и сохранения информации. Миллионы лет когнитивной эволюции и пара столетий физического опыта вновь одурачили нас, поставив перед необходимостью новой умственной перепрошивки.

Битва при черной дыре – это торжество человеческого разума и его замечательной способности открывать законы природы. Это рассказ о мире, куда более далеко от наших чувств, чем квантовая механика и теория относительности. Квантовая гравитация имеет дело с объектами, которые в сто миллиардов миллиардов раз меньше протона. Мы никогда экспериментально не обнаруживали столь малые предметы и, вероятно, никогда не обнаружим, но человеческая изобретательность позволила нам установить их существование, и удивительным образом порталами в их мир служат объекты с огромными массами и размерами – черные дыры.

---

7 В ходе релятивистской революции 1905 года одним из первых было отброшено представление о том, что два события могут быть объективно одновременными.

8 Детерминизм – это принцип, состоящий в том, что будущее полностью предопределено прошлым. Согласно квантовой механике, законы физики имеют статистический характер, и ничего нельзя предсказать с полной уверенностью.

Битва при черной дыре – это также хроника открытия. Голографический принцип – одна из самых контринтуитивных абстракций во всей физике. Он явился кульминацией почти двух десятилетий интеллектуальных сражений вокруг судьбы информации, падающей в черную дыру. Это не была битва между разгневанными врагами; на самом деле все основные участники битвы были друзьями. Но это была жестокая интеллектуальная борьба идей, ведущаяся людьми, которые глубоко уважают друг друга, однако имеют принципиальные разногласия.

Существует одно широко распространенное недоразумение, которое следует развеять. Люди часто представляют физиков, особенно физиков-теоретиков, как узколобых зануд, чьи интересы чужды обычным людям и очень скучны. Ничто не может быть дальше от истины. Великие физики, которых я знал, а их было немало, – это чрезвычайно харизматичные люди, с сильными чувствами и удивительными идеями. Мне бесконечно интересно разнообразие их личностей и способов мышления. Когда широкой публике рассказывают о физиках, обходя их человеческую сторону, то, на мой взгляд, упускают что-то очень важное. При написании этой книги я постарался ухватить эмоциональную сторону истории в той же мере, в какой и научную.

### Замечание о больших и малых числах

В этой книге вы встретите множество очень больших и очень малых чисел. Человеческий мозг не приспособлен визуализировать числа много больше 100 и много меньше  $1/100$ , хотя свои способности в этом деле можно развивать. Например, я, постоянно имея дело с числами, могу более или менее наглядно представить себе миллион, однако разница между триллионом и квадриллионом выходит за пределы моих способностей к визуализации. Многие числа в этой книге намного больше триллионов и квадриллионов. Как с ними обращаться? Ответ основан на одной из важнейших перепрошивок всех времен – изобретении экспоненциальной, или *научной, нотации* для записи чисел.

Начнем с очень большого числа. Население Земли составляет около 6 миллиардов человек<sup>9</sup>. Миллиард – это 10, умноженное само на себя девять раз. Его можно представить, приписав к единице девять нулей:

Один миллиард =  $10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 1000\,000\,000$ .

В сокращенной форме 10, помноженное на себя девять раз, записывается как  $10^9$ , или *десять в девятой степени*. Таким образом, население Земли – это примерно:

6 миллиардов =  $6 \times 10^9$ .

В данном случае 9 является *показателем* или *порядком величины*.

А вот другое, куда большее число – общее количество протонов и нейтронов в составе Земли:

число протонов и нейтронов в Земле (примерно) =  $5 \times 10^{51}$ .

Очевидно, что их значительно больше, чем людей. Но насколько больше? Десять в пятьдесят первой степени – это результат перемножения пятидесяти одной десятки, а миллиард – только девяти. Так что у  $10^{51}$  на 42 таких сомножителя больше, чем у  $10^9$ . Это значит, что ядерных частиц на Земле примерно в  $10^{42}$  раз больше, чем людей. (Заметьте, что я проигнорировал множители 5 и 6 в приведенных формулах. Они не слишком отличаются друг от друга, так что, если нам достаточно «оценки по порядку величины», ими можно просто пренебречь.)

Возьмем два действительно больших числа. Общее число электронов в той области Вселенной, которую можно наблюдать с помощью самых мощных телескопов, составляет около  $10^{80}$ . Общее число фотонов<sup>10</sup> – около  $10^{90}$ . Может показаться, что  $10^{90}$  не намного больше, чем  $10^{80}$ , но это обманчивое впечатление:  $10^{90}$  в  $10^{10}$  раз больше, чем  $10^{80}$ , а 10 000

---

<sup>9</sup> В 2011 году население Земли достигло 7 миллиардов человек. – Примеч. перев.

<sup>10</sup> Не путайте фотоны (photons) с протонами (protons). Фотоны – это частицы света. Протоны же вместе с нейтронами составляют атомные ядра.

000 000 – это очень большое число. Внешне кажется, что  $10^{80}$  и  $10^{81}$  – это почти одно и то же, между тем второе число в десять раз больше первого. Так что даже небольшое изменение порядка величины может означать огромное изменение записанного числа.

Теперь рассмотрим очень маленькие числа. Размер атома, например, составляет примерно десятиллиардную долю метра. В десятичной записи: размер атома = 0,0000000001 м.

Обратите внимание, что единица стоит на десятой позиции после запятой. В научной нотации для одной десятиллиардной используется отрицательный показатель степени, а именно -10:  $0,0000000001 = 10^{-10}$ .

Числа с отрицательным порядком величины малы, а с положительным – велики.

Обратимся к другому числу, еще меньшей величины. По сравнению с обычными объектами элементарные частицы, подобные электрону, – очень легкие. Килограмм – это масса литра воды. Масса электрона многократно меньше. В действительности один электрон весит примерно  $9 \times 10^{-31}$  килограмма.

В научной нотации очень упрощается умножение и деление чисел. Все, что для этого нужно, – это складывать и вычитать показатели. Вот несколько примеров:

$$10^{51} = 10^{42} \times 10^9$$

$$10^{81}/10^{80}=10$$

$$10^{-31} \times 10^9 = 10^{-22}.$$

Показатели степени – не единственное сокращение, которое люди используют для описания очень больших чисел. Некоторые такие числа носят собственные имена. Например, гугол – это  $10^{100}$  (единица, за которой следует 100 нулей), а гуголплекс – это  $1^{\text{гугол}}$  (1, за которой идет гугол нулей) – это ужасно большое число.

Познакомившись с этими основами, давайте вернемся в не столь абстрактный мир, скажем, в Сан-Франциско, в третий год первого президентского срока Рональда Рейгана, – холодная война в самом разгаре, а новая война еще только начинается.

## **Часть 1**

### **Надвигающаяся буря**

*История будет благосклонна ко мне, ибо я намерен сам ее написать.*

*– Уинстон Черчилль<sup>11</sup>*

Заглавия первой и четвертой частей этой книги взяты из первого и пятого томов истории Второй мировой войны У Черчилля.

## **1**

### **Первый гром**

Сан-Франциско, 1983.

К тому дню, когда в мансарде особняка Джека Розенберга произошла первая стычка, грозные тучи войны собирались уже более 80 лет. Джек, известный также как Вернер Эрхард, был гуру, ловким торгашом и немного мошенником. До начала 1970-х он был просто Джеком Розенбергом, продавцом энциклопедий. Но однажды, когда он ехал по мосту Золотые Ворота, на него снизошло откровение. Он спасет мир и благодаря этому колоссально разбогатеет. Все, что нужно, – это классное имя и новый подход к делу. Имя должно быть Вернер (в честь Вернера Гейзенберга) Эрхард (в честь немецкого политика Людвиг Эрхарда), а новым подходом станут Эрхардовские семинары-тренинги, ЭСТ. И он преуспел, если не в спасении мира, то по крайней мере в том, чтобы разбогатеть. Тысячи

---

<sup>11</sup> Не путайте фотоны (photons) с протонами (protons). Фотоны – это частицы света. Протоны же вместе с нейтронами составляют атомные ядра.

стеснительных, неуверенных в себе людей платили сотни долларов за изматывающие разглагольствования на шестнадцатичасовых мотивационных семинарах самого Вернера или одного из его многочисленных учеников, в течение которых (по слухам) запрещалось даже выходить в туалет. Это было куда дешевле и быстрее психотерапии и каким-то образом работало. Люди приходили стеснительными и неуверенными, а после семинаров они выглядели сильными, уверенными в себе и дружелюбными – совсем как Вернер: И неважно, что иногда они казались роботами-маньяками с трясущимися руками. Они ведь чувствовали себя лучше. «Тренинги» даже стали темой очень смешного фильма «Крутой наполовину» (*Semi-Tough*) Берта Рейнолдса.

Вернера постоянно окружали иступленные фанатки ЭСТ. «Рабыни» – это, пожалуй, слишком сильное слово, назовем их волонтерками. ЭСТ-тренированные повара готовили ему еду, шоферы возили его по городу, его особняк был наполнен разнообразными слугами. Но, по иронии судьбы, сам Вернер тоже был иступленным фанатом – фанатом физики.

Мне нравился Вернер. Он был умным, интересным и забавным. И он был без ума от физики. Ему хотелось быть ее частью, и он тратил массу денег, собирая в своем особняке группы лучших физиков-теоретиков. А иногда всего несколько особенно близких друзей-физиков: Сидни Соулман, Дэвид Финкельштейн, Дик Фейнмания<sup>12</sup> – встречались в его доме на замечательных ужинах, сервированных выдающимися поварами. А еще Вернер любил проводить маленькие элитные конференции. Благодаря великолепно оборудованной семинарской аудитории в мансарде, волонтерам, исполняющим любое ваше желание, и месту встречи в Сан-Франциско эти мини-конференции доставляли массу удовольствия. Некоторые физики с подозрением относились к Вернеру, вдруг он хитроумно использует связи в физическом сообществе для продвижения своей деятельности? Но он никогда так не поступал. Насколько я могу судить, ему просто нравилось узнавать о новейших идеях от людей, которые их выдвигают.

Думаю, в целом состоялось три или четыре ЭСТ-конференции, но лишь одна из них оказала влияние на меня и мои физические исследования. Шел 1983 год. Среди других знаменитостей присутствовали Мюррей Гелл-Манн, Шелдон Глэшоу, Фрэнк Уилчек, Савас Димопулос и Дэйв Финкельштейн. Но для нашей истории самым важным участником были трое главных участников Битвы при черной дыре: Герард 'т Хоофт, Стивен Хокинг и я.

Хотя до 1983 года я всего несколько раз встречался с Герардом, он произвел на меня глубокое впечатление. Все знали, что он блестящий ученый, но я чувствовал нечто гораздо большее. У него словно был стальной сердечник, дающий интеллектуальную мощь, с которой не мог сравниться никто из известных мне людей, быть может, за исключением Дика Фейнмана. Оба они были шоуменами. Дик был американским шоуменом – грубоватым мачо, стремящимся оставить других в дураках. Однажды он рассказывал группе молодых физиков из Калтеха о розыгрыше, который устроили ему студенты. В Пасадене есть забегаловка, где продают сэндвичи-«знаменитости». Можно, например, заказать «Хамфри Богарта», «Мэрилин Монро» и т. п. Студенты позвали его туда на ланч – как я понимаю, в день его рождения – и стали один за другим заказывать «Фейнмана». Они заранее сговорились об этом с менеджером, так что парень за кассой даже глазом не моргнул.

Когда рассказ окончился, я сказал:

- Вот интересно, Дик, чем бы различались сэндвич «Фейнман» и сэндвич «Сасскинд»?
- Да все они одинаковы, – ответил он, – разве что в «Сасскинде» побольше ветчины.
- Да, – отозвался я, – зато там нет вареной колбасы<sup>13</sup>.

Пожалуй, это был единственный случай, когда я обошел его в этой игре.

Герард – датчанин. Датчане – самые высокие люди в Европе, но Герард невысок и в меру упитан, с усами и взглядом типичного бюргера. У'т Хоофта, как и у Фейнмана, сильная соревновательная жилка, но его мне определенно никогда не удавалось обставить. В отличие

---

<sup>12</sup> Речь идет о физике Ричарде Фейнмане. Дик – уменьшительное от имени Ричард.

<sup>13</sup> Слово ham (ветчина) в американском сленге также означает дешевую актерскую игру на публику, а baloney (амер. вареная колбаса) также означает вздор и чепуху. – Примеч. перев.

от Фейнмана, он продукт старой Европы – последний великий европейский физик, наследовавший мантии Эйнштейна и Бора. Хотя он на шесть лет моложе меня, в 1983 году я трепетал перед ним и, надо сказать, не зря. В 1999 году ему присудили Нобелевскую премию за работу, приведшую к созданию Стандартной модели элементарных частиц.

И все же не Герард особо врезался мне в память после той встречи в вернеровской мансарде, а Стивен Хокинг, которого я видел тогда впервые. И именно тогда Стивен бросил бомбу, которая начала Битву при черной дыре.

Стивен – тоже шоумен. Физически он совсем крошечный человечек – я не уверен, потянет ли он на 40 килограммов, – но его тело служит носителем небывалого интеллекта и столь же раздутого эго. Стивен тогда пользовался более или менее обычным моторизованным инвалидным креслом и говорил собственным голосом, и все же его было очень трудно понять, если только не проводить с ним массу времени. Он путешествовал в сопровождении медсестры и молодого коллеги, который очень внимательно его слушал, а затем повторял сказанное.

В 1983 году переводчиком был Мартин Розек, ныне известный физик, один из пионеров важного направления, известного как супергравитация. Во время ЭСТ-конференции Мартин был еще совсем молод и не столь известен. Тем не менее по предыдущим встречам я знал его как очень способного физика-теоретика. В определенный момент беседы Стивен (через Мартина) сказал нечто, что я посчитал ошибочным. Я повернулся к Мартину и попросил прояснить физику вопроса. Он взглянул на меня как олень, пойманный светом фар. Позднее он объяснил мне, что случилось. Похоже, что перевод слов Стивена требовал столь высокой концентрации, что он обычно не мог следить за дискуссией. Вряд ли он понимал, о чем мы говорили.

Стивен выглядит довольно необычно. Я не о его кресле или очевидных телесных ограничениях. Несмотря на неподвижность мускулов на лице, его слабая улыбка уникальна: она одновременно ангельская и дьявольская, отражающая чувство затаенного удовольствия. В ходе ЭСТ-конференции я убедился, что общаться со Стивеном очень трудно. Ему требуется много времени на ответ, который обычно бывает очень лаконичным. Эти краткие, порой однословные ответы, его улыбка и его почти бесплотный интеллект напрягали. Это было как общение с дельфийским оракулом. Когда кто-то обращался к Стивену с вопросом, первоначальной реакцией была полная тишина, а затем ответ, который часто оказывался совершенно непонятным. Но всезнающая улыбка говорила: «Вы можете не понимать то, что я говорю, но я-то понимаю, и я прав».

Мир воспринимает тщедушного Стивена как могучего героя, человека необычайной смелости и силы духа. Те же, кто его знает, видят другие стороны: Стивена Играющего и Стивена Самоуверенного. Однажды вечером, во время ЭСТ-конференции, несколько участников отправились прогуляться по знаменитым сжигающим тормоза холмам Сан-Франциско. Стивен был с нами на своем моторизованном кресле. Когда мы добрались до самого крутого участка, он включил свою дьявольскую улыбку. Ни секунды не колеблясь, он рванул вниз на предельной скорости, перепугав всех остальных. Мы бросились за ним, опасаясь самого худшего. В самом низу мы обнаружили его сидящим и улыбающимся. Он поинтересовался, нет ли здесь холма покруче. Стивен Хокинг: Ивел Книвел<sup>14</sup> от физики.

Хокинг и в самом деле настоящий физик-трюкач. Но, пожалуй, самым смелым его ходом была бомба, которую он бросил в мансарде Вернера.

Я не припомню, как была организована его лекция на ЭСТ. Сегодня на своих физических семинарах Стивен молча сидит в кресле, пока бестелесный компьютерный голос воспроизводит заранее сделанную запись. Этот компьютерный голос стал фирменным знаком Стивена; при всей своей монотонности он индивидуален и полон юмора. Но тогда, он, возможно, говорил сам, а Мартин переводил. Как бы то ни было, бомба всей своей мощью обрушилась на нас с Герардом.

---

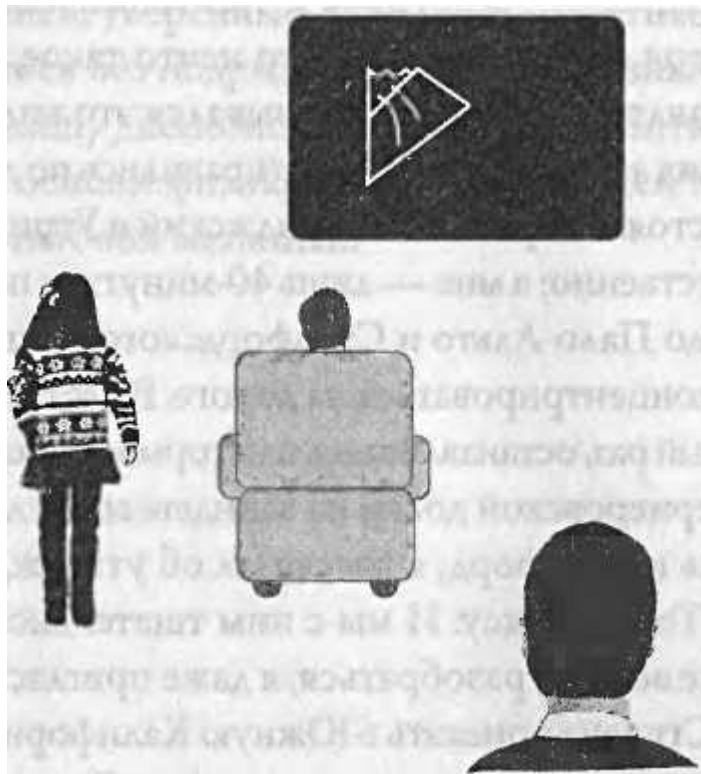
14 Роберт Крейг «Ивел» Книвел (Robert Craig «Evel» Knievel, 1938–2007) – американский каскадер, прославившийся рискованными трюками на мотоцикле. – Примеч. перев.



Стивен заявил, что «информация теряется при испарении черной дыры», и, хуже того, он, похоже, это доказал. Если это правда, поняли мы с Герардом, то разрушены самые основания нашей научной области. Как восприняли эту новость остальные в вернеровской мансарде? Как Койот из мультфильма про Дорожного Бегуна<sup>15</sup>, проскочивший с разбегу край утеса: земля под ногами уже исчезла, но они этого еще не поняли.

О космологах поговаривают, что они часто ошибаются, но никогда не сомневаются. Если так, то Стивен лишь наполовину космолог: он никогда не сомневается, однако практически никогда не ошибается. И все же в данном случае он ошибся. Но его «ошибка» оказалась одной из самых продуктивных в истории физики и могла бы привести к коренной смене парадигмы в представлениях о природе пространства, времени и материи.

Лекция Стивена была в тот день последней. Еще около часа после нее Герард стоял, озабоченно разглядывая диаграмму на вернеровской доске. Все остальные разошлись. Я продолжал наблюдать за мрачным выражением на лице Герарда и довольной улыбкой Стивена. Почти ничего не было сказано. Это был момент высочайшего напряжения.



На доске была *диаграмма Пенроуза*, представляющая черную дыру. Горизонт – граница черной дыры – был изображен пунктирной линией, а сингулярность в ее центре – грозной зазубренной. Линии, ведущие внутрь сквозь горизонт, представляли биты информации, падающие под горизонт в сингулярность. Линий, ведущих назад, не было. Согласно Стивену, эти биты были необратимо потеряны. И что еще хуже, Стивен доказал, что черные дыры в конце концов испаряются и исчезают, не оставляя никаких следов того, что в них упало.

Теория Стивена шла еще дальше. Он утверждал, что вакуум – пустое пространство – заполняют бесчисленные «виртуальные» черные дыры, которые возникают и прекращают существование столь быстро, что мы этого не замечаем. Под влиянием этих виртуальных черных дыр, утверждал он, информация стирается, даже если в окрестностях нет ни одной «реальной» черной дыры.

В главе 7 вы узнаете, что в точности означает понятие «информация» и что означает ее потерять. А пока просто поверьте мне: это была полная катастрофа. Мы с 'т Хоофтом это

---

<sup>15</sup> Мультсериал «Хитрый Койот и Дорожный Бегун» (оригинальное название Road Runner) выходил с 1949 года. В каждой серии Койот пытается с помощью разных уловок поймать стремительного Дорожного Бегуна, напоминающего страуса, и каждый раз терпит неудачу. – Примеч. перев.

знали, но все остальные, кто услышал об этом в тот день, реагировали вяло: «Ну да, в черных дырах пропадает информация». Сам Стивен был воодушевлен. Для меня самым трудным при работе со Стивеном было постоянное раздражение, которое я чувствовал из-за его самодовольства. Потеря информации – это нечто такое, что просто не могло быть правдой, но Стивен отказывался это видеть.

Конференция завершилась, и мы отправились по домам. Стивену и Герарду предстояла дорога в Кембриджский и Утрихтский университеты соответственно; а мне – лишь 40-минутная поездка на юг по 101-му шоссе до Пало-Альто и Стэнфордского университета. Мне было трудно сконцентрироваться на дороге. В этот холодный январский день каждый раз, останавливаясь или тормозя, я начинал рисовать диаграмму с вернеровской доски на заиндевевшем лобовом стекле.

Вернувшись в Стэнфорд, я рассказал об утверждении Стивена своему другу Тому Бэнксу. И мы с ним тщательно все обдумали. Чтобы получше во всем разобраться, я даже пригласил одного бывшего ученика Стивена приехать в Южную Калифорнию. Мы с большим недоверием относились к утверждению Стивена, но какое-то время сами не могли понять почему. Что такого плохого в потере какого-то количества информации внутри черной дыры? Потом до нас дошло. Потеря информации – это то же самое, что порождение энтропии. А порождение энтропии означает генерацию тепла. Виртуальные черные дыры, существование которых столь вольно допустил Стивен, вели бы к выработке тепла в пустом пространстве. Совместно с еще одним коллегой, Майклом Пескином, мы сделали оценку, основанную на теории Стивена. Оказалось, что если он прав, то пустое пространство за малую долю секунды должно разогреться до тысячи миллиардов миллиардов миллиардов градусов. Хотя я знал, что Стивен ошибается, я не мог обнаружить брешь в его рассуждениях. Возможно, именно это и раздражало меня больше всего.

Последовавшая затем Битва при черной дыре являла собой нечто большее, нежели полемика между физиками. Это была также битва идей или, возможно, битва между фундаментальными принципами. Принципы квантовой механики и общей теории относительности всегда были на ножах друг с другом, и никто не знал, способны ли они сосуществовать. Хокинг – релятивист, верящий прежде всего в эйнштейновский принцип эквивалентности. Мы с 'т Хоофтом – квантовые физики, уверенные, что законы квантовой механики не могут нарушаться без подрыва самих основ физики. В следующих трех главах я опишу диспозицию сторон перед Битвой при черной дыре, изложив основы физики черных дыр, общей теории относительности и квантовой механики.

## 2

### Темная звезда

*Горацио, – на небе и земле  
Есть многое, что и не снилось даже Науке.  
– Уильям Шекспир, Гамлет<sup>16</sup>*

Первый намек на что-то подобное черной дыре появился в конце XVIII века, когда великий французский физик Пьер-Симон де Лаплас и английский клирик Джон Митчел высказали одну и ту же замечательную мысль. Все физики тех дней серьезно интересовались астрономией. Все, что было известно о небесных телах, выяснялось благодаря свету, который они испускали или, как в случае с Луной и планетами, отражали. Хотя ко времени Митчела и Лапласа со смерти Исаака Ньютона прошло уже полвека, он все равно оставался самой влиятельной фигурой в физике. Ньютон считал, что свет состоит из крошечных частиц – корпускул, как он их называл, – а раз так, то почему бы свету не испытывать действие гравитации? Лаплас и Митчел задумались, может ли существовать звезда, столь массивная и плотная, что свет не сможет преодолеть ее гравитационное притяжение. Должны ли такие

---

16 Перевод П. Гнедича. – Примеч. перев.

звезды, если они существуют, быть абсолютно темными и потому невидимыми?

Может ли снаряд<sup>17</sup> – камень, пуля или хотя бы элементарная частица – вырваться из гравитационного притяжения Земли? С одной стороны – да, с другой – нет. Гравитационное поле массы нигде не заканчивается; оно тянется бесконечно, становясь все слабее и слабее по мере увеличения расстояния. Так что брошенный вверх снаряд никогда полностью не избавится от земного притяжения. Но если снаряд брошен вверх с достаточно большой скоростью, он будет удаляться вечно, поскольку убывающая гравитация слишком слаба, чтобы развернуть его и притянуть назад к поверхности. В этом смысле снаряд может вырваться из земного тяготения.

Даже самый сильный человек не имеет шансов выбросить камень в открытый космос. Высота броска профессионального бейсбольного питчера может достигать 70 метров, это около четверти высоты Эмпайр-стейт-билдинг. Вели пренебречь сопротивлением воздуха, пуля, выпущенная из пистолета, могла бы достичь высоты 5 километров. Но существует особая скорость – называемая *скоростью убегания*<sup>18</sup>, – которой едва хватает, чтобы вывести объект на вечно удаляющуюся траекторию. Начав движение с любой меньшей скоростью, снаряд упадет обратно на Землю. Стартовав с большей скоростью, он уйдет на бесконечность. Скорость убегания для поверхности Земли составляет 40 000 км/ч (11,2 км/с)<sup>19</sup>.

Давайте временно станем называть звездой любое массивное небесное тело, будь то планета, астероид или настоящая звезда. Земля – это просто маленькая звезда, Луна – еще меньшая звезда и т. д.

По ньютоновскому закону тяготения, гравитационное воздействие звезды пропорционально ее массе, так что совершенно естественно, что и скорость убегания тоже зависит от массы звезды. Но масса – это только полдела. Другая половина – это радиус звезды. Представьте себе, что вы стоите на земной поверхности и в это время некая сила начинает сжимать Землю, уменьшая ее размеры, но без потери массы. Если вы остаетесь на поверхности, то сжатие будет приближать вас ко всем без исключения атомам Земли. При сближении с массой воздействие ее гравитации усиливается. Ваш вес – функция гравитации – будет возрастать, и, как нетрудно догадаться, преодолеть земное тяготение будет все труднее. Этот пример иллюстрирует фундаментальную физическую закономерность: сжатие звезды (без потери массы) увеличивает скорость убегания.

Теперь представьте себе прямо противоположную ситуацию. По каким-то причинам Земля расширяется, так что вы удаляетесь от массы. Тяготение на поверхности будет становиться слабее, а значит, из него легче вырваться. Вопрос, поставленный Митчелом и Лапласом, состоял в том, может ли звезда иметь такую большую массу и столь малый размер, чтобы скорость убегания превзошла скорость света.

Когда Митчел и Лаплас впервые высказали эти пророческие мысли, скорость света (обозначаемая буквой  $c$ ) была известна уже более ста лет. Датский астроном Оле Рёмер в 1676 году определил, что она составляет колоссальную величину – 300 000 км (это примерно семь оборотов вокруг Земли) за одну секунду:

$$c = 300\,000 \text{ км/с}$$

При такой колоссальной скорости, чтобы удержать свет, требуется чрезвычайно большая или чрезвычайно сконцентрированная масса, однако нет видимых причин, по которым такой не могло бы существовать. В докладе Митчела Королевскому обществу

---

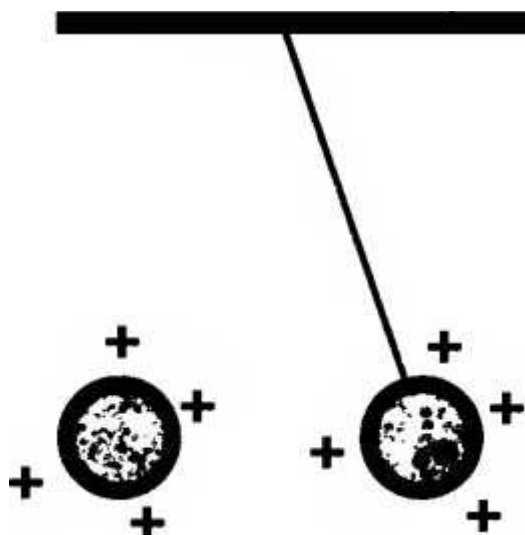
17 В оригинале употреблено слово «projectile» (снаряд – Примеч. перев.), и к нему дано следующее примечание: «The American Heritage Dictionary of the English Language (4-я ред.) определяет projectile как «выстреленный, брошенный или иным образом приведенный в движение объект, например пуля, не обладающий способностью к самодвижению». Может ли снаряд (projectile) быть отдельной частицей света? Согласно Митчелу и Лапласу, ответ будет утвердительным.

18 Скорость убегания также называют второй космической. Первой космической скоростью считается та, которой хватает для выхода на круговую орбиту вблизи поверхности Земли. – Примеч. перев.

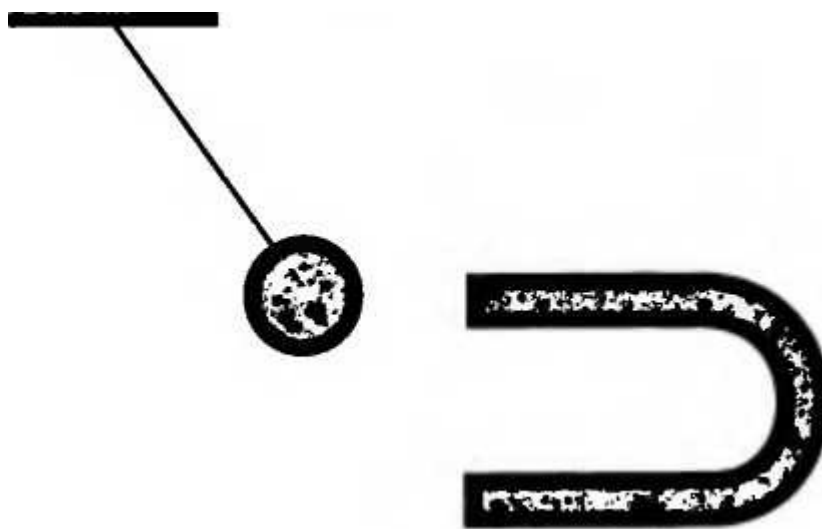
19 Представление о скорости убегания – это идеализация, в которой пренебрегается такими эффектами, как, скажем, сопротивление воздуха, из-за которого объекту могла бы потребоваться куда более высокая скорость.

впервые упоминаются объекты, которые Джон Уилер впоследствии назовет черными дырами.

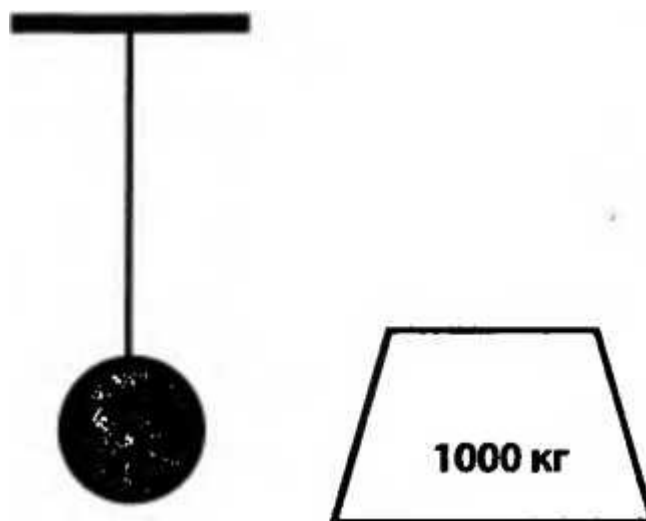
Вас может удивить, что среди всех сил гравитация считается чрезвычайно слабой. Хотя тучный лифтер и прыгун в высоту могут чувствовать себя по-разному, есть простой эксперимент, демонстрирующий, как слаба в действительности гравитация. Начнем с небольшого веса: пусть это будет маленький шарик пенопласта. Тем или иным способом придадим ему статический электрический заряд. (Можно просто потереть его о свитер.) Теперь подвесим его к потолку на нитке. Когда он перестанет крутиться, нить будет висеть вертикально. Теперь поднесите к висящему шарiku другой подобный заряженный предмет. Электростатическая сила будет отталкивать подвешенный груз, заставляя нить наклоняться.



Того же эффекта можно добиться с помощью магнита, если висящий груз сделан из железа.



Теперь уберите электрический заряд или магнит и попытайтесь отклонить подвешенный груз, поднося к нему очень тяжелые предметы. Их гравитация будет притягивать груз, но воздействие окажется столь слабым, что его невозможно заметить. Гравитация чрезвычайно слаба по сравнению с электрическими и магнитными силами.



Но если гравитация так слаба, почему нельзя допрыгнуть до Луны? Дело в том, что огромная масса Земли,  $6 \times 10^{24}$  кг, с легкостью компенсирует слабость гравитации. Но даже при такой массе скорость убегания с поверхности Земли составляет меньше одной десятитысячной от скорости света. Чтобы скорость убегания стала больше  $c$ , придуманная Митчелом и Лапласом темная звезда должна быть потрясающе массивной и потрясающе плотной.

Чтобы прочувствовать масштаб величин, давайте рассмотрим скорости убегания для разных небесных тел. Для покидания поверхности Земли нужна начальная скорость около 11 км/с, что, как уже отмечалось, составляет примерно 40 000 км/ч. По земным меркам это очень быстро, но в сравнении со скоростью света подобно движению улитки.

На астероиде у вас было бы куда больше шансов покинуть поверхность, чем на Земле. У астероида радиусом 1,5 км скорость убегания составляет около 2 м/с: достаточно просто прыгнуть. С другой стороны, Солнце много больше Земли, как по размеру, так и по массе<sup>20</sup>. Эти два фактора действуют в противоположных направлениях. Большая масса затрудняет покидание поверхности Солнца, а большой радиус, наоборот, упрощает. Масса, однако, побеждает, и скорость убегания для солнечной поверхности примерно в пятьдесят раз больше, чем для земной. Но она все равно остается много ниже скорости света.

Но Солнце не будет вечно сохранять свой нынешний размер. В конце концов звезда исчерпает запасы топлива, и распирающее ее давление, поддерживаемое внутренним теплом, ослабнет. Подобно гигантским тискам, гравитация начнет сжимать звезду до малой доли ее первоначального размера. Где-то через пять миллиардов лет Солнце выгорит и сколлапсирует в так называемый *белый карлик* с радиусом примерно как у Земли. Чтобы покинуть его поверхность, потребуется скорость 6400 км/с – это очень много, но все равно лишь 2 % от скорости света.

Если бы Солнце было немного – раза в полтора – тяжелее, добавочная масса стиснула бы его сильнее, чем до состояния белого карлика. Электроны в звезде вдавились бы в протоны, образуя невероятно плотный шар из нейтронов. Нейтронная звезда столь плотна, что одна лишь чайная ложка ее вещества весит несколько миллиардов тонн. Но и нейтронная звезда еще не искомая темная; скорость убегания с ее поверхности уже близка к скорости света (около 80 %  $c$ ), но все же не равна ей.

Если коллапсирующая звезда еще тяжелее, скажем, в пять раз массивнее Солнца, тогда даже плотный нейтронный шар не сможет противостоять сжимающему гравитационному притяжению. В результате финального направленного внутрь взрыва звезда сожмется в *сингулярность* – точку почти бесконечной плотности и разрушительной силы. Скорость убегания для этого крошечного ядра многократно превосходит скорость света. Так возникает

---

<sup>20</sup> Масса Солнца – около  $2 \times 10^{30}$  кг. Это примерно в миллион раз больше массы Земли. Радиус Солнца – около 700 000 км, то есть около сотни земных.

темная звезда, или, как мы сегодня говорим, черная дыра.

Эйнштейну так не нравилось само представление о черных дырах, что он отрицал возможность их существования, утверждая, что они никогда не смогут образоваться. Но нравится это Эйнштейну или нет, черные дыры – это реальность. Сегодня астрономы запросто изучают их, причем не только одиночные сколлапсировавшие звезды, но и находящиеся в центрах галактик черные гиганты, образованные слиянием миллионов и даже миллиардов звезд.



***Компьютерная модель черной дыры в 10 солнечных масс***

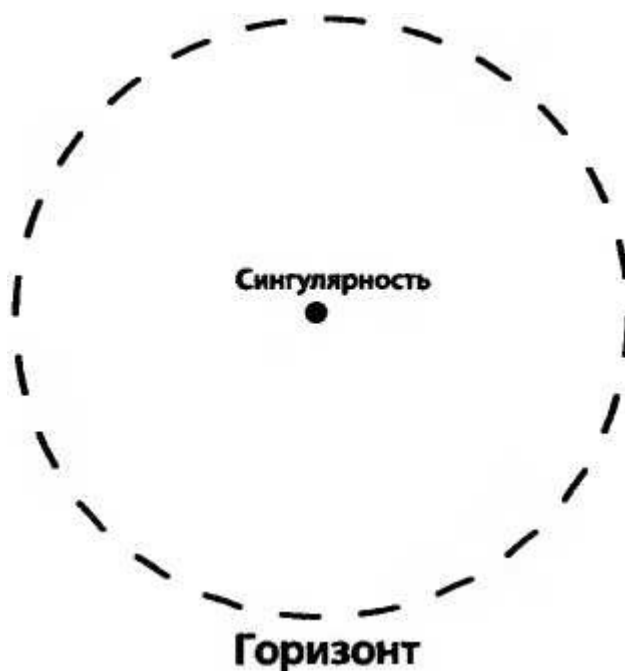
Солнце недостаточно массивно, чтобы самостоятельно сжаться в черную дыру, но, если помочь ему, сдавив его в космических тисках до радиуса в 3 км, оно стало бы черной дырой. Можно подумать, что, если потом ослабить тиски, оно снова раздуется, скажем, до 100 км, но в действительности будет уже поздно: вещество Солнца перейдет в состояние своего рода свободного падения. Поверхность быстро преодолеет радиус в одну милю, один метр, один сантиметр. Никакие остановки невозможны, пока не образуется сингулярность, и этот коллапс необратим.

Представьте, что мы находимся вблизи черной дыры, но в точке, отличной от сингулярности. Сможет ли свет, выйдя из этой точки, покинуть черную дыру? Ответ зависит как от массы черной дыры, так и от конкретного места, из которого свет начинает свое движение. Воображаемая сфера, называемая *горизонтом*<sup>21</sup>, делит Вселенную на две части. Свет, который идет изнутри горизонта, неминуемо будет затянут в черную дыру, однако свет, идущий извне горизонта, может черную дыру покинуть. Если бы Солнце стало однажды черной дырой, радиус его горизонта составил бы около 3 км.

Радиус горизонта называют *шварцшильдовским радиусом* в честь астронома Карла Шварцшильда, который первым стал изучать математику черных дыр. Шварцшильдовский радиус зависит от массы черной дыры; на самом деле он ей прямо пропорционален. Например, если массу Солнца заменить тысячей солнечных масс, у светового луча, испущенного с расстояния в 3 или 5 км, не будет шансов уйти прочь, поскольку радиус горизонта вырастет тысячекратно, до трех тысяч километров.

---

<sup>21</sup> Обычно используется термин «горизонт событий», чтобы не путать с горизонтом на поверхности планеты, однако автор везде использует краткую форму. – Примем, перев.



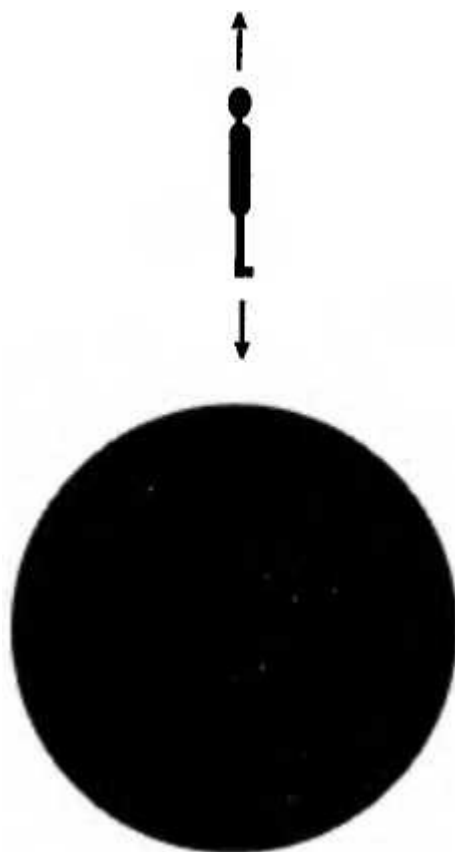
Пропорциональность между массой и радиусом Шварцшильда – первое, что физики узнали о черных дырах. Земля примерно в миллион раз менее массивна, чем Солнце, поэтому ее шварцшильдовский радиус в миллион раз меньше солнечного. Для превращения в темную звезду ее пришлось бы сжать до размеров клюквины. Для сравнения: в центре нашей Галактики притаилась гигантская черная дыра со шварцшильдовским радиусом около 150 000000 км – примерно как у земной орбиты вокруг Солнца. А в других уголках Вселенной встречаются и еще более крупные монстры.

### **Приливы и 2000-мильный человек**

Что заставляет моря подниматься и отступать, как будто ежедневно они делают два глубоких вдоха-выдоха? Дело, конечно, в Луне, но как она это делает и почему дважды в день? Я сейчас объясню, но сначала расскажу о падении 2000-мильного человека.

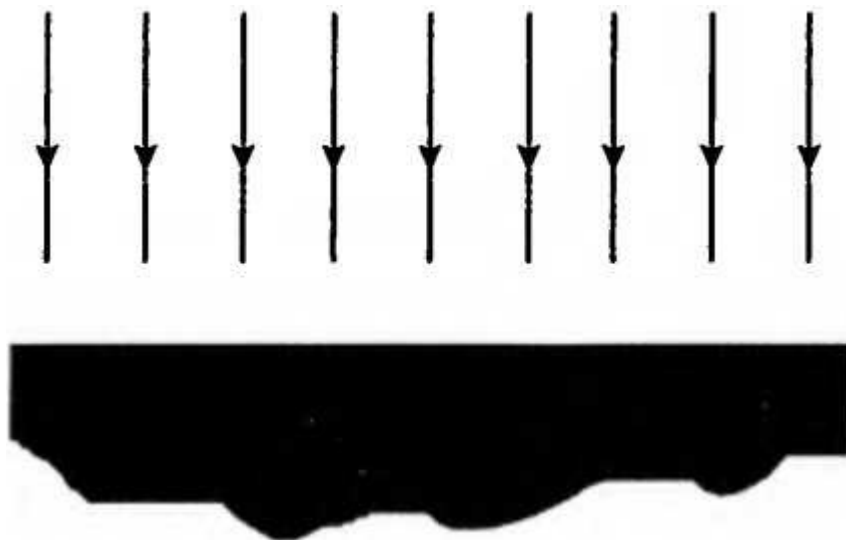
Представьте себе гиганта, ростом от темечка до пяток в 2000 миль (3200 км), который падает ногами вперед из космоса на Землю. Далеко в открытом космосе гравитация слаба, так слаба, что он ничего не чувствует. Однако по мере приближения к Земле в его Длинном теле возникает странное ощущение: но это не чувство падения, а чувство натяжения.

Дело не в ускорении гиганта в направлении Земли. Причина его дискомфорта в том, что гравитация в космосе неоднородна. Вдалеке от Земли она почти полностью отсутствует. Но по мере того как он приближается, гравитация возрастает. 2000-мильному человеку это доставляет неприятности, даже когда он находится в свободном падении. Бедняга столь высок, что его ноги притягиваются гораздо сильнее, чем голова. Результирующий эффект – неприятное чувство, как будто его ноги и голову тянут в противоположных направлениях.



Пожалуй, он мог бы избежать растяжения, падая в горизонтальном положении, так, чтобы ноги и голова были на одной высоте. Но когда гигант это попробует, то столкнется с другим неудобством: чувство натяжения сменяется равным чувством сжатия. Он чувствует, что его голова придавливается к ногам.

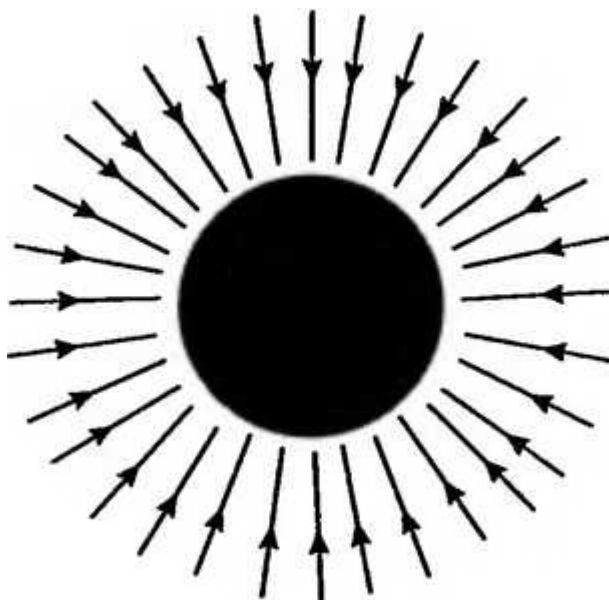
Чтобы понять, почему так происходит, представим на время, что Земля плоская. Вертикальные линии со стрелками указывают направление гравитационных сил, тянущих, естественно, прямо вниз.



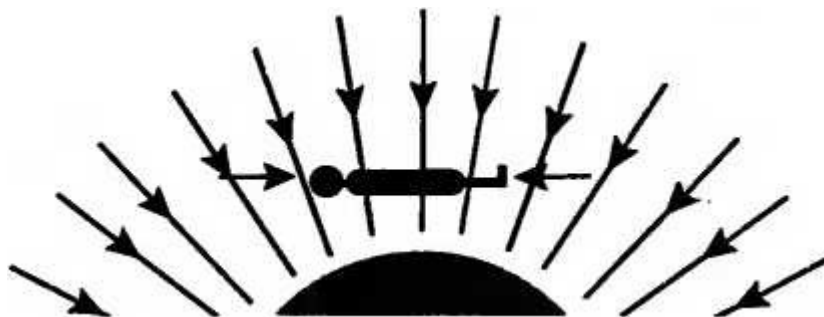
Более того, сила гравитационного притяжения совершенно одинакова. У 2000-мильного человека в таких условиях не было бы проблем, падай он в вертикальном положении или в горизонтальном, – по крайней мере, пока он не долетит до земли.

Но Земля не плоская. Как сила, так и направление ее тяготения меняются. Вместо того чтобы тянуть в одном направлении, гравитация притягивает прямо к центру планеты, как показано здесь:

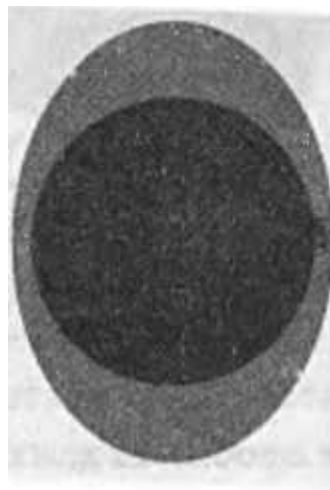




Это порождает новые проблемы для гиганта, когда он падает горизонтально. Силы, действующие на его голову и ноги, не будут одинаковыми, поскольку гравитация, тянущая их к центру Земли, будет прижимать его голову к ногам, вызывая странное ощущение сдавливания.



Вернемся к вопросу об океанских приливах. Причина двукратных ежедневных подъемов и спадов моря та же, что вызывает дискомфорт у 2000-милльного человека: неоднородность гравитации. Только в данном случае это гравитация лунная, а не земная. Лунное притяжение сильнее всего действует на океаны на той стороне Земли, которая обращена к Луне, а слабее всего – на противоположной стороне. Может показаться, что Луна должна породить один океанский горб на ближней стороне, но это ошибка. По той же причине, по которой голова высокого человека оттягивается от его ног, вода с двух сторон Земли – ближней и дальней – выпячивается над ее поверхностью. Один из способов понять это – считать, что на ближней стороне Луна оттягивает воду от Земли, а на дальней – Землю от воды. В результате получается два горба на противоположных сторонах Земли, обращенных к Луне и от нее. Пока Земля делает один оборот под этими горбами, каждая точка на ее поверхности испытывает два прилива.



Деформирующие силы, вызванные изменениями величины и направления гравитационного притяжения, называют *приливными силами*, будь они вызваны Луной, Землей, Солнцем или любым другим массивным небесным телом. Может ли человек обычных размеров почувствовать приливные силы, например, когда прыгает с трамплина в воду? Нет, но лишь потому, что мы так малы, что земное гравитационное поле практически не меняется в пределах тела.

### Схождение в преисподнюю

Низшел путем лесистым в мрак пучин.

– Данте. *Божественная комедия*<sup>22</sup>

Для человека, падающего в черную дыру солнечной массы, приливные силы уже не будут столь слабыми. Огромная масса, сжатая в крошечный объем черной дыры, делает гравитацию вблизи горизонта не только очень сильной, но еще и крайне неоднородной. Задолго до подлета к радиусу Шварцшильда, на расстоянии более 100 000 км от черной дыры, приливные силы вызовут сильнейший дискомфорт. Подобно 2000-миллионному человеку, вы окажетесь слишком велики для быстро меняющегося гравитационного поля черной дыры. К моменту сближения с горизонтом вы деформируетесь – почти как зубная паста, выдавливаемая из тюбика.

Есть два способа справиться с приливными силами на горизонте черной дыры: уменьшиться самому или сделать больше черную дыру. Бактерия не заметила бы приливных сил на горизонте черной дыры солнечной массы, но и вы не почувствовали бы приливных сил на горизонте черной дыры в миллион солнечных масс. Это может показаться странным, поскольку воздействие гравитации более массивной черной дыры сильнее. Но в этом суждении игнорируется важный факт: горизонт крупной черной дыры настолько велик, что будет казаться почти плоским. Вблизи горизонта гравитационное поле будет очень сильным, но практически однородным.

Если вы немного знакомы с ньютоновской теорией гравитации, то сможете рассчитать приливные силы на горизонте темной звезды. И тогда окажется, что чем она больше и массивнее, тем меньше приливные силы на горизонте. Поэтому пересечение горизонта очень

---

22 Перевод Д. Мина. – Примеч. перев.

большой черной дыры будет ничем не примечательным событием. Но в итоге от приливных сил не спастись даже в величайшей из черных дыр. Ее размеры лишь отсрочат неизбежное. В конце концов неминуемое падение к сингулярности будет столь же ужасным, как и любая пытка, придуманная Данте или примененная Торквемадой в процессах испанской инквизиции. (В памяти всплывает дыба.) Даже мельчайшая бактерия будет разорвана на части вдоль вертикальной оси и сплющена по горизонтальной. Небольшие молекулы проживут дольше бактерий, а атомы еще немного дольше. Но рано или поздно сингулярность одержит верх даже над отдельным протоном. Не знаю, прав ли Данте, утверждая, что ни один грешник не избежит адских мук, но я совершенно уверен: ничто не сможет устоять против чудовищных приливных сил вблизи сингулярности черной дыры.

Но, несмотря на всю чуждость и брутальность свойств сингулярности, не в ней заключены глубочайшие загадки черной дыры. Мы знаем, что происходит с любым объектом, который угораздило попасть в черную дыру, – судьба его незавидна. Однако нравится нам сингулярность или нет, она и близко не подходит по парадоксальности к горизонту. В современной физике практически ничто не вызывало большей путаницы, чем вопрос о том, что происходит с материей, когда она проваливается сквозь горизонт? Любой ваш ответ, вероятно, будет ошибочным.

Митчел и Лаплас жили задолго до рождения Эйнштейна и не могли знать о двух открытиях, совершенных им в 1905 году. Первым из них была специальная теория относительности, в основе которой лежит принцип: *ничто* – ни свет, ни что-либо другое – никогда не может превысить скорость света. Митчел и Лаплас понимали, что от темной звезды не может уйти свет, но они не догадывались о невозможности этого ни для чего другого.

Вторым открытием Эйнштейна, сделанным в 1905 году, было то, что свет *действительно* состоит из частиц. Вскоре после того, как Митчел и Лаплас выдвинули свои соображения относительно темных звезд, ньютоновская корпускулярная теория света оказалась в опале. Накопились доказательства того, что свет состоит из волн, подобных звуковым или тем, что бегут по поверхности моря. К 1865 году Джеймс Клерк Максвелл показал, что свет состоит из колеблющихся *электрического и магнитного полей*, которые распространяются сквозь пространство со скоростью света, и корпускулярная теория вовсе перестала подавать признаки жизни. Похоже, никто и не задумывался, что электромагнитные волны тоже могут притягиваться гравитацией, так что темные звезды были забыты.

Забыты, пока в 1917 году астроном Карл Шварцшильд не решил уравнения новой, общей теории относительности Эйнштейна и не переоткрыл темные звезды<sup>23</sup>.

### Принцип эквивалентности

Как и большинство эйнштейновских работ, общая теория относительности была сложной и изысканной, но она строилась на исключительно простых наблюдениях. Фактически они настолько элементарные, что были доступны каждому, но никто их не сделал.

Это было в стиле Эйнштейна – делать далеко идущие выводы из простейших мысленных экспериментов. (Лично меня этот способ мышления восхищает более всех прочих.) В случае общей теории относительности в мысленном эксперименте участвовал наблюдатель в лифте. Учебники часто модернизируют эксперименты, заменяя лифт ракетой, но в эпоху Эйнштейна лифты были захватывающей новой технологией. Он первым представил себе лифт, свободно плывущий в открытом космосе, вдали от любых тяготеющих объектов. Всякий, кто находится в таком лифте, будет испытывать полную

---

<sup>23</sup> Черные дыры бывают разных видов. В частности, они могут вращаться вокруг своей оси, если вращалась исходная звезда (в той или иной мере вращаются все звезды), и они могут быть электрически заряжены. Сбросив электрон в черную дыру, мы ее зарядим. Шварцшильдовскими черными Дырами принято называть только те, которые не вращаются и не имеют заряда.

невесомость, а снаряды будут пролетать мимо по идеально прямым траекториям с постоянной скоростью.

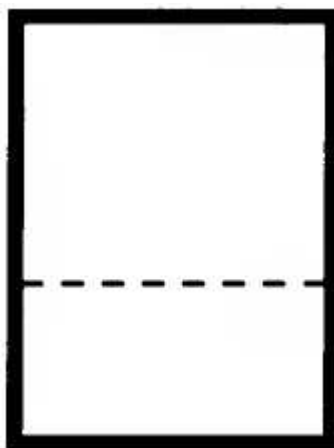


С лучами света будет происходить то же самое, но, конечно, на скорости света.

Далее Эйнштейн представил, что случится, если начать ускорять лифт вверх, скажем, с помощью кабеля, прикрепленного к какому-то далекому якорю, или посредством укрепленных под днищем ракет. Пассажиры начнут прижиматься к полу, а траектории снарядов станут загигаться вниз, образуя параболические орбиты. Все будет в точности также, как и под воздействием гравитации. Все знают об этом со времен Галилея, но Эйнштейну выпало превратить этот простой факт в новый мощный физический принцип. Принцип эквивалентности гласит, что не существует абсолютно никакой разницы между воздействием гравитации и воздействием ускорения. Никакой эксперимент, проведенный внутри лифта, не позволит отличить, покоится лифт в гравитационном поле или ускоряется в открытом космосе.

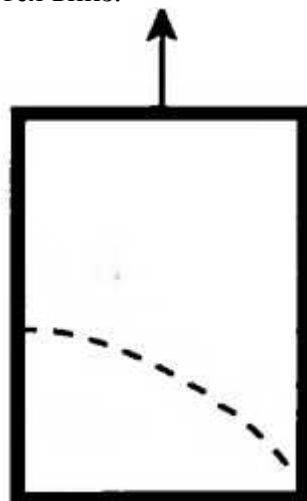
Само по себе это не было удивительно, однако имело важнейшие следствия. В то время, когда Эйнштейн сформулировал принцип эквивалентности, было очень мало известно о том, как гравитация влияет на другие явления, такие как течение электричества, поведение магнитов или распространение света. Согласно эйнштейновскому подходу, начинать следовало с того, чтобы разобраться, как на все эти явления воздействует ускорение. При этом обычно не появлялось какой-то новой физики. Все, что делал Эйнштейн, — это представлял себе, как известные явления будут выглядеть в ускоряющемся лифте. А затем принцип эквивалентности подсказывал ему, каково будет влияние гравитации.

В первом примере рассматривалось поведение света в гравитационном поле. Представьте себе световой луч, движущийся горизонтально слева направо поперек лифта. Если бы лифт свободно двигался вдаль от любых тяготеющих масс, свет шел бы по идеально прямой горизонтальной линии.



Но теперь допустим, что лифт ускоряется вверх. Свет начинает движение с левой стороны лифта в горизонтальном направлении, но из-за того, что лифт ускоряется, ко времени прихода на другую его сторону у света появится составляющая движения,

направленная вниз. С одной точки зрения, лифт ускоряется вверх, но, с другой, – его пассажирам кажется, что свет ускоряется вниз.



Фактически световой луч искривляется так же, как и траектория очень быстрой частицы. Этот результат никак не зависит от того, состоит свет из волн или из частиц; это просто эффект направленного вверх ускорения. Но, рассуждал Эйнштейн, если ускорение заставляет изгибаться траекторию светового луча, то же самое должна делать и гравитация. В действительности можно сказать, что гравитация притягивает свет и заставляет его падать. Это полностью совпадает с догадками Митчела и Лапласа.

Есть, однако, и другая сторона медали: если ускорение способно симитировать воздействие гравитации, то оно может его и уничтожить. Представьте себе тот же лифт уже не бесконечно далеко в открытом космосе, а наверху небоскреба. Если он стоит, пассажиры наблюдают все эффекты гравитации, включая искривление лучей света, идущих поперек лифта. Но затем трос лопается, и лифт начинает ускоряться в направлении земли. В течение короткого времени свободного падения кажется, что гравитация внутри лифта полностью исчезла<sup>24</sup>. Пассажиры плавают по кабине, утратив чувство верха и низа. Частицы и пучки света движутся по идеально прямым линиям. Это обратная сторона принципа эквивалентности.

### Сточные, глухие и черные дыры

Всякий, кто пытается описать современную физику без математических формул, знает, насколько полезными бывают аналогии. Например, очень удобно думать, что атом – это миниатюрная планетная система, а использование обычной ньютоновской механики для описания темных звезд помогает тем, кто не готов погружаться в высшую математику общей теории относительности. Но аналогии имеют свои ограничения, и темная звезда в качестве аналога черной дыры перестает работать, если зайти достаточно глубоко. Существует другая, более удачная аналогия. Я узнал о ней от одного из пионеров квантовой механики черных дыр Билла Унру. Возможно, она мне особенно нравится потому, что по своей первой специальности я – водопроводчик.

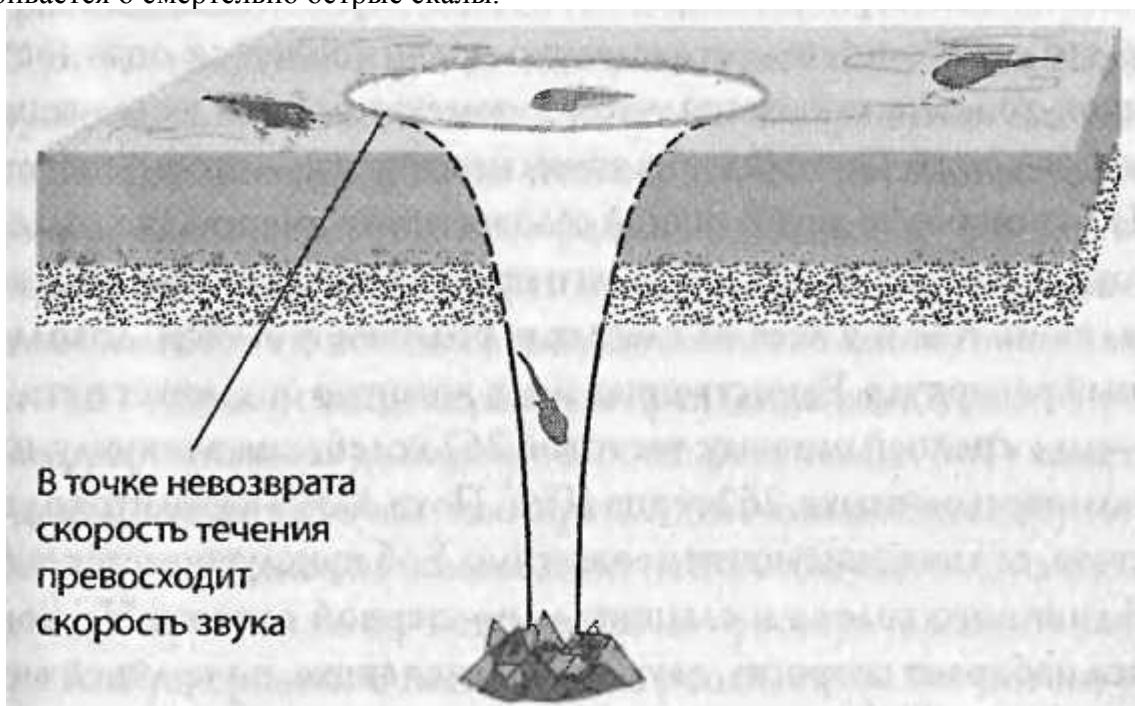
Представьте себе бесконечное мелководное озеро. Его глубина всего несколько футов, но оно неограниченно простирается в горизонтальной плоскости. По всему озеру обитают слепые головастики, они проводят здесь всю жизнь, не видя света, но отлично пользуются звуком для локации предметов и общения. Есть одно нерушимое правило: ничто не может двигаться в воде быстрее, чем со скоростью звука. Для большинства задач это ограничение скорости несущественно, поскольку головастики движутся гораздо медленнее.

Но в озере есть опасность. Многие головастики обнаруживают ее слишком поздно, чтобы спастись, и никто еще не возвращался назад, чтобы рассказать, что с ним случилось. В

---

<sup>24</sup> Я предполагаю, что лифт достаточно мал, чтобы пренебречь приливными силами.

центре озера находится сточное отверстие. Вода через него попадает в подземную пещеру, где разбивается о смертельно острые скалы.



Если взглянуть на озеро сверху, то видно, что вода движется к стоку. Вдали от него скорость воды необнаружимо мала, но чем ближе, тем она становится больше. Предположим, что сток отводит воду так быстро, что на некотором расстоянии ее скорость достигает скорости звука. Еще ближе к стоку течение становится сверхзвуковым. Это действительно очень опасный сток.

Плавающие в воде головастики, знакомые только со своей жидкой средой обитания, никогда не знают, насколько быстро они в действительности движутся; все вокруг них утягивается водой с одной и той же скоростью. Большая опасность состоит в том, что их может затянуть в сток и они погибнут на острых камнях. В действительности, как только один из них пересек радиус, на котором скорость течения превышает звуковую, он обречен. Пройдя эту точку невозврата, он не сможет ни преодолеть течение, ни даже послать предупреждение другим, кто еще находится в безопасной области (никакой акустический сигнал не может двигаться в воде быстрее звука). Унру называет такое сточное отверстие и его точку невозврата *глухой дырой* – глухой в смысле молчащей, поскольку никакой звук выйти из нее не может.

Одно из самых интересных свойств точки невозврата состоит в том, что неосторожный наблюдатель, проплывая через нее, поначалу не заметит ничего необычного. Нет никаких предупреждающих указателей или сирен, нет препятствий, которые могли бы остановить его, ничто не подскажет ему о надвигающейся опасности. В какой-то момент кажется, что все замечательно, и в следующий момент – тоже. Прохождение точки невозврата – это не-событие.

И вот свободно дрейфующий головастик по имени Алиса плывет к стоку, напевая песенку для своего друга Боба, оставшегося на отдалении. Как и у всех ее слепых сородичей, у Алисы, довольно бедный репертуар. Единственная нота, которую она может петь, – это «до» средней октавы с частотой 262 колебания в секунду, или, на техническом языке, 262 герца (Гц)<sup>25</sup>. Пока Алиса находится вдали от стока, ее движение почти неощутимо. Боб прислушивается к звуку Алисиного голоса и слышит «до» первой октавы. Но когда Алиса набирает скорость, звук становится ниже, по крайней мере в восприятии Боба; «до» сменяется на «си», потом на «ля». Вызвано это так называемым доплеровским

---

<sup>25</sup> Единица частоты герц названа в честь немецкого физика Генриха Герца. Один герц – это то же самое, что одно колебание в секунду.

сдвигом, его можно заметить, когда мимо вас проходит скорый поезд со включенным свистком. Пока поезд приближается, звук свистка кажется вам более высоким, чем машинисту в кабине. Когда же свисток проходит мимо вас и начинает удаляться, звук понижается. Каждое последующее колебание вынуждено проходить немного больший путь, чем предыдущее, и оно достигает вашего уха с небольшой задержкой. Время между последовательными звуковыми колебаниями увеличивается, и вы слышите более низкую частоту. Более того, если поезд, удаляясь от вас, набирает скорость, то воспринимаемая частота будет становиться все ниже и ниже.

То же самое происходит с музыкальной нотой Алисы по мере приближения к точке невозврата. Сначала Боб слышит частоту 262 Гц. Потом она снижается до 200 Гц, затем до 100 Гц, до 50 Гц и т. д.

Звуку, испущенному совсем рядом с точкой невозврата, понадобится очень много времени, чтобы уйти прочь; движение воды почти полностью гасит направленную наружу скорость звука, замедляя его почти до полной остановки. Вскоре звук становится таким низким, что без специального оборудования Боб уже не может его расслышать.

У Боба может быть специальное оборудование, позволяющее фокусировать звуковые волны и получать изображения Алисы по мере ее приближения к точке невозврата. Но последовательным звуковым волнам требуется все больше и больше времени, чтобы дойти до Боба, из-за чего все, что касается Алисы, выглядит замедленным. Ее голос становится ниже; движения ее лапок замедляются почти до полной остановки. Самый последний взмах, замеченный Бобом, растягивается до бесконечности. Фактически Бобу кажется, что для достижения точки невозврата Алисе понадобится вечность.

Между тем Алиса не замечает ничего необычного. Она безмятежно дрейфует за точку невозврата, не чувствуя никакого замедления или ускорения. Опасность она осознает только потом, уже падая на смертоносные скалы. Здесь мы видим одну из ключевых особенностей черных дыр: разные наблюдатели парадоксальным образом совершенно по-разному воспринимают одни и те же события. Бобу, судя по приходящим звукам, кажется, что Алисе потребуется вечность, чтобы достичь точки невозврата, но для Алисы это может случиться в мгновение ока.

Вы уже наверняка догадались, что точка невозврата – это аналог горизонта черной дыры. Замените звук светом (напоминаю, ничто не может двигаться быстрее света), и получится очень точная иллюстрация свойств шварцшильдовской черной дыры. Как и в случае сточного отверстия, все, что пересекло горизонт, уже не может вырваться назад или даже оставаться в покое. Опасность же в черной дыре – это не острые скалы, а находящаяся в центре сингулярность. Вся материя внутри горизонта стягивается к сингулярности, где ее сожмет до бесконечного давления и плотности.

Вооружившись аналогией глухой дыры, можно прояснить для себя многие парадоксальные свойства черных дыр. Пусть, например, Боб уже не головастик, а астронавт на космической станции, обращающейся на безопасном расстоянии вокруг черной дыры. Алиса же, падая к горизонту, не поет – в открытом космосе нет воздуха, чтобы донести ее голос, – а подает сигналы голубым фонариком. По мере ее падения Боб видит, как свет смещается по частоте от голубого к красному, затем к инфракрасному, микроволновому излучению и, наконец, становится низкочастотными радиоволнами. Сама же Алиса выглядит все более вялой, замедляясь почти до полной остановки. Боб никогда не увидит, как она пересекает горизонт; с его точки зрения, на то, чтобы достичь точки невозврата, Алисе понадобится бесконечное время. Но Алиса в своей системе отсчета спокойно проваливается сквозь горизонт и начинает чувствовать что-то странное, лишь приближаясь к сингулярности.

Горизонт шварцшильдовской черной дыры располагается на радиусе Шварцшильда. Хотя Алиса и обречена после его пересечения, тем не менее у нее остается, как и у головастиков, немного времени, прежде чем она погибнет в сингулярности. Но сколько именно? Это зависит от размера, то есть от массы, черной дыры. Чем больше масса, тем

больше шварцшильдовский радиус и тем больше времени в запасе у Алисы. В черной дыре с массой Солнца у нее будет всего лишь десять микросекунд. В черной дыре, которая располагается в центре галактики и может иметь массу в миллиард раз больше, у Алисы будет миллиард микросекунд, то есть примерно полчаса. Можно вообразить еще более крупную черную дыру, в которой Алиса сможет прожить целую жизнь и, возможно, даже несколько поколений ее потомков успеют состариться и умереть, прежде чем их уничтожит сингулярность.

Разумеется, по наблюдениям Боба, Алиса никогда не доберется до горизонта. Так кто же прав? Достигнет она горизонта или нет? Что реально происходит? И *реально* ли это? В конце концов, физика – это наблюдательная и экспериментальная наука, так что можно было бы отдать предпочтение надежным наблюдениям Боба, пусть они и находятся в очевидном противоречии с Алисиным описанием событий. (Мы еще вернемся к Алисе и Бобу после того, как обсудим удивительные квантовые свойства черных дыр, открытые Якобом Бекенштейном и Стивеном Хокингом.)

Аналогия со стоком хороша для многих целей, но, как и все аналогии, имеет свои границы. Например, когда объект проваливается сквозь горизонт, его масса добавляется к массе черной дыры. Рост массы означает расширение горизонта. Это, несомненно, можно смоделировать в аналогии со сточным отверстием, скажем, установив в нем насос для управления потоком. Каждый раз, когда в сток что-то падает, насос должен немного повышать мощность, ускоряя поток и отодвигая точку невозврата немного дальше. Но такая модель быстро теряет свою простоту<sup>26</sup>.

Еще одно свойство черных дыр заключается в том, что они сами способны двигаться. Если поместить черную дыру в гравитационное поле другой массы, она будет ускоряться, как и любой другой массивный объект. Она даже может упасть в более крупную черную дыру. Если попытаться отразить все эти свойства реальных черных дыр в аналогии со сточным отверстием, она станет сложнее той математики, применения которой она позволяет избежать. Но, несмотря на эти ограничения, сток – это очень полезное представление, позволяющее понять основные свойства черных дыр без овладения уравнениями общей теории относительности.

### Несколько формул для тех, кто их любит

Я написал эту книгу для читателей, не склонных к математике, однако для тех, кому по душе немного математических выкладок, здесь приведено несколько формул и пояснен их смысл. Если вам это неинтересно, просто переходите к следующей главе. Это же не экзамен.

Согласно ньютоновскому закону тяготения, каждый объект во Вселенной притягивает все другие объекты, причем сила гравитации *пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*:

$$F = \frac{mMG}{D^2}.$$

Это одно из самых знаменитых физических уравнений, оно почти так же широко известно, как и  $E = mc^2$  (это прославленное уравнение связывает энергию  $E$  с массой  $m$  и скоростью света  $c$ ).

В левой части стоит сила  $F$ , действующая между двумя массами, такими как Луна и Земля или Земля и Солнце. С правой стороны большая масса  $M$  и меньшая масса  $m$ . Например, масса Земли  $6 \times 10^{24}$  кг, а масса Луны –  $7 \times 10^{22}$  кг. Расстояние между массами

---

<sup>26</sup> Профессор Джордж Эллис напомнил мне об одной тонкости, связанной с переменным потоком. В этом случае точка невозврата не совпадает в точности с тем местом, где скорость воды совпадает со скоростью звука. В случае черных дыр существует аналогичная тонкая разница между видимым горизонтом видимости и истинным.

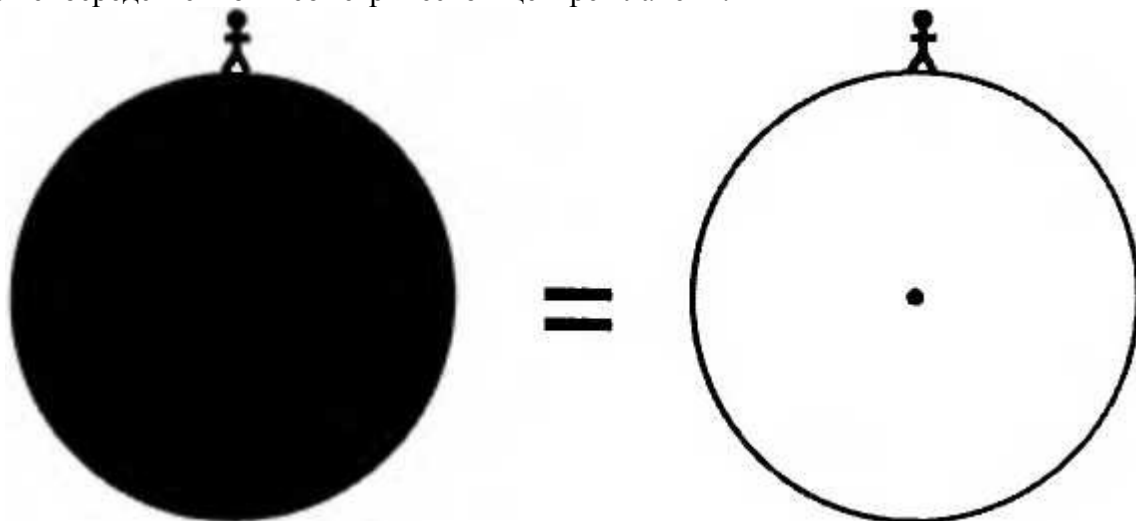


обозначено  $D$ . Расстояние от Земли до Луны составляет около  $4 \times 10^8$  м.

Последнее обозначение в уравнении,  $G$ , – это числовая константа, называемая ньютоновой гравитационной постоянной. Эту величину нельзя вывести чисто математически. Чтобы найти ее значение, необходимо измерить силу притяжения между двумя известными массами, находящимися на некотором известном расстоянии. Как только это сделано, можно вычислить силу, действующую между любыми двумя массами на любом расстоянии. По иронии судьбы, Ньютон так никогда и не узнал величину своей собственной постоянной. Дело в том, что гравитация так слаба, а величина  $G$ , соответственно, так мала, что измерить ее не удавалось до конца XIX столетия. К тому времени английский физик Генри Кавендиш разработал хитроумный способ измерения чрезвычайно малых сил. Кавендиш обнаружил, что сила, действующая между парой килограммовых масс, разнесенных на один метр, составляет примерно  $6,7 \times 10^{-11}$  ньютона. (Ньютон – это единица силы в метрической системе Си. Она составляет примерно десятую долю веса одного килограмма.) Таким образом, значение гравитационной постоянной в системе Си составляет:

$$G = 6,7 \times 10^{-11}.$$

Изучая следствия из своей теории, Ньютон совершил одно важное открытие, касающееся особых свойств закона обратных квадратов. Когда вы измеряете собственный вес, часть гравитационной силы, тянущей вас к Земле, вызвана массой, находящейся прямо у вас под ногами, еще часть связана с массой глубоко внутри Земли, а часть составляет вклад масс на противоположной стороне Земли на расстоянии в 12,5 тысячи километров. Но благодаря математическому чуду можно считать, будто вся масса сосредоточена в одной точке непосредственно в геометрическом центре планеты.



*Гравитация массивного шара точно такая же, как если бы вся масса была сосредоточена в его центральной точке*

Этот удобный факт позволил Ньютону вычислять скорость убегания от крупного объекта, заменяя его протяженную массу крошечной массивной точкой. И вот результат:

$$\text{скорость убегания} = \sqrt{2MG/R}.$$

Эта формула четко показывает, что чем больше масса и меньше радиус  $R$ , тем выше становится скорость убегания.

Теперь уже легко вычислить радиус Шварцшильда. Все, что нужно для этого сделать, – это подставить скорость света в качестве скорости убегания и затем разрешить полученное уравнение относительно радиуса:

$$R_S = \frac{2MG}{c^2}.$$

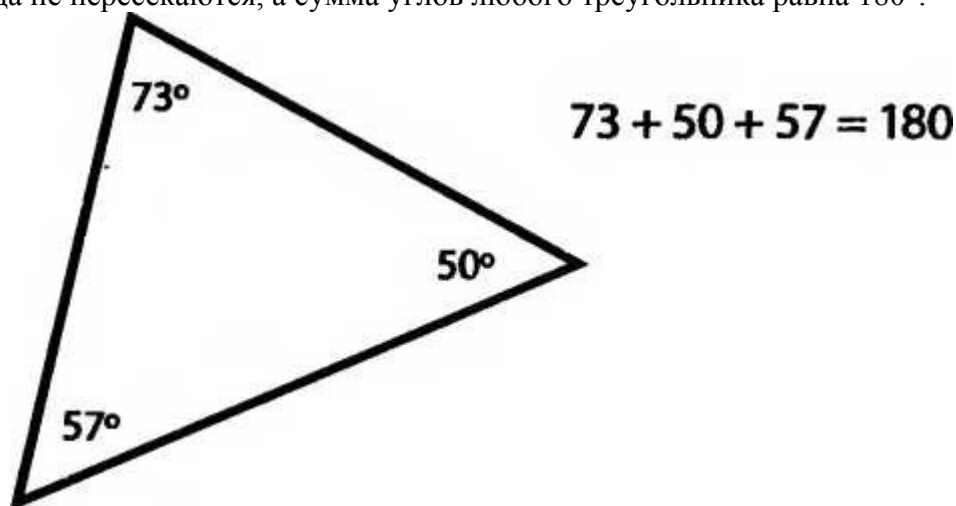
Отметим тот важный факт, что радиус Шварцшильда прямо пропорционален массе.

Вот и все, что касается темных звезд, по крайней мере на том Уровне, который был доступен Лапласу и Митчелу.

### 3

#### Недедовская геометрия

В далеком прошлом, когда такие математики, как Гаусс, Бойяи, Лобачевский и Риман<sup>27</sup>, еще не успели все запутать, геометрия означала евклидову геометрию – ту самую, которую все мы учили в школе. Все начиналось с планиметрии – геометрии идеально плоской двумерной поверхности. Первичными понятиями были точки, прямые линии и углы. Мы учили, что три точки задают треугольник, если они не лежат на одной прямой, параллельные прямые никогда не пересекаются, а сумма углов любого треугольника равна  $180^\circ$ .



Потом, если курс обучения был таким же, как у меня, вы расширяли свои представления на три измерения. Что-то оставалось таким же, как и в двух измерениях, но что-то менялось, иначе между двумя и тремя измерениями не было бы никакой разницы. Например, в трех измерениях есть прямые линии, которые нигде не пересекаются, но при этом не параллельны; они называются скрещивающимися.

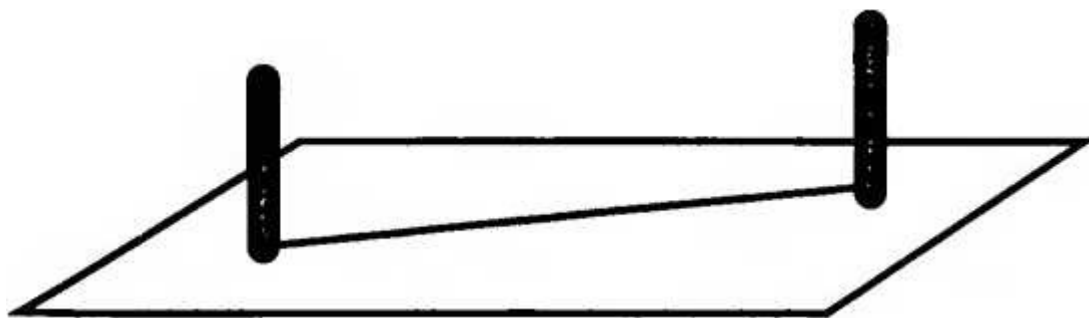


Как в двух, так и в трех измерениях законы геометрии остаются теми, что сформулировал Евклид около 300 года до нашей эры. Однако геометрии другого типа – с другими аксиомами – возможны даже в двумерном случае.

<sup>27</sup> Карл Фридрих Гаусс (1777–1855), Янош Бойяи (1802–1860), Николай Лобачевский (1792–1856) и Георг Фридрих Бернхард Риман (1826–1866).

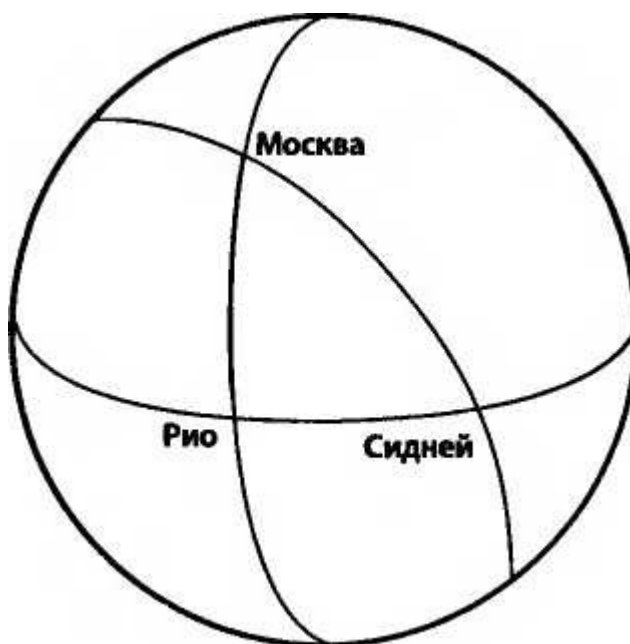
Буквальное значение слова «геометрия» – измерение Земли. Ирония в том, что если бы Евклид реально озаботился измерением треугольников на земной поверхности, он бы обнаружил, что евклидова геометрия не работает. Дело в том, что земная поверхность является сферой<sup>28</sup>, а не плоскостью. В сферической геометрии, конечно, есть точки и углы, но далеко не очевидно, что в ней есть нечто подобное прямым линиям. Посмотрим, удастся ли придать какой-то смысл словам «прямая линия на сфере».

Привычный способ описания прямой линии в евклидовой геометрии состоит в том, что это кратчайший путь между двумя точками. Если я захочу построить прямую линию на футбольном поле, то вобью в землю два колышка, соединю их леской и натяну ее как можно сильнее. Натягивание лески гарантирует, что линия будет самой короткой из возможных.



Этот принцип кратчайшего пути между двумя точками можно легко распространить на сферу. Допустим, надо найти кратчайший путь между Москвой и Рио-де-Жанейро. Нам понадобится глобус, две кнопки и упругая нить. Воткнув кнопки в Москву и Рио, можно натянуть нить вдоль поверхности глобуса и определить кратчайший маршрут. Такие кратчайшие маршруты, подобные экватору и меридианам, называют *большими кругами*. Есть ли смысл называть их прямыми линиями в сферической геометрии? Да неважно, как мы их назовем. Важно то, как логически соотносятся между собой точки, углы и линии.

Будучи кратчайшим путем между двумя точками, такие линии являются в некотором смысле наиболее прямыми из возможных линий на сфере. Корректное математическое название для таких путей – *геодезические*. Если на обычной плоскости геодезические являются обычными прямыми линиями, то на сфере геодезические – это большие круги.



---

28 Я, конечно, имею в виду идеализированную, совершенно круглую Землю.

### ***Большие круги на сфере***

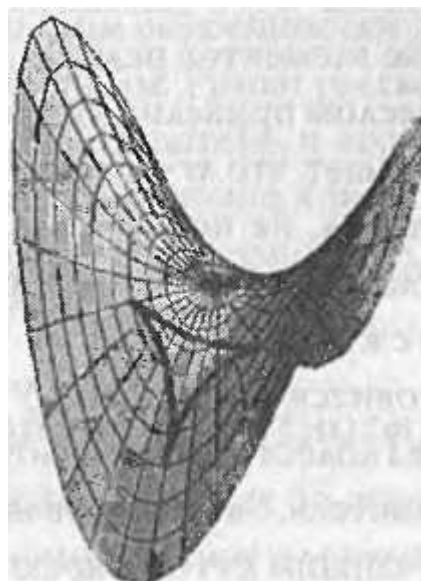
Получив эту сферическую замену прямых линий, мы можем перейти к конструированию треугольников. Отметим на сфере три точки, скажем Москву, Рио и Сидней. Затем нарисуем геодезические, попарно соединяющие эти точки: геодезическую Москва – Рио, геодезическую Рио – Сидней и, наконец, геодезическую Сидней– Москва. В результате получится *сферический треугольник*.



### ***Сферический треугольник***

В планиметрии, если сложить углы любого треугольника, получится ровно 180 градусов. Но если внимательно присмотреться к сферическому треугольнику, то видно, что его стороны выпячиваются наружу, что делает углы большими, чем они были бы на плоскости. В результате сумма углов сферического треугольника всегда больше 180 градусов. Про поверхность, на которой треугольники обладают таким свойством, говорят, что она имеет *положительную кривизну*.

Могут ли существовать поверхности противоположного свойства, а именно чтобы сумма углов треугольника была меньше 180 градусов? Пример такой поверхности – седло. Седловидные поверхности имеют *отрицательную кривизну*; геодезические, образующие треугольник на поверхности отрицательной кривизны, не выпячиваются, а, наоборот, втягиваются.



Итак, независимо от того, способен наш ограниченный мозг визуализировать

искривленное трехмерное пространство или нет, мы знаем, как экспериментально проверить его на кривизну. Ключом служат треугольники. Выберите любые три точки в пространстве, как можно туго натяните между ними нити, чтобы образовался трехмерный треугольник. Если сумма углов составляет  $180^\circ$  для любого такого треугольника, то пространство плоское, если нет – искривленное.

Могут существовать геометрии намного более сложные, чем сферы и седла, – геометрии с беспорядочными холмами и долинами, имеющие области как с положительной, так и с отрицательной кривизной. Но правило для построения геодезических всегда остается простым. Представьте, что вы ползете по такой поверхности и все время держите нос прямо, никогда не поворачивая головы. Не оглядывайтесь; не заботьтесь, откуда вы пришли и куда направляетесь; просто тупо ползите вперед. Ваш путь окажется геодезической.

Представьте себе человека в инвалидном кресле, пытающегося сориентироваться в пустыне среди песчаных дюн. Имея ограниченный запас воды, он должен выбраться оттуда как можно быстрее. Округлые холмы, седловидные перевалы и глубокие долины образуют участки ландшафта с положительной и отрицательной кривизной, и в целом совершенно не очевидно, куда лучше всего направить кресло. Человек считает, что высокие холмы и глубокие долины будут замедлять его движение, так что поначалу решает объезжать их. Механизм управления креслом прост: если замедлить одно колесо относительно другого, то кресло поворачивает в этом направлении.

Однако через несколько часов человек начинает подозревать, что проезжает мимо тех же элементов рельефа, где уже был ранее. Попытки управления креслом привели к опасному случайному блужданию. Теперь он понимает, что лучшей стратегией было движение абсолютно прямо вперед, не поворачивая ни влево, ни вправо. «Езжай прямо, куда глаза глядят», – говорит он себе. Но как убедиться, что не сбился с курса?

Ответ скоро становится очевидным. У кресла есть механизм, который фиксирует два колеса друг относительно друга, так что они крутятся как единая гантель. Зафиксировав колеса таким образом, он отправляется кратчайшим путем к краю пустыни.



В каждой точке траектории путешественник движется по прямой линии, но в целом его путь выглядит сложной выходящей кривой. Тем не менее она настолько пряма и коротка, насколько это возможно.

Вплоть до девятнадцатого столетия математики не приступали к изучению новых типов геометрии с альтернативными аксиомами. Лишь немногие, такие как Георг Фридрих Бернхард Риман, задумывались над той возможностью, что «реальная» геометрия – геометрия реального пространства – может быть не строго евклидовой. Но только Эйнштейн первым отнесся к этой идее серьезно. В общей теории относительности геометрия пространства (или, более корректно, пространства-времени) становится вопросом для экспериментаторов, а не для философов или даже математиков. Математики могут сказать, какие типы геометрии возможны, но только измерения могут определить «истинную» геометрию пространства.

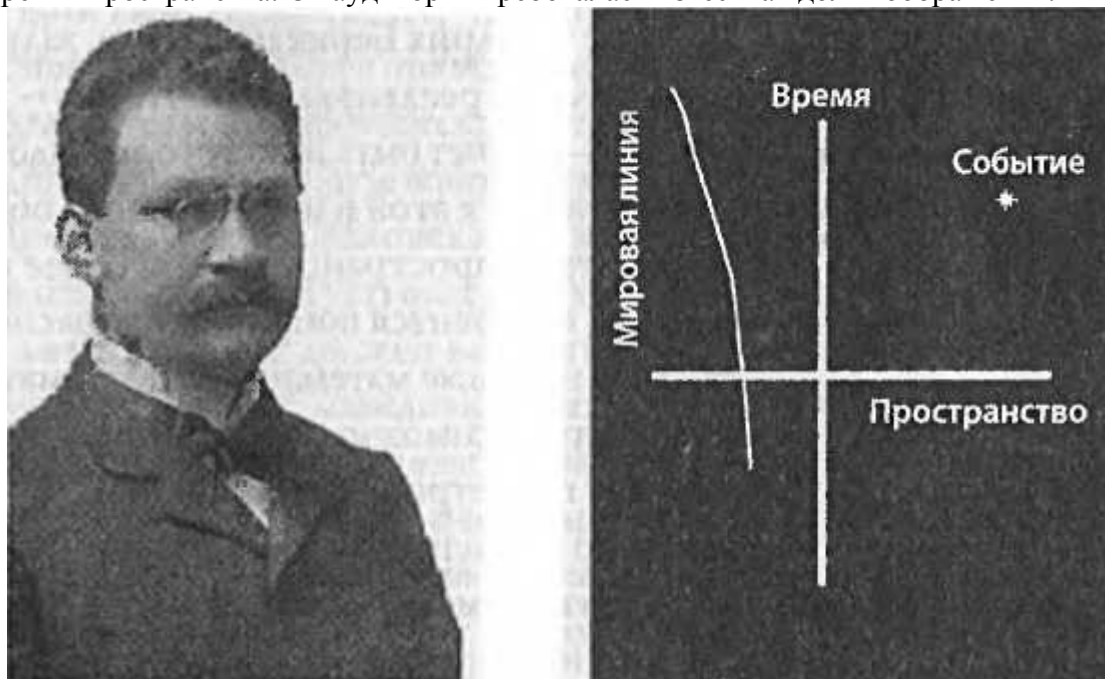
Разрабатывая общую теорию относительности, Эйнштейн опирался на математические работы Римана, который рассматривал геометрии, выходящие за рамки сферических и седловидных поверхностей: пространства с ямами и буераками, в одних местах искривленные положительно, в других отрицательно; с геодезическими, проходящими по этим особенностям и между ними по кривым неправильным маршрутам. Риман

рассматривал только трехмерное пространство, но Эйнштейн и его современник Герман Минковский ввели нечто совершенно новое: время как *четвертое измерение*. (Попробуйте это визуализировать. Если получится, значит, у вас очень необычный мозг.)

### Специальная теория относительности

Еще до того как Эйнштейн задумался об искривленном пространстве, Минковскому пришла в голову идея о том, что время и пространство следует объединить в форме четырехмерного пространства-времени. Он выразился весьма элегантно, если не сказать торжественно: «Отныне пространство само по себе и время само по себе обречены оставаться в тени, и только своего рода их союз сохранит независимую реальность»<sup>29</sup>. Плоская, или неискривленная, версия пространства-времени стала называться пространством Минковского.

В докладе на 80-й ассамблее немецких естествоиспытателей и врачей Минковский изобразил время вертикальной осью, а единственная горизонтальная ось представляла все три измерения пространства. От аудитории требовалась известная доля воображения.

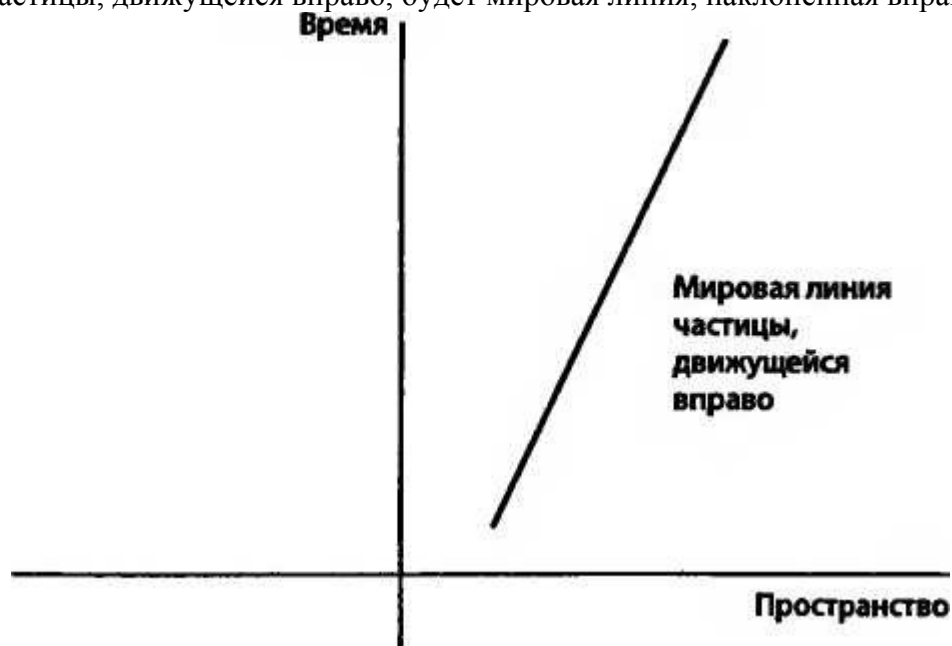


Минковский назвал точки пространства-времени *событиями*. Обыденное использование слова «событие» подразумевает не только время и место, но также то, что там произошло. Например: «Событие исключительной важности случилось в 05:29:45 16 июля 1945 г. в Тринити, штат Нью-Мексико, США, когда было впервые испытано атомное оружие». Минковский при использовании слова «событие» требовал несколько меньшего. Он подразумевал лишь определенное время и место, независимо от того, случилось ли там что-либо. В действительности он имел в виду *место и время, где событие может произойти, а может не произойти*, но это довольно неудобно произносить, поэтому он просто называл это событием.

Прямые и кривые, идущие по пространству-времени, играют в работе Минковского особую роль. Отдельная точка в пространстве представляет положение частицы. Но, изображая движение частицы в пространстве-времени, мы получаем прямую или кривую, которую называют *мировой линией*. Определенного рода движение при этом неизбежно. Даже если частица остается совершенно неподвижной, она непременно движется во времени. Траектория такой неподвижной частицы будет вертикальной прямой линией.

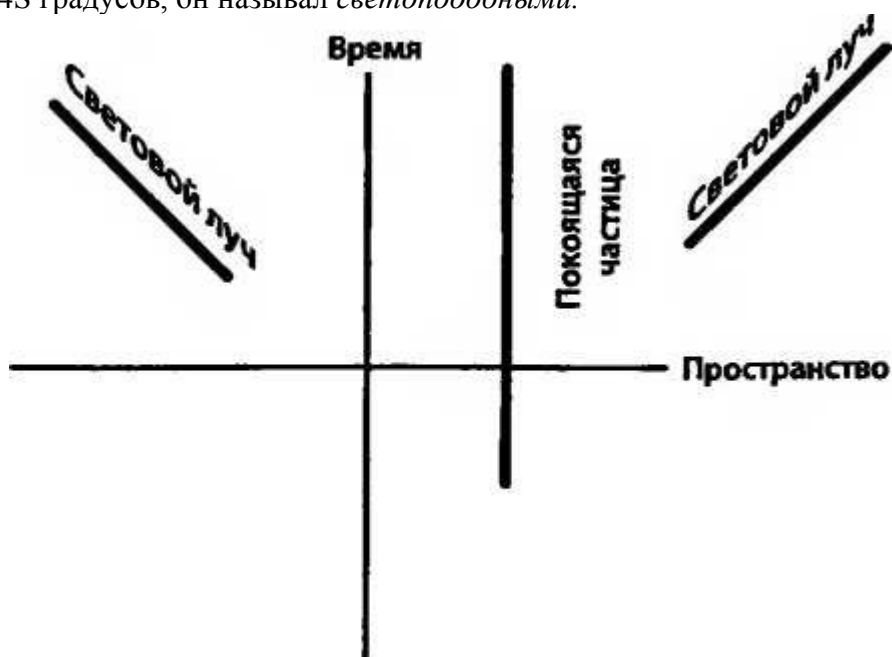
<sup>29</sup> Минковский первым осознал, что новая четырехмерная геометрия была подходящей средой для эйнштейновской специальной теории относительности. Данная цитата – из его доклада «Пространство и время», представленного на 80-й ассамблее немецких естествоиспытателей и врачей 21 сентября 1908 года.

Траекторией частицы, движущейся вправо, будет мировая линия, наклоненная вправо.



Аналогично, наклон мировой линии влево описывает движением влево. Чем сильнее линия отклоняется от вертикали, тем быстрее движется частица. Минковский представлял движение световых лучей – самых быстрых из всех объектов – линиями, проведенными под углом 45 градусов. Поскольку ни одна частица не может двигаться быстрее света, траектория реального объекта не может наклоняться более чем на 45 градусов к вертикали.

Минковский называл мировые линии частиц движущихся медленнее света, *временеподобными*, поскольку они близки к вертикальным. Траектории световых лучей, наклоненные на 45 градусов, он называл *светоподобными*.



### Собственное время

Понятие расстояния очень легко схватывается человеческим мозгом. Оно бывает особенно простым, когда расстояние измеряется вдоль прямой линии. Для этого достаточно обычной линейки. Измерить расстояние вдоль кривой несколько труднее, но не намного. Просто замените линейку гибкой измерительной лентой. Расстояния в пространстве-времени, однако, – вещь более тонкая, и не сразу ясно, как их измерять. В

действительности такого понятия до Минковского просто не существовало.

Минковского особенно интересовало понятие расстояния вдоль мировой линии. Возьмем, например, мировую линию покоящейся частицы. Поскольку траектория не покрывает никакого пространственного расстояния, линейки и мерные ленты тут бесполезны. Но Минковский понял, что даже идеально зафиксированный объект движется во времени. Правильный инструмент для измерения его мировой линии – не линейка, а часы. Он назвал новое понятие расстояния вдоль мировой линии *собственным временем*.

Представьте, что каждый объект, куда бы он ни двигался, несет на себе небольшие часы, как человек, который носит часы в кармане. Собственное время между двумя событиями на мировой линии – это время, прошедшее между событиями по часам, которые двигались вдоль мировой линии. Отсчеты часов аналогичны сантиметровым делениям мерной ленты, но вместо обычного расстояния они измеряют собственное время по Минковскому.

Вот конкретный пример. Мистер Черепаха и мистер Заяц решили устроить гонки в Центральном парке. Чтобы определить победителя, на концах дистанции поставили судей с тщательно синхронизированными часами. Забег начинается ровно в 12:00, и на середине пути Заяц настолько вырвался вперед, что решил вздремнуть, прежде чем продолжать движение. Но он проспал, и когда проснулся, то увидел, как Черепаха приближается к линии финиша. Не желая проигрывать гонку, Заяц как молния бросился вдогонку и едва успел пересечь финишную черту одновременно с Черепахой.

Мистер Черепаха достает свои очень точные карманные часы и гордо демонстрирует ожидающей толпе, что собственное время вдоль сегмента его мировой линии от старта до финиша составляет 2 часа 56 минут. Но почему это новое понятие называется *собственным временем*? Почему Черепахе просто не сказать, что его время от старта до финиша составило 2 часа 56 минут? Разве время не просто время?

Ньютон, конечно, так и думал. Он считал, что эталонные божественные часы определяют универсальный поток времени, с которым все остальные часы должны синхронизироваться. Все доброкачественные, честные часы идут в строго одинаковом темпе, так что, будучи раз синхронизированными, они остаются синхронными. Что бы ни случилось с Черепахой или Зайцем, они могут узнать время, взглянув на ближайшие часы или посмотрев на свои собственные карманные. Для Ньютона было аксиомой, что независимо от того, куда вы направились, с какой скоростью, по прямой или по кривой траектории, ваши карманные часы – если считать, что они тоже доброкачественные и честные, – будут совпадать в показаниях с ближайшими местными часами. Ньютоновское время обладает абсолютной реальностью, в нем нет ничего относительного.

Но в 1905 году Эйнштейн внес путаницу в ньютоново абсолютное время. Согласно специальной теории относительности, темп, в котором идут часы, даже если они являются идеальными копиями друг друга, зависит от того, как они движутся. В обычных обстоятельствах этот эффект неощутим, но когда часы разгоняются до скорости, близкой к световой, он становится очень заметным. По Эйнштейну, любые часы, движущиеся вдоль своей мировой линии, идут в своем темпе. Отсюда Минковский пришел к определению нового понятия собственного времени.

Просто для иллюстрации: когда Заяц достает свои часы (тоже доброкачественные и честные), они показывают собственное время его мировой линии, равное 1 часу и 36 минутам<sup>30</sup>. Хотя они стартовали и финишировали в одних и тех же точках пространства-времени, мировые линии Черепахи и Зайца имеют разные собственные времена.

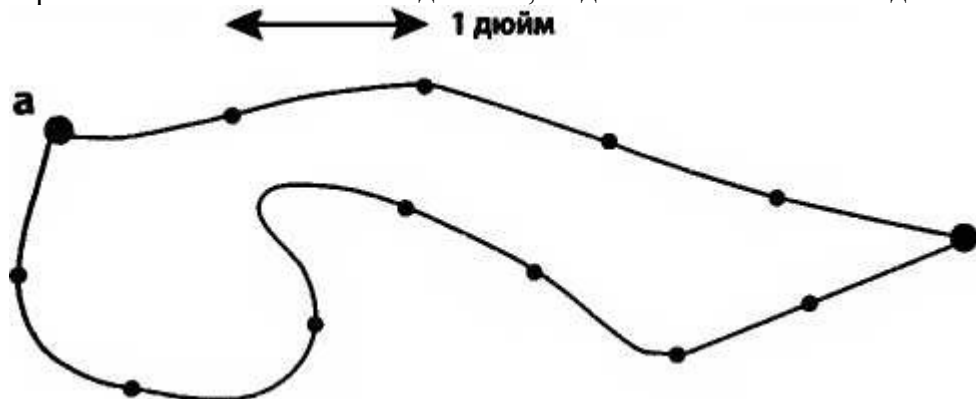
---

<sup>30</sup> Это крайнее преувеличение, для такого результата Зайцу пришлось бы двигаться с околосветовой скоростью.





Прежде чем продолжать обсуждение собственного времени, полезно немного поразмышлять об обычных расстояниях, измеряемых вдоль кривых с помощью мерной ленты. Возьмите любые две точки в пространстве и соедините их кривой линией. Насколько далеки эти точки, если мерить вдоль линии? Очевидно, что ответ зависит от кривой. Вот две кривые, соединяющие одни и те же точки (a и b), но имеющие совсем разную длину. Вдоль верхней кривой расстояние составляет пять дюймов, а вдоль нижней — восемь дюймов.



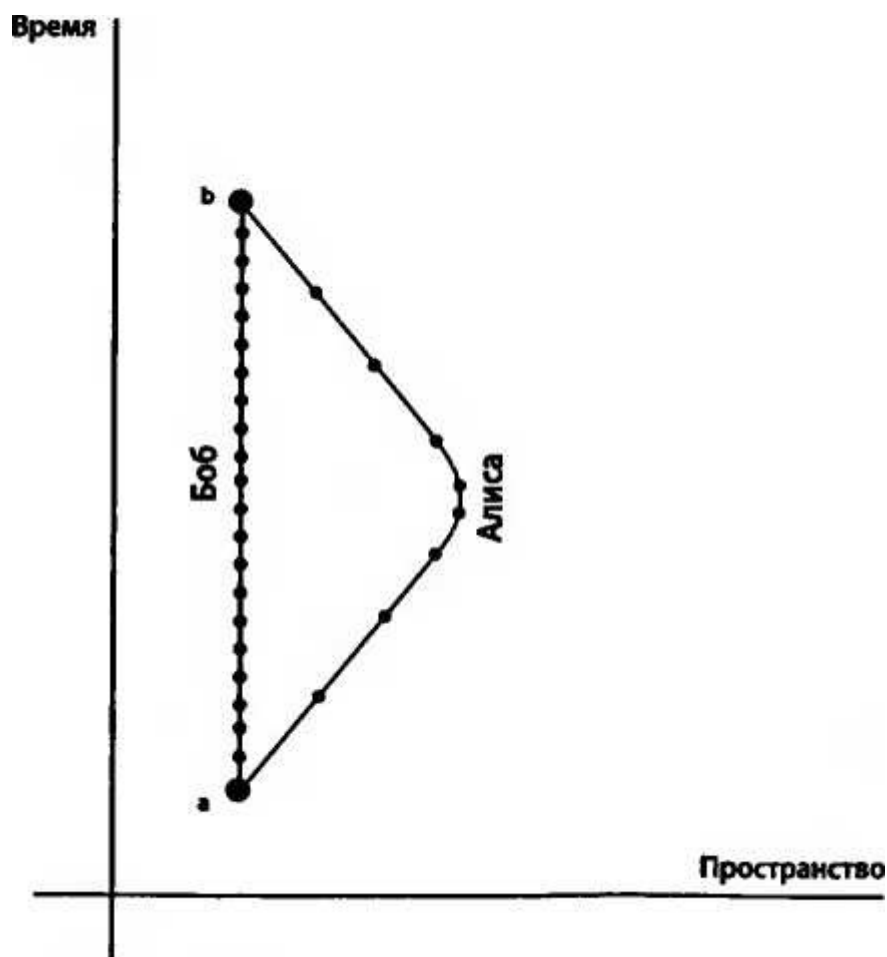
Нет, конечно, ничего удивительного в том, что разные кривые, проведенные от a до b, имеют разную длину.

Теперь вернемся к задаче измерения мировых линий в пространстве-времени. Вот рисунок типичной мировой линии. Заметьте, что она искривлена. Это означает, что скорость вдоль траектории не остается постоянной. В данном примере быстро движущаяся частица замедляется. Точками отмечены моменты тиканья часов. Каждый интервал соответствует одной секунде.



Обратите внимание, что на более пологих участках кажется, что секунды тянутся дольше. Это не ошибка, а отражение открытого Эйнштейном знаменитого *растяжения времени*: быстро движущиеся часы идут медленнее часов, которые движутся не так быстро или покоятся.

Рассмотрим две кривые мировые линии, соединяющие два события. Эйнштейн, как обычно, мысленно экспериментируя, представил себе двух близнецов – я буду называть их Алисой и Бобом, – родившихся одновременно. Событие их рождения обозначим  $a$ . В момент рождения близнецов разделяют; Боб остается дома, а Алису с чудовищной скоростью увозят прочь. Спустя некоторое время Эйнштейн разворачивает Алису и направляет ее домой. Наконец, Боб и Алиса вновь встречаются в точке  $b$ .



При рождении Эйнштейн дал близнецам одинаковые прекрасно синхронизированные карманные часы. Когда Боб и Алиса, наконец, встретились в точке *b*, они сравнили показания своих часов и обнаружили то, что повергло бы в недоумение Ньютона. У Боба отросла длинная седая борода, тогда как Алиса была сама молодость. Судя по их карманным часам, собственное время вдоль мировой линии оказалось у Алисы намного меньше, чем у Боба. Так же как обычное расстояние между двумя точками зависит от соединяющей их кривой, собственное время между двумя событиями зависит от соединяющей их мировой линии.

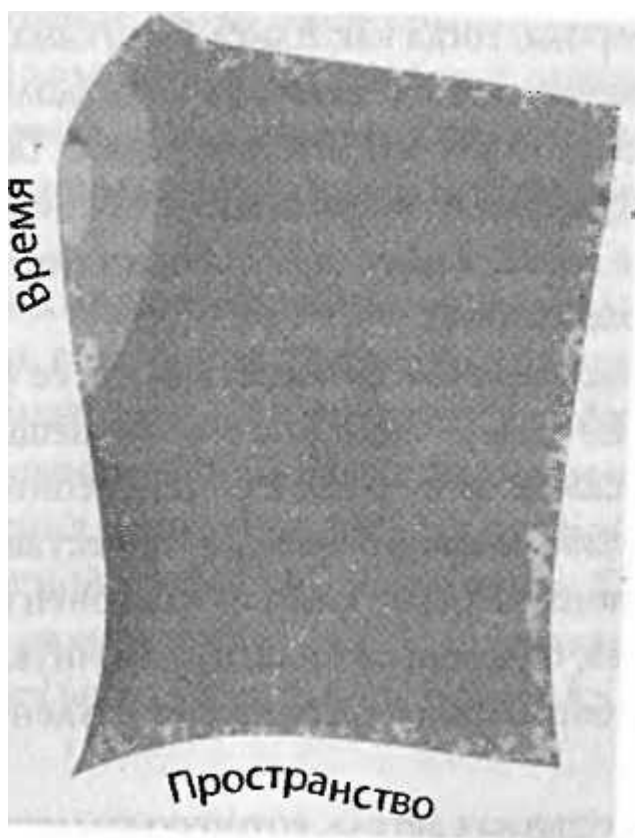
Заметит ли Алиса во время путешествия, что ее часы замедлились? Ни в коей мере. Те часы – не единственная вещь, испытавшая замедление; то же самое произошло с ее сердцебиением, работой ее мозга и всего метаболизма. Во время путешествия Алисе не с чем сравнивать ход своих часов, но когда она наконец встретила с Бобом во второй раз, она обнаружила, что значительно моложе его. Этот «парадокс близнецов» озадачивает студентов-физиков уже более ста лет.

Есть одна любопытная деталь, которую вы могли заметить самостоятельно. Боб путешествует через пространство-время по прямой, в то время как Алиса перемещается по кривой траектории. И тем не менее собственное время вдоль траектории Алисы короче, чем вдоль траектории Боба. Это пример контринтуитивного свойства геометрии пространства Минковского: мировая прямая линия имеет *самое продолжительное* собственное время между двумя событиями – измеряется вдоль прямой линии. Это вам пригодится для перенастройки своих представлений.

### Общая теория относительности

Как и Риман, Эйнштейн верил, что геометрия – искривленная и меняющаяся. Причем он имел в виду геометрию не одного лишь пространства, но и пространства-времени. Следуя за Минковским, Эйнштейн по одной оси отложил время, а другую сопоставил всем трем

измерениям пространства, но, вместо того чтобы изображать пространство-время на плоскости, он стал представлять себе искривленную поверхность со впадинами и выпуклостями. Частицы по-прежнему движутся вдоль мировых линий, а часы отсчитывают собственное время, но геометрия пространства-времени стала куда менее правильной.



### ***Законы Эйнштейна***

Как это ни удивительно, во многих отношениях законы физики выглядят проще в искривленном пространстве-времени, чем в ньютоновской физике. Возьмем, например, движение частиц. Ньютоновские законы начинаются с принципа инерции, который гласит:

*В отсутствие действия сил каждый объект остается в состоянии равномерного движения.*

В этом внешне простом законе за выражением «равномерное движение» скрываются две самостоятельные идеи. Во-первых, «равномерное движение» подразумевает движение вдоль прямой линии в пространстве. Но Ньютон имел в виду нечто большее: равномерность движения также подразумевает постоянство, неизменность скорости, то есть отсутствие ускорения<sup>31</sup>.

Но что же происходит с гравитационными силами? Ньютон добавляет второй закон – закон неравномерного движения, – который утверждает, что сила равна произведению массы на ускорение, или, если выразить это иначе:

*Ускорение объекта равно приложенной к нему силе, деленной на его массу.*

Третий закон применяется, когда сила вызвана гравитацией:

*Сила гравитации, действующая на любой объект, пропорциональна его массе.*

Минковский упростил ньютоновское представление о равномерном движении, догадавшись объединить оба этих условия:

*В отсутствие сил любой объект движется через пространство-время вдоль прямой мировой линии.*

---

<sup>31</sup> Понятие ускорение охватывает любое изменение скорости, включая замедление, которое мы обычно называем торможением. Для физика торможение – это просто отрицательное ускорение.

Прямизна мировой линии подразумевает не только прямолинейность движения в пространстве, но также и постоянство скорости.

Гипотеза Минковского о прямизне мировой линии была изящным синтезом двух аспектов равномерного движения, но она применима только при полном отсутствии сил. Эйнштейн вывел идею Минковского на новый уровень, применив ее к искривленному пространству-времени.

Новый эйнштейновский закон движения был потрясающе прост. В любой точке своей мировой линии частица ведет себя простейшим возможным способом: движется прямо вперед (в пространстве-времени). Если пространство-время плоское, закон Эйнштейна сводится к закону Минковского, но в искривленном пространстве-времени, в областях, где массивные тела деформируют и закручивают пространство-время, новый закон предписывает частицам двигаться вдоль геодезических пространства-времени.

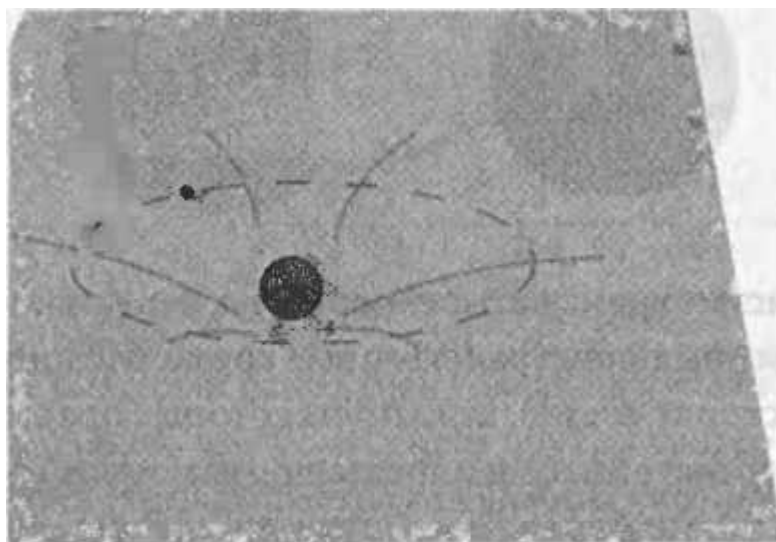
Как объяснял Минковский, искривление мировой линии указывает, что на объект действует сила. Согласно новому закону Эйнштейна, частицы в искривленном пространстве-времени движутся настолько прямолинейно, насколько могут. Однако геодезические неизбежно искривлены, и их изгибы соответствуют местному ландшафту пространства-времени. Математические уравнения Эйнштейна показывают, что геодезическая в искривленном пространстве-времени ведет себя в точности так, как искривленная мировая линия частицы, движущейся в гравитационном поле. Таким образом, сила гравитации – это не что иное, как искривление геодезических в искривленном пространстве-времени.

В одном почти до смешного простом законе Эйнштейн объединил ньютоновские законы движения с гипотезой Минковского о мировой линии и объяснил, как гравитация воздействует на все объекты. То, что у Ньютона оставалось необъясненным природным явлением, – силы тяготения – Эйнштейн объяснил как влияние неевклидовой геометрии пространства-времени.

Благодаря принципу движения частиц вдоль геодезических появляется новый эффективный способ понимания гравитации, но он ничего не говорит о *причинах* искривления. Чтобы придать целостность своей теории, Эйнштейну требовалось объяснить, чем вызвано появление искривлений и других неоднородностей пространства-времени. В старой ньютоновской теории источником гравитационного поля была масса: в присутствии массы, подобной, например, Солнцу, вокруг нее возникает гравитационное поле, которое в свою очередь воздействует на движение планет, поэтому для Эйнштейна было естественно предположить, что присутствие массы (или, что эквивалентно, энергии) заставляет пространство-время искривляться. Джон Уилер, один из первопроходцев и учителей современной релятивистской теории, суммировал это в одной емкой фразе: «Пространство говорит телам, как им двигаться, а тела говорят пространству, как ему искривляться». (Он подразумевал пространство-время.)

Новая идея Эйнштейна означала, что пространство-время не пассивно, оно имеет свойства, такие как кривизна, которые зависят от присутствия масс. Это почти как если бы пространство-время было эластичным или даже жидким материалом, подверженным влиянию объектов, которые по нему движутся.

Связь между массивными объектами, гравитацией, кривизной и движением частиц иногда описывают с помощью аналогии, относительно которой я испытываю смешанные чувства. Идея состоит в том, чтобы представлять пространство горизонтальным резиновым листом вроде батута. Когда нет деформирующих его масс, лист остается плоским. Но поместите на лист тяжелый груз, например шар для боулинга, и его вес вызовет деформацию. Теперь добавьте значительно меньшую массу, подойдет любой небольшой шарик, и вы увидите, как он скатывается к тяжелому шару для боулинга. Шарику можно также придать касательную скорость, так чтобы он обращался вокруг большей массы, подобно Земле вокруг Солнца. Прогиб поверхности не дает меньшему шарiku укатиться прочь, в точности как солнечное тяготение удерживает Землю.

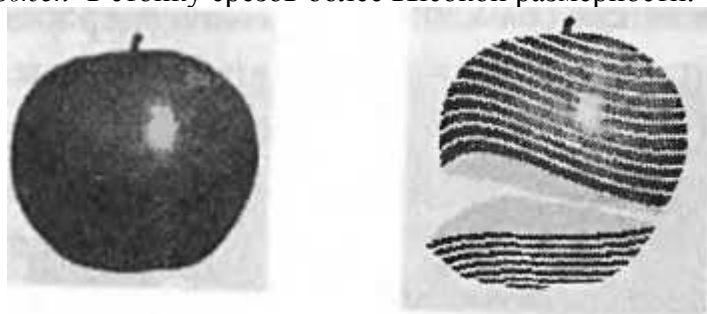


Но кое-что в этой аналогии вводит в заблуждение. Во-первых, искривление резинового листа происходит только в пространстве, а не в пространстве-времени, поэтому не удастся объяснить странное воздействие масс на находящиеся рядом часы (мы рассмотрим эти эффекты в следующей главе). Еще хуже то, что эта модель использует гравитацию для объяснения гравитации. Ведь это притяжение настоящей Земли заставляет шар для боулинга продавливать резиновую поверхность. Так что технически модель резинового листа совершенно неверна.

Тем не менее эта аналогия отчасти передает дух общей теории относительности. Пространство-время деформируемо, и большие массы могут его искривлять. Кривизна, порожденная массивными объектами, влияет на движение меньших. А продавленный резиновый лист во многом напоминает характерную математическую диаграмму, о которой я вскоре буду рассказывать. Пользуйтесь этой аналогией, когда она полезна, но помните, что это — всего лишь аналогия.

### Черные дыры

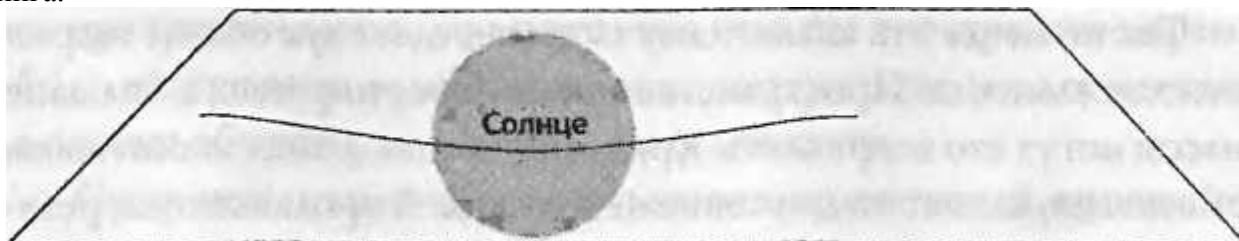
Возьмите яблоко и сделайте тонкий срез, проходящий через его центр. Яблоко трехмерно, но полученный срез двумерен. Если сложить в стопку все двумерные срезы, полученные при тонкой нарезке, то можно реконструировать яблоко. Можно сказать, что каждый тонкий срез *вложен* в стопку срезов более высокой размерности.



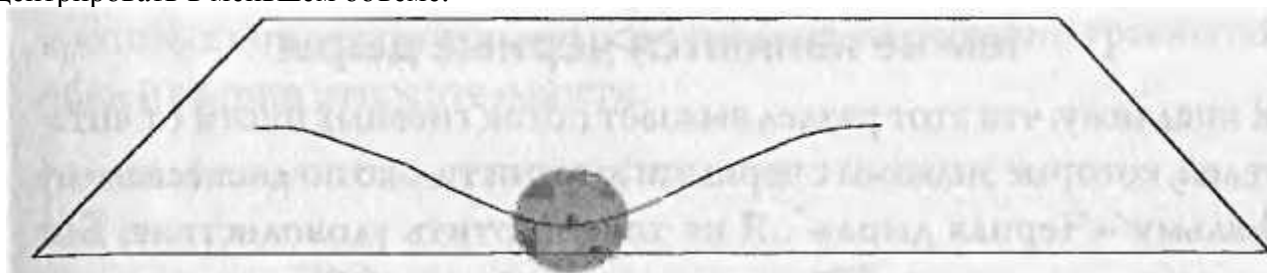
Пространство-время четырехмерно, но, нарезая его, можно выделить трехмерные пространственные срезы. Можно вообразить себе это как стопку срезов, каждый из которых представляет трехмерное пространство в один определенный момент времени. Визуализировать три измерения намного проще, чем четыре. Такие картинки, сложенные из срезов, называются *диаграммами вложения* и помогают составить интуитивное представление о неевклидовой геометрии.

Рассмотрим геометрию, порожденную массой Солнца. Забудем на мгновение о времени и сконцентрируемся на визуализации искривленного пространства в окрестностях Солнца. Диаграмма вложения выглядит как небольшая впадина на резиновом листе с центром там,

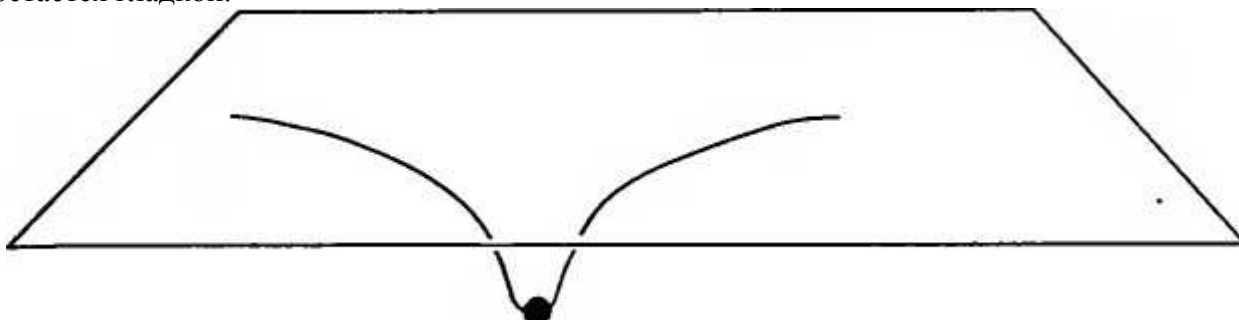
где находится Солнце, более или менее похожая на батут с лежащим на нем шаром для боулинга.



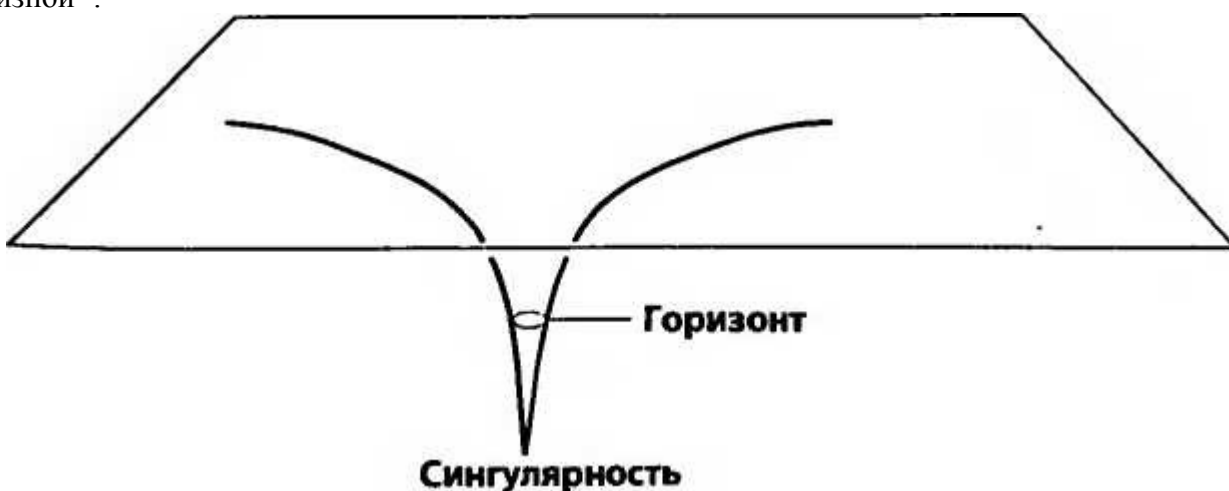
Искажения вблизи Солнца должны становиться более заметными, если ту же массу сконцентрировать в меньшем объеме.



Геометрия вблизи белого карлика или нейтронной звезды искажена еще сильнее, но все еще остается гладкой.



Как мы уже выяснили ранее, если коллапсирующая звезда станет настолько маленькой, что поместится внутри своего шварцшильдовского радиуса (три километра для Солнца), то, подобно головастикам, попавшимся в сток, ее частицы будет необратимо затягивать внутрь, и они продолжают коллапс, пока не образуют сингулярность – точку с бесконечной кривизной<sup>32</sup>.



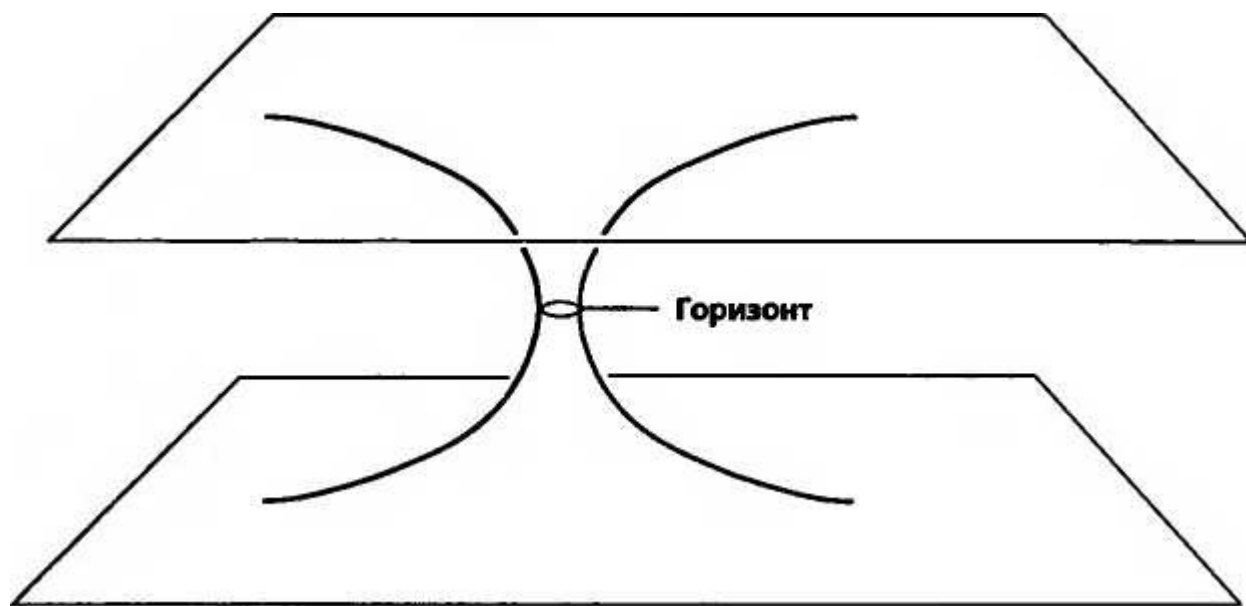
**Чем не являются черные дыры**

<sup>32</sup> Примечание для специалистов. Приведенная диаграмма вложения построена не в постоянном шварцшильдовском времени. Она получена путем применения координат Крускала и выбора поверхности  $T = 1$ .

Я предвижу, что этот раздел вызовет поток гневных писем от читателей, которые знакомы с черными дырами только по диснеевскому фильму «Черная дыра»<sup>33</sup>. Я не хочу портить удовольствие, Бог свидетель, черные дыры – удивительнейшие объекты, но они не ворота в небеса, в ад, в другие вселенные и даже не туннели, ведущие обратно в нашу Вселенную. Зная, насколько все честно в любви, войне и научной фантастике, я не возражаю, чтобы киношники путешествовали через них в страну грез. Но понимание природы черных дыр требует больших знаний, чем дает просмотр фильмов категории В<sup>34</sup>.

Основное фантастическое допущение фильма «Черная дыра» в действительности восходит к работе Эйнштейна и его коллеги Натана Розана, позднее популяризированной Джоном Уилером. Эйнштейн и Розен рассматривали возможность того, что внутренние области черной дыры могут быть связаны с очень отдаленными местами посредством так называемых кротовых нор<sup>35</sup>. Идея состояла в том, что разделенные миллиардами световых лет черные дыры могут быть связаны на уровне их горизонтов, образуя во Вселенной фантастический туннель. Для такой черной дыры диаграмма вложения после пересечения горизонта не оканчивается заостренной сингулярностью, а открывается в новую обширную область пространства-времени.

Войти в такой тоннель с одной стороны и выйти с другой – это все равно что войти в метро в Нью-Йорке и, проехав не более пары миль, появиться в Пекине или даже на Марсе. Идея уилеровских кротовых нор действительно основывалась на решении уравнений общей теории относительности.



### ***Тоннель Эйнштейна – Розена***

Таково происхождение «городской легенды» о том, что черные дыры – это тоннели в другие миры. В этой идее содержится две ошибки. Во-первых, уилеровские кротовые норы могут оставаться открытыми лишь очень короткое время, а затем схлопываются. Кротовые норы открываются и закрываются столь быстро, что пройти сквозь них совершенно невозможно. Это как если бы короткий тоннель до Пекина обвалился прежде, чем кто-либо успел по нему пройти. Некоторые физики поговаривают о том, что квантовая механика

---

33 Фильм вышел в 1979 году на киностудии Walt Disney Productions, оригинальное название «The Black Hole». В фильме astronautам удастся пролететь сквозь черную дыру. – Примеч. перев.

34 Фильмы категории В – малобюджетные кинокартины, как правило, построенные на эксплуатации какой-то кратковременно популярной темы. – Примеч. перев.

35 Джон Уилер назвал их wormholes – червоточинами. Но в русском языке более распространен термин «кротовые норы». – Примеч. перев.



может каким-то образом стабилизировать кротовую нору, но никаких доказательств этому нет.

Но мало того, Эйнштейн и Розен изучали «вечную черную дыру», то есть имеющую не только бесконечное будущее, но и бесконечное прошлое. Однако даже Вселенная имеет конечный возраст. Реальные черные дыры всегда, разумеется, возникают при коллапсе звезд (или других массивных объектов), то есть после Большого взрыва. Когда уравнения Эйнштейна применили к процессу образования черных дыр, то связанные с ними кротовые норы просто не возникали. Диаграмма вложения выглядела, как на с. 71.

Теперь, когда я испортил вам настроение, вы, надеюсь, возьмете в прокате упомянутый фильм и получите удовольствие.

### Как построить машину времени

Будущее – не то, к чему вы привыкли.

– *Йоги Берра*<sup>36</sup>

А как насчет машины времени, еще одного хитроумного приспособления биржевой научной фантастики и темы множества книг, телешоу и кинофильмов? Лично я хотел бы ее иметь. Уж очень любопытно, на что похоже будущее. Будут ли существовать люди через миллион лет? Колонизируют ли они космос? Сохранится ли секс в качестве основного способа продолжения рода? Мне бы хотелось все это знать, и вам, думаю, тоже.

Будьте осторожны с желаниями. У путешествий в будущее есть некоторые недостатки. Все ваши друзья и родные будут уже давно мертвы. Ваша одежда будет выглядеть старомодной. Ваш язык окажется бесполезным. Короче, вы будете выглядеть посмешищем. Мысль отправиться в будущее в один конец выглядит удручающей, если не трагической.

Не проблема. Просто забирайтесь в свою машину времени и нацеливайтесь обратно на настоящее. Но что, если коробка передач вашей машины времени не имеет заднего хода? Что, если вы можете ехать только вперед? Отправитесь ли вы в путешествие, невзирая на это? Вы, наверное, думаете, что это пустой вопрос: всякий знает, что машина времени – это научная фантастика. Но это не так.

Однонаправленная машина, отправляющая в будущее, вполне возможна, по крайней мере в принципе. В фильме «Спящий»<sup>37</sup> герой Вуди Аллена перемещается на два столетия в будущее методом, который почти реализуем сегодня. Он просто погружает себя на какое-то время в состояние анабиоза, подобное уже проделывали в течение нескольких часов с собаками и свиньями. Выйдя из замороженного состояния, он оказывается в будущем.

Конечно, этот метод – не настоящая машина времени. Он может замедлить метаболизм человека, но не замедляет движение атомов и другие физические процессы. Но мы можем сделать кое-что получше. Помните близнецов Боба и Алису, которые были с рождения разделены? Когда Алиса вернулась из своего космического путешествия, она обнаружила, что весь остальной мир постарел намного сильнее, чем она. Так что путешествие туда-обратно на очень быстром космическом корабле – это и есть пример путешествия во времени.

Большая черная дыра может стать другой очень удобной машиной времени. Вот как она могла бы работать. Прежде всего, вам потребуется орбитальная космическая станция и длинный кабель, чтобы опуститься на нем к горизонту. Вы не станете приближаться к нему слишком сильно и, конечно, не хотите провалиться под горизонт, так что кабель должен быть очень прочным. Лебедка на космической станции может спустить вас вниз и через заданное время поднять обратно.

Допустим, вы хотите отправиться на тысячу лет в будущее и готовы ради этого

---

<sup>36</sup> Йоги Берра (р. 1925) – знаменитый американский бейсбольный игрок, тренер и менеджер, известный своими афоризмами.

<sup>37</sup> «Спящий» (Sleeper, 1973) – фильм, снятый по мотивам романа Г. Дж. Уэллса «Когда спящий проснется». – Примеч. перев.

провести год, висая на тросе и не испытывая слишком больших неудобств из-за силы тяжести. Это можно сделать, но понадобится найти черную дыру с горизонтом, равным размеру нашей Галактики. Если вы не против некоторого дискомфорта, то можно достичь того же с использованием черной дыры поменьше в центре нашей Галактики. Ее недостаток лишь в том, что в течение года пребывания вблизи горизонта вы будете весить четыре миллиона тонн. Когда вас поднимут назад через год висения на тросе, вы обнаружите, что прошла тысяча лет. Так что черные дыры, по крайней мере принципиально, могут служить машинами времени, отправляющими в будущее.

Но что можно сказать о возвращении назад? Для этого нужна машина времени, отправляющая в прошлое. Увы, перемещение назад во времени невозможно. Физики иногда поговаривают о перемещении в прошлое через квантовые кротовые норы, но такие путешествия всегда ведут к логическим противоречиям. Я полагаю, что вы застрянете в будущем и ничего не сможете с этим поделать.

### **Гравитационное замедление часов**

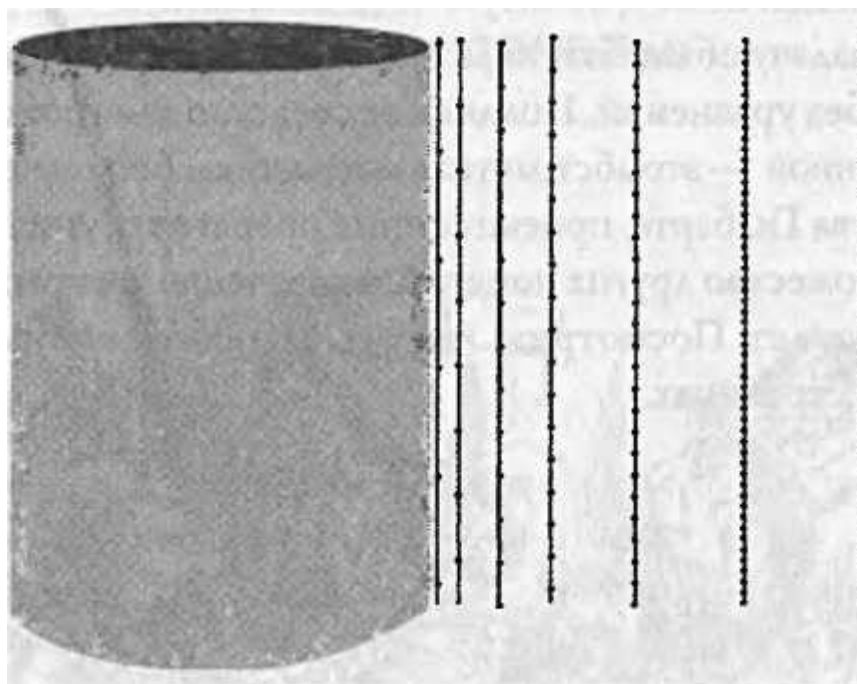
Что за свойство черных дыр превращает их в машины времени? Ответ кроется в вызываемых ими сильных искажениях геометрии пространства-времени. Эти искажения по-разному влияют на течение собственного времени вдоль мировых линий в зависимости от того, где эти линии проходят. Вдали от черной дыры ее влияние незначительно, и поток собственного времени почти не меняется. Но часы, висящие на тросе над самым горизонтом, будут значительно замедляться деформацией пространства-времени. Фактически замедлятся все часы, включая ваше сердцебиение, метаболизм и даже невидимое движение атомов. Вы совершенно этого не заметите, но, вернувшись на космическую станцию и сравнив свои часы с бортовым хронометром, обнаружите расхождение. На станции пройдет больше времени, чем по вашим часам.

На самом деле необязательно возвращаться на станцию, чтобы заметить влияние черной дыры на время. Если вы у горизонта и я на борту станции располагаем телескопами, то сможем наблюдать друг за другом. Я буду видеть вас и ваши часы как в замедленной съемке, а вы увидите меня ускоренным, как в старом кино про полицейских из Кистоуна<sup>38</sup>. Это относительное замедление времени вблизи больших масс называют *гравитационным красным смещением*. Оно было открыто Эйнштейном как следствие общей теории относительности и отсутствует в ньютоновской теории тяготения, где все часы идут строго в одинаковом темпе.

Следующая пространственно-временная диаграмма иллюстрирует гравитационное красное смещение вблизи горизонта черной дыры. Объект слева – это черная дыра. Напоминаю, что на картинках, изображающих пространство-время, вертикальная ось соответствует времени. Серая поверхность – это горизонт, а вертикальные линии на разных расстояниях от горизонта представляют группу одинаковых неподвижных часов. Отметки на них отражают течение собственного времени вдоль мировых линий. В каких единицах – неважно; это могут быть секунды, наносекунды или годы. Чем ближе часы к горизонту черной дыры, тем медленнее выглядит их ход. Непосредственно на горизонте время полностью останавливается по отношению к часам, оставшимся вне черной дыры.

---

38 «Полицейские из Кистоуна» (Keystone Kops, 1912–1917) – серия немых комедийных фильмов о некомпетентных полицейских, постоянно попадающих в дурацкие ситуации. Многие кадры воспроизводились в режиме ускоренной съемки. – Примеч. черев.



Гравитационное замедление часов случается и в не столь экзотических условиях, как вблизи горизонта черной дыры. Умеренную величину этот эффект имеет на поверхности Солнца. Атомы – это миниатюрные часы, электроны, снующие вокруг ядра, подобны стрелкам часов. При наблюдении с Земли атомы на Солнце выглядят немного заторможенными.

Утрата одновременности, парадокс близнецов, искривленное пространство-время, черные дыры и машины времени – так много далеких от повседневности, более чем фантастических идей, и все это надежно установленные несомненные концепции, с которыми согласны все физики. Чтобы понять новую физику пространства-времени, требуется весьма сложный инструментарий – дифференциальная геометрия и тензорное исчисление, метрики пространства-времени и дифференциальные формы. Но даже куда более трудный переход в зазеркальный квантовый мир не сравнится по концептуальной сложности с теми проблемами, которые ставят нас в тупик, когда мы пытаемся взаимно увязать общую теорию относительности и квантовую механику. В прошлом были времена, когда казалось, что квантовая механика не способна к сосуществованию с эйнштейновской теорией гравитации и будет отброшена. И возможно, кто-то скажет, что Битва при черной дыре была «войной, которая сделала мир безопасным для квантовой механики».

В следующей главе я возьмусь за донкихотскую в своей невозможности задачу объяснить квантовую механику, обходясь по возможности без уравнений. Подлинное средство для грокинга квантовой вселенной – это абстрактная математика: бесконечномерные пространства Гилберта, проекционные операторы, унитарные матрицы и множество других понятий, на изучение которых требуется несколько лет. Посмотрим, как мы справимся с этим всего на нескольких страницах.



*Поставив свою чашку чая, она неуверенно спросила: «А свет состоит из волн или из частиц?»*

*Около дома под деревом стоял накрытый стол, а за столом пили чай Мартовский Заяц и Болваничик, между ними крепко спала Мышь-Соня. Болваничик и Заяц облокотились на нее, словно на подушку, и разговаривали через ее голову. «Бедная Соня, – подумала Алиса. – Как ей, наверно, неудобно! Впрочем, она спит – значит, ей все равно»<sup>39</sup>.*

*На последнем уроке физики Алису кое-что глубоко озадачило и она надеялась, что новые знакомые помогут разобраться в запутанных вопросах. Поставив свою чашку чая, она неуверенно спросила: «А свет состоит из волн или из частиц?» – «Да, именно так», – ответил Сумасшедший Болваничик. Немного раздраженно Алиса переспросила в полный голос: «Так какой же ответ? Я повторю вопрос: свет – это частицы или волны?» – «Совершенно верно», – подтвердил Болваничик.*

Приветствуем вас в павильоне смеха – в сумасшедшем, ненормальном, на голове стоящем мире квантовой механики, где правит неопределенность и ничто порождает осмысленные ощущения.

### **Ответ Алисе (что-то вроде)**

Ньютон считал, что лучи света – это потоки крошечных частиц, что-то вроде маленьких пуль, выбрасываемых скорострельным пулеметом. Хотя эта теория была почти полностью ошибочной, он придумал удивительно толковые объяснения для многих свойств света. Но к 1865 году шотландский математик и физик Джеймс Клерк Максвелл бесповоротно разгромил ньютоновскую «пулевую» теорию. Максвелл доказывал, что свет состоит из волн – *электромагнитных волн*. Построения Максвелла целиком и полностью подтвердились и вскоре стали общепризнанной теорией.

Максвелл подчеркивал, что при движении электрических зарядов, например когда электроны колеблются в проводах, эти движения порождают волнообразные возмущения, во многом подобно тому, как движения пальца по поверхности лужи с водой порождают волны

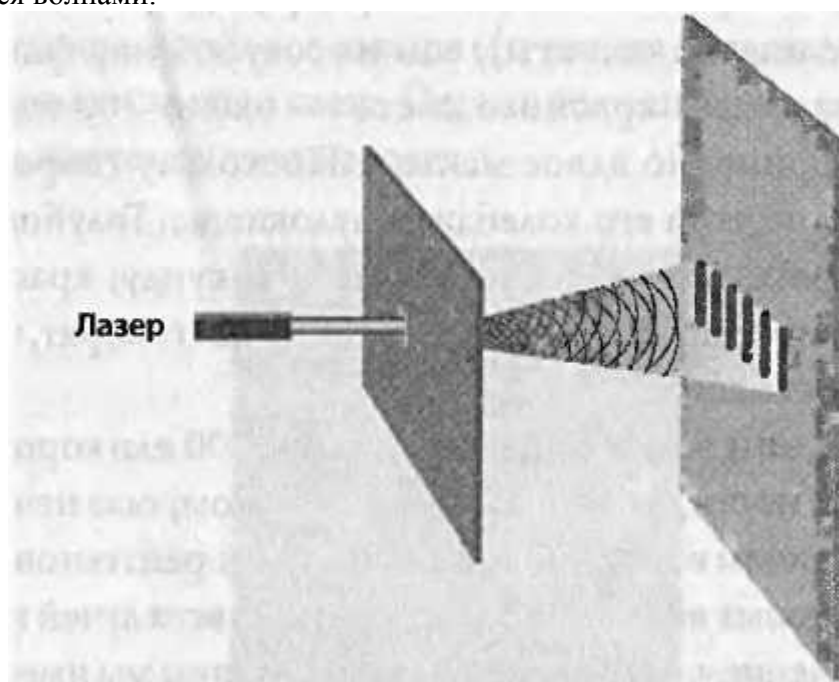
---

<sup>39</sup> Льюис Кэрролл. Приключения Алисы в Стране чудес. Иллюстрации Джона Тенниела. Лондон: Macmillan and Company, 1865. (Фрагмент дан в переводе Н. Демуровой. – Примеч. перев)

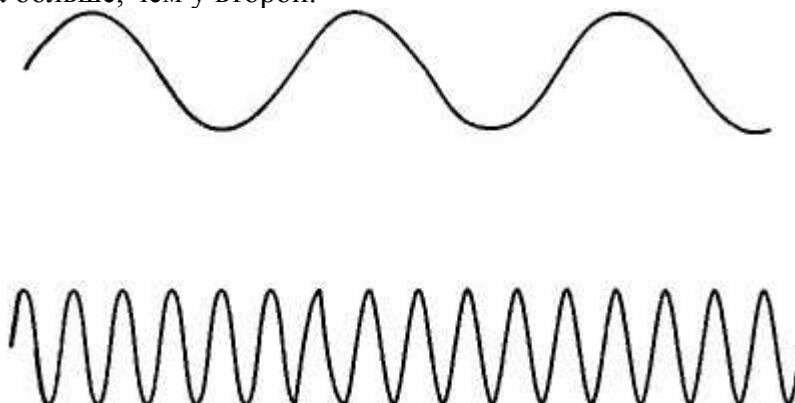
на ее поверхности.



Световые волны состоят из электрического и магнитного полей – тех же, что окружают электрически заряженные частицы, электрические токи в проводах и обычные магниты. Когда эти заряды и токи колеблются, они испускают волны, которые распространяются в пустом пространстве со скоростью света. И действительно, если пропустить луч света сквозь пару тонких щелей, то можно заметить отчетливый *интерференционный* узор, создаваемый перекрывающимися волнами.



Теория Максвелла даже объяснила, благодаря чему свет бывает разного цвета. Волны характеризуются своей длиной – расстоянием от одного гребня до другого. Вот две волны, у первой из них длина больше, чем у второй.



Представьте себе две волны, движущихся прямо перед вашим носом со скоростью

света. По мере движения они колеблются от максимума к минимуму и обратно: чем короче волна, тем быстрее эти колебания. Число полных циклов (от максимума до минимума и снова до максимума) в секунду называется *частотой*, и она, очевидно, выше у коротких волн.

Когда свет попадает в глаз, различные частоты по-разному воздействуют на палочки и колбочки сетчатки. Сигнал передается в мозг, который говорит, что это красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой или фиолетовый цвет в зависимости от частоты (или длины волны). На красный конец спектра приходятся более длинные волны (более низкие частоты), чем на голубой или фиолетовый конец: длина волны красного света – около 700 нм<sup>40</sup>, а фиолетового – примерно вдвое меньше. Поскольку скорость света очень высока, частота его колебаний чудовищна. Голубой свет совершает квадриллион ( $10^{15}$ ) колебаний в секунду; красный свет колеблется примерно вдвое медленнее. Физики говорят, что частота голубого света составляет  $10^{15}$  Гц.

Может ли длина волны света быть больше 700 или короче 400 нанометров? Да, но тогда он не называется светом; глаз нечувствителен к таким длинам волн. Ультрафиолетовые и рентгеновские лучи короче фиолетовых волн, а самые короткие из всех лучей называются гамма-излучением. С длинноволновой стороны мы имеем инфракрасное излучение, микроволны и радиоволны. Весь спектр, от гамма-лучей до радиоволн, называют *электромагнитным излучением*.

Так что, Алиса, ответ на твой вопрос состоит в том, что свет определенно состоит из волн.

Но подожди, не спеши. Между 1900 и 1905 годами очень неприятный сюрприз поколебал основания физики, и данный вопрос на двадцать лет вновь стал крайне запутанным. (Кто-то скажет, что он и сегодня таким остается запутанным.) Основываясь на работе Макса Планка, Эйнштейн полностью «опрокинул доминирующую парадигму». У нас нет времени и места рассказывать, как он к этому пришел, но в 1905 году Эйнштейн заключил, что свет состоит из частиц, которые он называл *квантами*. Позже их стали называть фотонами. Сократим эту замечательную историю до голых фактов: свет, когда он чрезвычайно тускл, ведет себя как частицы, приходящие одна за другой, как если бы они были отдельными пулями. Вернемся к эксперименту, в котором свет проходит через две щели, а потом попадает на экран. Представьте себе затухающий источник излучения, который уже еле светит. Волновые теоретики будут ожидать появления очень тусклого волнообразного рисунка, едва видимого или даже вовсе неразличимого. Но видим он или нет, ожидаемый рисунок должен быть волнообразным.

Это не то, что предрекал Эйнштейн, а он, как обычно, был прав. Вместо непрерывного освещения его теория предсказывала отдельные точечные вспышки света. Первая вспышка появлялась в какой-то непредсказуемой точке экрана.

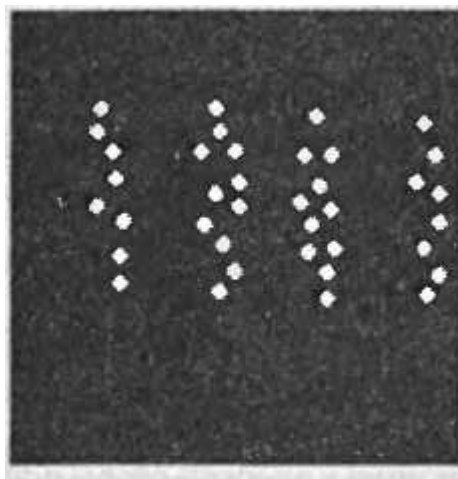


Следующая вспышка тоже возникала в случайном месте, следующая – снова. Если

---

40 Нанометр – это миллиардная доля метра, или  $10^{-9}$  м.

сфотографировать и наложить эти вспышки, то из случайных точек начинает складываться рисунок – волнообразный узор.



Так все же свет – частицы или волны? Ответ зависит от эксперимента и постановки вопроса. Если эксперимент задействует столь слабый свет, что фотоны просачиваются буквально поштучно, то свет выглядит как приход случайных, непредсказуемых фотонов. Но если фотонов много, то они образуют рисунок: свет ведет себя подобно волнам. Великий физик Нильс Бор описывал эту странную ситуацию говоря, что волновая и корпускулярная теории света *взаимно дополнительны*.

Эйнштейн доказал, что фотоны должны обладать энергией. Тому есть убедительные свидетельства. Солнечный свет – фотоны, испущенные Солнцем, – согревают Землю. Солнечные батареи превращают фотоны, приходящие от Солнца, в электричество. Электричество может приводить в движение моторы и поднимать тяжелые грузы. Если свет обладает энергией, то это относится и к составляющим его фотонам.

Ясно, что отдельный фотон несет очень небольшое количество энергии, но сколько именно? Сколько нужно фотонов, чтобы вскипятить чашку чая или в течение часа крутить 100-ваттный мотор? Ответ зависит от длины волны излучения. Более длинноволновые фотоны менее энергичны, чем коротковолновые, так что их для выполнения работы потребуется больше. Очень знаменитая формула, – не настолько, конечно, как  $E = mc^2$ , но все равно очень известная, – дает выражение для энергии отдельного фотона через его частоту<sup>41</sup>:

$$E = hf.$$

Стоящее в левой части уравнения  $E$  представляет энергию фотона, выраженную в единицах, называемых джоулями. В правой части  $f$  – это частота. Для голубого света она составляет  $10^{15}$  Гц. Оставшееся  $h$  – это знаменитая постоянная Планка, константа, которую Макс Планк ввел в 1900 году. Постоянная Планка – очень маленькая величина, но это одна из самых важных фундаментальных констант, управляющая всеми квантовыми явлениями. Она стоит в одном ряду со скоростью света  $c$  и ньютоновской гравитационной постоянной  $G$ :

$$h = 6.62 \times 10^{-34}$$

Поскольку постоянная Планка очень мала, энергия отдельного кванта тоже ничтожна. Для вычисления энергии кванта голубого света умножаем постоянную Планка на частоту  $10^{15}$  Гц и получаем  $6,62 \times 10^{-19}$  джоуля. Значит, потребуется  $10^{39}$  голубых фотонов для того, чтобы вскипятить чашку чая. А фотонов красного света понадобится вдвое больше. Для сравнения: самых энергичных когда-либо зарегистрированных гамма-квантов на кипячение той же чашки ушло бы всего  $10^{18}$  штук.

Приводя все эти формулы и числа, я хочу, чтобы вы запомнили только одну вещь: чем короче длина волны, тем выше энергия отдельного фотона. Высокая энергия означает короткие волны, низкая энергия – длинные волны. Повторите это несколько раз и запишите.

---

<sup>41</sup> Эта формула введена в употребление Максом Планком в 1900 году. Однако именно Эйнштейн понял, что свет состоит из подобных частицам квантов и что эта формула применима к энергии отдельного фотона.

И еще раз повторите: высокая энергия – короткие волны, низкая энергия – длинные волны.

## Предсказание будущего?

Эйнштейн торжественно заявлял: «Бог не играет в кости»<sup>42</sup>. Нильс Бор остроумно связывал: «Эйнштейн, не говори Богу, что ему делать». Оба физика были очень близки к атеизму; крайне сомнительно; чтобы кто-либо из них имел в виду божество, восседающее на облаке и пытающееся выбросить семерку<sup>43</sup>. Но оба, и Бор и Эйнштейн, пробивались через нечто совершенно новое в физике – нечто такое, что Эйнштейн просто отказывался принять: непредсказуемость, которую подразумевали странные новые квантово-механические законы. Разум Эйнштейна восставал против идеи случайности, против элемента непредсказуемости в законах природы. Мысль о том, что приход фотона – это принципиально непредсказуемое событие, была ему глубоко не по душе. Бор, напротив, принимал эту идею, нравилась она ему или нет. Он также понимал, что будущие физики сумеют «настроиться» на квантовую механику и эта настройка будет охватывать непредсказуемость, которой так боялся Эйнштейн.

Нельзя сказать, что Бор лучше представлял себе квантовые явления или чувствовал себя с ними комфортнее. «Всякий, кто не был шокирован квантовой теорией, просто ее не понял», – сказал он однажды. Много лет спустя Ричард Фейнман заявил: «Я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает»<sup>44</sup>. И добавил: «Чем больше вы наблюдаете странное поведение Природы, тем сложнее построить модель, объясняющую даже простейшие явления. И теоретическая физика отказалась от этого»<sup>45</sup>. Не думаю, что Фейнман действительно считал, что физики должны отказаться от попыток объяснить квантовые явления; в конце концов, он ведь сам их все время объяснял. Он имел в виду, что никто не может объяснить квантовые явления в терминах, которые человеческий мозг способен визуализировать при стандартной его «настройке». Фейнман не меньше других обращался к абстрактной математике. Очевидно, что чтение одной главы из книги без уравнений не может вас «перенастроить», но я все же надеюсь, что вы сумеете ухватить главные моменты.

Первое, от чего физики освободились и за что изо всех сил держался Эйнштейн, было представление о том, что физические законы детерминистичны. Детерминизм означает, что будущее можно предсказать, если достаточно много известно о настоящем. Ньютоновская механика, как и вся последующая физика, касалась предсказания будущего. Пьер Симон де Лаплас – тот самый Лаплас, что придумал темные звезды, – твердо верил в предсказуемость будущего. Вот что он писал:

Состояние Вселенной в данный момент можно рассматривать как следствие ее прошлого и как причину ее будущего. Мыслящее существо, которое в определенный момент знало бы все движущие силы природы и все положения всех объектов, из которых состоит мир, могло бы – если бы его разум был достаточно обширен для того, чтобы проанализировать все эти данные, – выразить одним уравнением движение и самых больших тел во Вселенной, и мельчайших атомов; для такого интеллекта не осталось бы никакой неопределенности, и будущее открылось бы перед его взором точно так же, как и прошлое.

Лаплас попросту выводил следствия из ньютоновских законов движения. Фактически мировоззрение Ньютона – Лапласа – это чистейшая форма *детерминизма*. Все, что вам нужно для предсказания будущего, – это знать положения и скорости всех частиц во

---

42 Письмо Макс Борну от 12 декабря 1926 года.

43 Когда бросаются две игральные кости (кубики с гранями, помеченными от 1 До 6), семерка – самое вероятное значение суммы выпавших очков. В некоторых вариантах игры оно считается проигрышным. – Примеч. перев.

44 Цит. по: Фейнман Р. Характер физических законов. / Пер. В. П. Голышева и Э. Л. Наппельбаума. – М.: Наука, 1987. – С. 117. – Примеч. перев.

45 Цит. по: Фейнман Р. КЭД – странная теория света и вещества. / Пер. О.Л. Тиходеевой и С. Г. Тиходеева. – М.: Наука, 1988. – С. 74–Примеч. перев.



Вселенной в некоторый начальный момент времени. Да, и, конечно, вам надо знать силы, действующие на каждую частицу. Знание положения частицы ничего не говорит о том, куда она направляется. Но если вы знаете ее скорость<sup>46</sup> (как по величине, так и по направлению), вы можете сказать, где она окажется в следующий момент. Физики называют *начальными условиями* все то, что вам нужно одновременно знать для предсказания будущего движения системы.

Чтобы понять, что означает детерминизм, давайте вообразим простейший возможный мир – столь простой, что у него есть всего два состояния бытия. Монетка – неплохая его модель, у нее есть два состояния – орел и решка. Нам также нужно задать закон, предписывающий, как состояния меняются от одного мгновения к следующему. Вот пара возможных таких законов.

♦ Первый пример очень скучный. Закон: ничего не происходит. Если в один момент монета лежит решкой вверх, то она будет лежать так же и в следующий момент (скажем, через наносекунду). Аналогично, если она лежит орлом, то будет так лежать и в следующий момент. Этот закон сжато записывается парой простых «формул»:

$$P \rightarrow P \quad O \rightarrow O$$

История мира будет бесконечным повторением: либо Р Р Р Р Р..., либо О О О О О...

♦ Если первый закон совсем скучен, то второй лишь ненамного менее: каково бы ни было состояние в один момент, спустя наносекунду оно меняется на противоположное. Символически это можно выразить так:

$$P \rightarrow O \quad O \rightarrow P$$

История примет тогда вид: РОРОРОР... или ОРОРОРОР...

Оба этих правила детерминистичны, то есть будущее полностью определяется стартовой точкой. В любом случае, если знать начальные условия, можно с уверенностью предсказать, что случится спустя определенный отрезок времени.

Детерминистские законы – не единственно возможные. Могут быть и случайные законы. Простейшим случайным законом был бы такой, по которому независимо от начального состояния в следующий момент произвольно выпадает орел или решка. История, начинающаяся с орла, могла бы выглядеть так: ОООРРРООРР ОРРО О... Но история ООРОРРОРРРО О... тоже вполне возможна. Фактически допустима любая последовательность. Можно считать это миром без законов или миром, закон которого предписывает случайное изменение начального состояния.

Но закон не обязан быть чисто детерминистичным или чисто случайным. Это крайности. Возможен закон, который в основном детерминистичен и содержит лишь малую долю случайности. Закон может, например, говорить, что с вероятностью девять десятых состояние сохраняется, а с вероятностью одна десятая – меняется на противоположное. Типичная история будет выглядеть так:

PPPPPPPOOOOOOOOOOOOPPPPPPPPPPPPOOOOO...

В этом случае игрок с высокой вероятностью может предсказать, близкое будущее: следующее состояние, скорее всего, будет таким же, как и текущее. Шансы угадать будут высокими, если только не заглядывать слишком далеко вперед. Если попытаться предсказывать слишком далекое будущее, вероятности угадать и ошибиться оказываются почти равными. Эта непредсказуемость – как раз то, против чего выступал Эйнштейн, когда говорил, что Бог не играет в кости.

Один момент может вас несколько озадачить: последовательность бросков реальной монеты гораздо ближе к совершенно случайному закону, чем к любому из детерминистических. Случайность кажется очень распространенным свойством нашего мира. Почему понадобилась квантовая механика – чтобы внести в мир непредсказуемость? Но суждение о том, что падение монеты непредсказуемо, – даже без всякой квантовой механики – это чистой воды недоразумение. Проследить за всеми важными деталями обычно

46 Термин «скорость» означает не только то, насколько быстро движется объект, но также и направление его движения. Так, 60 км/ч – это неполная информация о скорости; а вот 60 км/ч на север-северо-запад – полная.

очень трудно. Монета – это все же не изолированный мир. Тонкости движения мышц, которые двигают руку и подбрасывают монету; потоки воздуха в комнате; тепловые колебания молекул, как в самой монете, так и в воздухе, – все это факторы, влияющие на исход, и в большинстве случаев этой информации слишком много, чтобы с ней можно было работать. Помните, Лаплас говорил о существе, которое знает «все движущие силы природы и все положения *всех* объектов, из которых состоит мир»? Малейшей ошибки в положении единственной молекулы достаточно для того, чтобы разрушить способность предсказания будущего. Но не этот обыденный вид случайности беспокоил Эйнштейна. Под Богом, играющим в кости, Эйнштейн подразумевал то, что глубочайшие законы природы содержат неустрашимый элемент случайности, который никак нельзя обойти, даже если нам известно всё, что в принципе можно узнать.

## Информация не умрет никогда

Один непреодолимой силы аргумент против того, чтобы допускать случайность, состоит в том, что в большинстве случаев она будет нарушать закон *сохранения энергии* (см. главу 7). Этот закон утверждает, что, хотя энергия может существовать во множестве разных форм и способна переходить из одной формы в другую, полное количество энергии никогда не меняется. Сохранение энергии – один из наиболее тщательно подтвержденных фактов относительно природы, и возможностей перехитрить его совсем немного. Случайные толчки будут изменять энергию объекта, спонтанно его ускорять или тормозить.

Существует другой, очень тонкий физический закон, который, возможно, даже более фундаментален, чем закон сохранения энергии. Его иногда называют обратимостью, но давайте будем называть его законом *сохранения информации*. Сохранение информации подразумевает, что если вы с идеальной точностью знаете настоящее, вы можете предсказать будущее на все времена. Но это лишь половина дела. Закон также утверждает, что если вы знаете настоящее, то вы можете быть абсолютно уверены в прошлом. То есть он работает в обоих направлениях.

В мире орлов и решек одной монеты полностью детерминистический закон гарантирует идеальное сохранение информации. Например, при законе

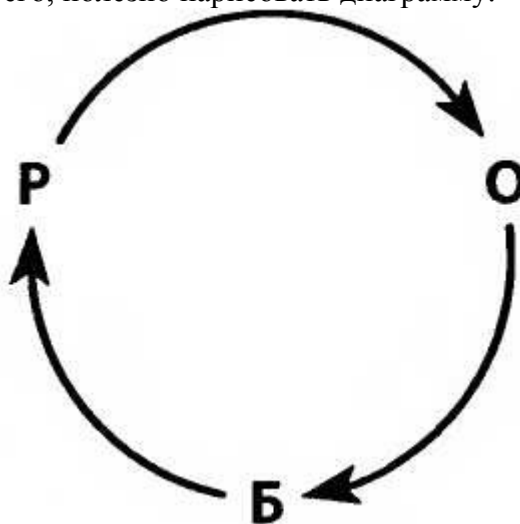
$$P \rightarrow O \quad O \rightarrow P$$

как прошлое, так и будущее можно предсказать идеально точно. Но даже малейшая доля случайности разрушает эту идеальную предсказуемость.

Давайте рассмотрим другой пример, на этот раз с воображаемой трехсторонней монетой (игральная кость – это шестисторонняя монета). Назовем три стороны орлом, решкой и ребром или О, Р и Б. Вот идеально детерминистический закон:

$$P \rightarrow O \quad O \rightarrow B \quad B \rightarrow P$$

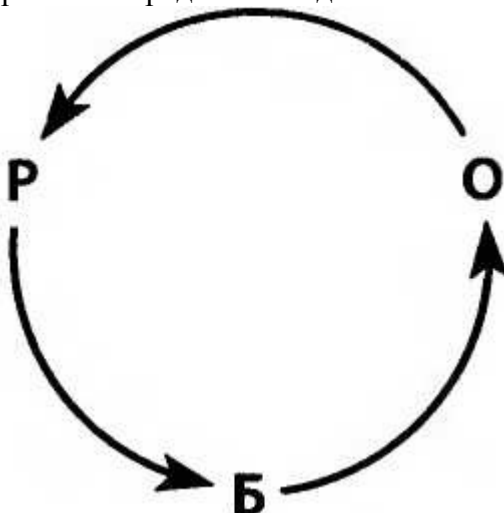
Чтобы визуализировать его, полезно нарисовать диаграмму.



С таким законом история мира, начинающаяся с Р, будет выглядеть так:

РОБРОБРОБРОБРОБРОБРОБ...

Существует ли способ экспериментально проверить закон сохранения информации? Фактически есть множество способов, одни из них реализуемы, другие нет. Если вы способны контролировать закон и менять его по своему желанию, выполнить проверку будет очень просто. Вот как это сделать в случае трехсторонней монеты. Начнем с одного из трех ее состояний, и пусть определенное время все идет своим чередом. Допустим, каждую наносекунду состояние меняется с Р на О, затем на Б и далее в цикле по всем трем возможностям. В конце отмеренного интервала времени изменим закон. Новый закон будет таким же, как прежний, но с обратным порядком обхода – не по часовой стрелке, а против.



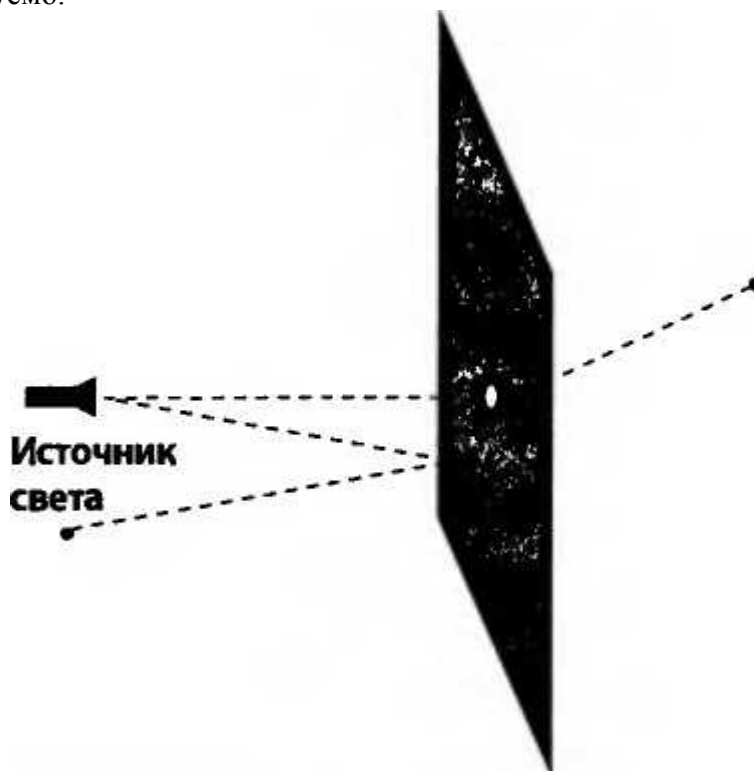
Теперь дадим системе поработать на обратном ходу ровно столько же времени, сколько она работала на прямом. Первоначальная история повернется вспять, и монета вернется в исходную точку. Не важно, сколько времени вы ждали, детерминистический закон обладает идеальной памятью и всегда возвращает к начальным условиям. Чтобы проверить закон сохранения информации, вам даже не надо знать точный вид этого закона, главное, чтобы он был обратимым. Данный эксперимент удастся всегда, если только закон детерминистичен. Но он окончится неудачей, если имеет место какая-либо случайность (если только эта случайность не совсем уж ничтожная).

Вернемся к Эйнштейну, Бору, Богу (воспринимайте его как законы физики) и квантовой механике. Еще один знаменитый афоризм Эйнштейна гласит: «Господь изощрен, но не злонамерен». Я не знаю, что заставило Эйнштейна думать, что законы физики не злонамеренны. Лично я порой нахожу, что закон тяготения – весьма злая штука. Но Эйнштейн был прав относительно изощренности. Законы квантовой механики крайне изощренны – настолько изощренны, что они позволяют случайности сосуществовать как с законом сохранения энергии, так и с сохранением информации.

Рассмотрим частицу. Подойдет любая, но лучше выбрать фотон. Он порождается источником света, лазером например, и направляется к непрозрачному листу металла с крошечным отверстием в нем. За отверстием находится люминесцентный экран, который вспыхивает, когда на него попадает фотон.



Через некоторое время фотон может пройти через отверстие или промахнуться и отразиться от препятствия. В первом случае он попадает на экран, но не обязательно напротив отверстия. Вместо сохранения прямолинейного движения фотон может, проходя через отверстие, приобрести случайный импульс. Так что окончательное положение вспышки непредсказуемо.



Теперь удалим люминесцентный экран и повторим эксперимент. Через короткое время фотон либо попадет в металлический лист и отразится, либо пройдет через отверстие, испытав случайный толчок. Не имея ничего для детектирования фотона, невозможно сказать, где находится фотон и в каком направлении он движется.

Но представим, что мы вмешались и обратили закон движения фотона<sup>47</sup>. Чего ждать от

<sup>47</sup> Если среди вас есть эксперты, они удивятся: разве возможно вмешаться и обратить закон? На практике обычно невозможно, но в некоторых простых системах это несложно. В любом случае, в мысленном

такого реверсированного фотона спустя тот же отрезок времени? Естественно ожидать, что случайность (при развороте случайность остается случайностью) похоронит всякую надежду на то, что фотон вернется в исходную точку. Случайность второй половины нашего эксперимента должна наложиться на случайность первой половины и сделать движение фотона еще более непредсказуемым.

Однако ответ куда изощреннее. Прежде чем я объясню, в чем дело, давайте ненадолго вернемся к эксперименту с трехсторонней монетой. 1 км мы тоже сначала запускали закон в одном направлении, а потом обращали его. В том эксперименте была одна деталь, которую я опустил: смотрел ли кто-нибудь на монету непосредственно перед тем, как обратить закон. Но что может измениться, если кто-то подсматривал? Ничего не изменится, если только взгляд на монету не меняет ее состояния. Кажется, это не слишком жесткое условие; хотел бы я посмотреть на монету, которая подлетает в воздух и переворачивается только потому, что кто-то на нее посмотрел. Но в изысканном мире квантовой механики нельзя взглянуть на кого-то, не побеспокоив.

Возьмем фотон. Когда мы запускаем его в обратном направлении, возвращается ли он в свое исходное положение, или же случайность квантовой механики подрывает сохранение информации? Ответ оказывается довольно странным: все зависит от того, смотрели ли мы на фотон в момент нашего вмешательства. Под словами «смотреть на фотон» я подразумеваю проверку местоположения или направления движения фотона. Бели мы подсматриваем, то конечный результат (после обратного прогона) будет случайным и закон сохранения информации нарушится. Но если мы проигнорируем фотон, не предприняв абсолютно ничего для определения его положения и направления движения, а просто обратим закон, фотон спустя предписанный отрезок времени магическим образом вернется в свое исходное положение. Иными словами, квантовая механика, несмотря на свою непредсказуемость, тем не менее подчиняется закону сохранения информации. Не знаю, злонамерен Бог или нет, но он, безусловно, изощрен.

Обращение вспять физических законов вполне осуществимо математически. А что можно сказать о реальности? Я очень сильно сомневаюсь, что кто-то сможет когда-нибудь обратить сколько-нибудь нетривиальную систему. Тем не менее, можем мы выполнить это на практике или нет, математическая обратимость квантовой механики (физики говорят о *ее унитарности*) критически важна для ее целостности. Без этого квантовая логика разрушается.

Тогда почему Хокинг думал, что информация уничтожается при объединении квантовой теории с гравитацией? Если сжать аргументацию до формата лозунга, он будет звучать так:

*Информация, упавшая в черную дыру, – это утраченная информация.*

Если выразить это иначе: законы никогда не могут быть обращены, поскольку ничто не может вернуться назад из-за горизонта черной дыры.

Если Хокинг был прав, то в законах природы будет содержаться все нарастающий элемент случайности и всё основание физики обрушится. Но к этому мы вернемся позже.

## **Принцип неопределенности**

Лаплас считал, что он может предсказать будущее, если только достаточно знает о настоящем. К несчастью для всех будущих предсказателей мира, узнать одновременно положение и скорость объекта невозможно. Я не о том, что это чрезвычайно трудно или что неосуществимо при современном уровне развития технологии. Никакая технология, подчиняющаяся законам физики, *никогда* не сможет справиться с этой задачей, точно так же как ни одна технология не позволит перемещаться быстрее света. Любой эксперимент, поставленный так, чтобы одновременно измерять положение и скорость частицы, пойдет против принципа неопределенности Гейзенберга.

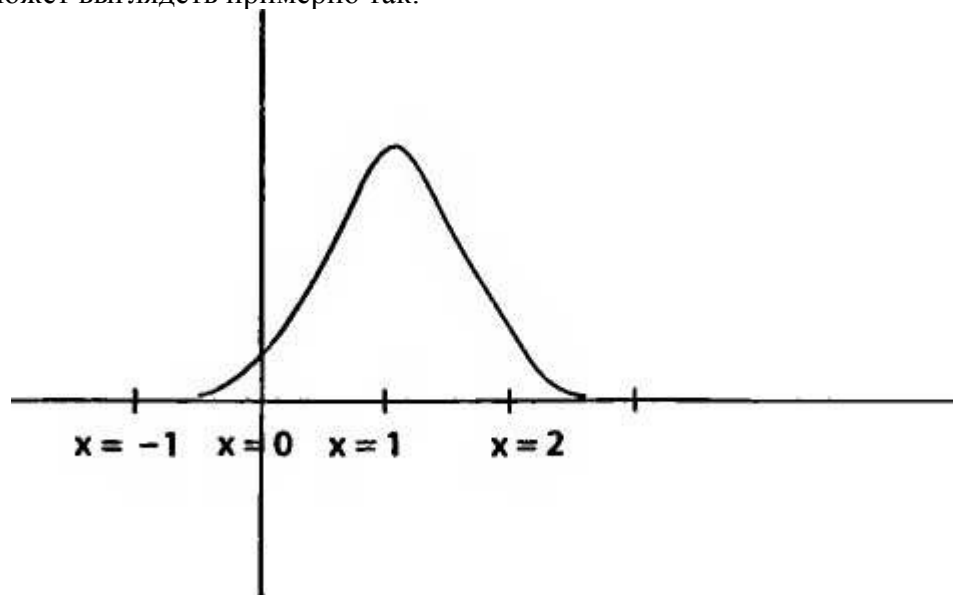
---

эксперименте или в математическом упражнении это вполне осуществимо.

Принцип неопределенности стал тем перевалом, который поделил физику на доквантовую *классическую* эпоху и постмодернистскую эру квантовых «странностей». Классическая физика охватывает все, что появилось до квантовой механики, включая ньютоновскую теорию движения, максвелловскую теорию света и эйнштейновскую теорию относительности. Классическая физика детерминистична; квантовая физика полна неопределенности.

Принцип неопределенности – это странное и дерзкое утверждение, сделанное в 1927 году 26-летним Вернером Гейзенбергом, после того как он и Эрвин Шрёдингер открыли математику квантовой механики. Даже в эпоху множества необычных идей этот принцип выглядит крайне странным. Гейзенберг не утверждал, что есть какие-либо ограничения на точность, с которой можно измерить положение объекта. Координаты, задающие положение частицы в пространстве, можно определить с любой желаемой степенью точности. Он также не ставил пределов точности, с которой может быть измерена скорость объекта. Но он утверждал, что никакой эксперимент, как бы сложно и изобретательно он ни был поставлен, не может измерить положение и скорость одновременно. Это как если бы эйнштейновский Бог устроил бы все так, чтобы никто и никогда не мог предсказывать будущее.

Хотя принцип неопределенности посвящен расплывчатости, но в нем самом, парадоксальным образом, нет ничего расплывчатого. Неопределенность – это строгая концепция, включающая измерения вероятностей, интегральное исчисление и прочие математические изыски. Впрочем, перефразируя широко известное выражение, одна картинка стоит тысячи уравнений. Начнем с представления о распределении вероятностей. Пусть для очень большого числа частиц, скажем для триллиона, изучается их расположение вдоль горизонтальной оси, также называемой осью  $X$ . Первая частица оказалась в точке  $x = 1,3257$ , вторая –  $x = 0,9134$  и т. д. Можно составить длинный список координат всех частиц. К сожалению, этот список займет около десяти миллионов книг вроде этой, и для большинства задач в нем не будет чего-то особенно интересного. Было бы куда информативнее получить статистический график, показывающий долю частиц, обнаруженных на каждом значении  $x$ . Этот график может выглядеть примерно так:

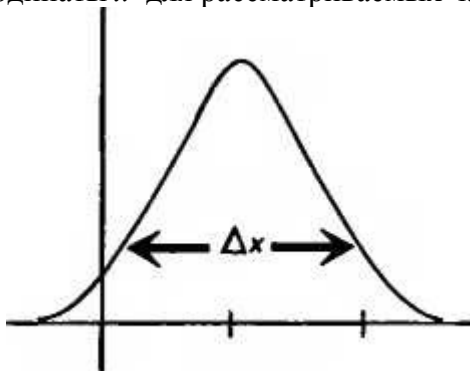


Один взгляд на этот график говорит нам, что большинство частиц находится вблизи точки  $x = 1$ . Для некоторых задач этого может хватить. Но достаточно чуть присмотреться, чтобы высказаться значительно точнее. Около 90 % частиц находятся между отметками  $x = 0$  и  $x = 2$ . Если делать ставки на то, где окажется конкретная частица, то наибольшие шансы будут при  $x = 1$ , но неопределенность – математическая мера того, насколько «широка» кривая на графике, – составит около 2 единиц<sup>48</sup>. Греческая буква дельта ( $\Delta$ ) служит

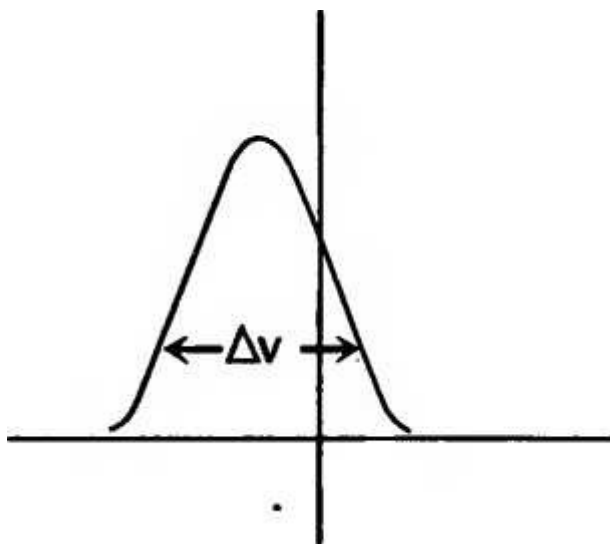
---

<sup>48</sup> Конечно, колоколообразная кривая продолжается и за границами осей, изображенных на графике, так что есть возможность обнаружить частицы и вдали от этой области. Математическая неопределенность дает нам

стандартным математическим обозначением для неопределенности. В данном случае  $\Delta x$  означает неопределенность координаты  $x$  для рассматриваемых частиц.



Проведем еще один мысленный эксперимент. Вместо измерения положений частиц будем измерять их скорости, считая их положительными для частиц, движущихся вправо, и отрицательными для тех, что движутся влево. На этот раз горизонтальная ось представляет скорость  $v$ .



Из графика видно, что большинство частиц движется влево, и можно также составить представление о разбросе скоростей  $\Delta v$ .

Принцип неопределенности говорит примерно следующее: любая попытка уменьшить неопределенность положения неизбежно будет приводить к увеличению неопределенности скорости. Например, можно целенаправленно выбрать только частицы в узком диапазоне значений  $x$ : скажем, между  $x = 0,9$  и  $x = 1,1$ , отбросив все остальные. Для этого тщательно отобранного подмножества частиц неопределенность будет составлять всего  $0,2$ , в десять раз меньше исходного  $\Delta x$ . Можно надеяться таким способом обойти принцип неопределенности, но это не срабатывает.

Оказывается, если взять то же подмножество частиц и измерить их скорости, разброс их значений окажется значительно больше, чем в исходной выборке. Вы можете удивиться, почему так происходит, но, боюсь, это просто один из непостижимых квантовых фактов, которым нельзя дать классического объяснения. Это одна из тех вещей, о которых Фейнман говорил: «Теоретическая физика отказалась от этого».

При всей непостижимости, это экспериментальный факт: всякий раз, когда мы сокращаем  $\Delta x$ , неизбежным следствием становится рост  $\Delta v$ . И аналогично, все, что приводит к сокращению  $\Delta v$ , вызывает увеличение  $\Delta x$ . Чем сильнее мы стараемся зафиксировать положение частицы, тем неопределеннее мы делаем ее скорость, и наоборот.

Это было грубое описание идеи, но Гейзенберг смог выразить свой принцип неопределенности в более точной, количественной форме. Он утверждает, что произведение  $\Delta v$ ,  $\Delta x$  и массы частицы  $m$  всегда больше ( $>$ ) постоянной Планка  $h$ .

$$m \Delta v \Delta x > h.$$

Посмотрим, как это работает. Предположим, что мы очень тщательно подготовили частицы, так что величина  $\Delta x$  чрезвычайно мала. Это вынуждает неопределенность скорости  $\Delta v$  становиться достаточно большой, чтобы произведение было больше  $h$ . Чем меньше мы делаем  $\Delta x$ , тем больше становится  $\Delta v$ .

Как получается, что мы не замечаем проявлений принципа неопределенности в повседневной жизни? Разве бывало такое, чтобы при вождении автомобиля наше положение становилось «размытым», при внимательном взгляде на спидометр? И разве спидометр сходит с ума, когда мы определяем по карте, где именно мы находимся? Конечно нет. Но почему? Ведь принцип неопределенности никому не делает поблажек, он применим ко всему, в том числе к вам и вашему автомобилю, точно так же как к электронам. Ответ связан с массой, которая входит в формулу, и с малостью постоянной Планка. В случае электрона очень малая масса электрона сокращается с малостью  $h$ , и потому совокупная неопределенность  $\Delta v$  и  $\Delta x$  должна быть весьма значительной. Но масса автомобиля очень велика в сравнении с постоянной Планка. Поэтому обе величины  $\Delta v$  и  $\Delta x$  могут оставаться неизмеримо малыми, не нарушая принципа неопределенности. Теперь понятно, почему природа не приспособила наш мозг к квантовой неопределенности. В этом не было необходимости: в обыденной жизни мы никогда не сталкиваемся с объектами достаточно легкими, чтобы приходилось учитывать принцип неопределенности.

Таков принцип неопределенности: непреодолимая уловка-22, гарантирующая, что никто не сможет узнать достаточно, чтобы предсказывать будущее. Мы вернемся к принципу неопределенности в главе 15.

## Нулевые колебания и квантовая дрожь

Маленький сосуд, скажем сантиметрового размера, заполнили атомами – пусть это будут атомы гелия, они химически инертны, – а затем нагрели до высокой температуры. Благодаря нагреву частицы стали быстро двигаться, непрерывно сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда. Эта постоянная бомбардировка создает давление на стенки.

По обыденным меркам, атомы движутся очень быстро: их средняя скорость составляет около 1500 м/с. Теперь газ охлаждается. По мере отвода тепла энергия теряется и атомы замедляются. В конце концов, если продолжить отводить тепло, газ охладится до наинизшей возможной температуры – абсолютного нуля, или примерно минус 273,15 градуса по шкале Цельсия. Атомы, потеряв всю свою энергию, останавливаются, и давление на стенки сосуда исчезает.

По крайней мере, *предполагается*, что это должно произойти. Но в этом рассуждении забыли принять во внимание принцип неопределенности.

Подумайте: что в данном случае нам известно о положении любого атома? На самом деле очень много: атом заключен внутри сосуда, а сосуд имеет размер один сантиметр. Очевидно, что неопределенность его положения  $\Delta x$  меньше сантиметра. Допустим на мгновение, что все атомы действительно пришли в состояние покоя, когда мы отвели все тепло. Каждый атом будет иметь нулевую скорость без неопределенности. Иначе говоря,  $\Delta v$  станет нулем. Но это невозможно. Будь это так, произведение  $m\Delta v\Delta x$  тоже обратилось бы в нуль, а нуль определенно меньше постоянной Планка. Можно подойти к этому иначе: если бы скорость атома стала нулевой, его положение оказалось бы бесконечно неопределенным. Но это не так. Все атомы находятся в сосуде. Так что даже при абсолютном нуле атомы не могут полностью прекратить свое движение; они продолжают ударяться в стенки сосуда и оказывать на них давление. Это одна из неожиданных причуд квантовой механики.

Когда из системы откачено так много энергии (при температуре абсолютного нуля),



физики говорят, что она находится в *основном состоянии*. Остаточные флуктуации в основном состоянии обычно называют *нулевыми колебаниями*, однако физик Брайан Грин предложил более яркое разговорное выражение – «квантовая дрожь».

Дрожи подвержены не только положения частиц. Согласно квантовой механике, все, что может дрожать, дрожит. Другой пример – электрическое и магнитное поля в пустом пространстве. Вибрации электрических и магнитных полей окружают нас со всех сторон, заполняя пространство в виде световых волн. Даже в темной комнате электромагнитные поля вибрируют в форме инфракрасных волн, микроволн и радиоволн. Но что, если затемнить комнату, применив все достижения науки и устранив все фотоны? Электрическое и магнитное поля продолжают свое квантовое дрожание. «Пустое» пространство – это бешено вибрирующая, осциллирующая, дрожащая среда, которая никогда не успокаивается.

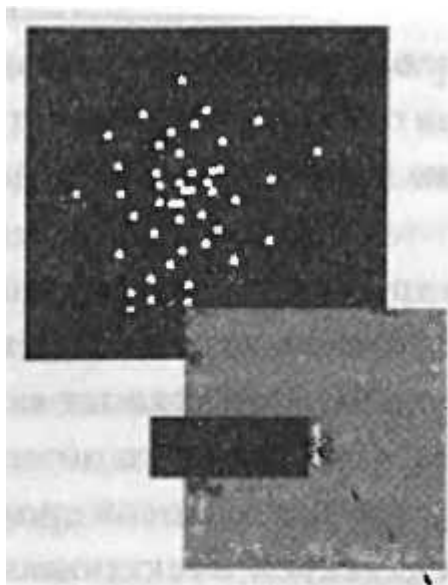
Еще до появления квантовой механики было известно о «тепловой дрожи», которая все заставляет флуктуировать. Например, нагрев газа вызывает усиление случайных движений молекул. Когда же нагрето пустое пространство, оно заполнено дрожащими электрическими и магнитными полями. Это не имеет никакого отношения к квантовой механике и было известно еще в девятнадцатом веке.

Квантовая и тепловая дрожь кое в чем похожи друг на друга, но не во всем. Тепловая дрожь очень хорошо заметна. Дрожание молекул и электромагнитных полей раздражает ваши нервные окончания и позволяет чувствовать тепло. Оно может быть крайне разрушительным. Например, энергия тепловой дрожи электромагнитных полей может передаваться электронам в атомах. Если температура достаточно высока, электроны могут отрываться от атомов. Эта же энергия может вас сжечь или даже испарить. Напротив, квантовая дрожь, хотя и может быть невероятно энергичной, не способна причинить боль. Она не раздражает нервные окончания и не разрушает атомы. Почему? Она достигает энергии, необходимой для ионизации атома (выбивания из него электронов) или для срабатывания ваших нервных окончаний. Однако из основного состояния невозможно позаимствовать энергию. Квантовая дрожь – это то, что остается, когда система находится в состоянии абсолютного энергетического минимума. Так что невероятно сильные квантовые флуктуации не обладают деструктивным эффектом тепловых флуктуаций, поскольку их энергия «недоступна».

## Черная магия

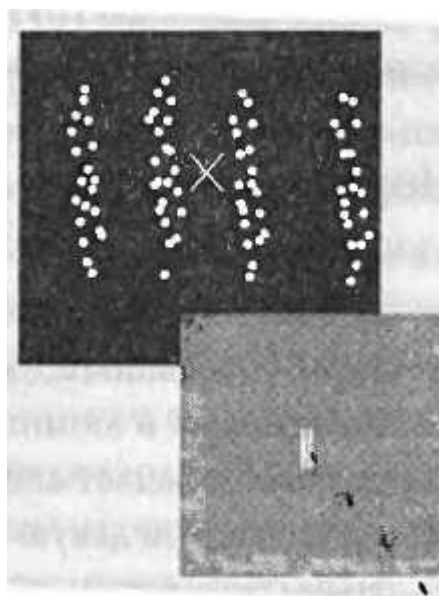
Для меня самое странное в квантовой механике – это *интерференция*. Вернемся к эксперименту с двумя щелями, который я описывал в начале этой главы. В нем три составляющих: источник света, плоский экран с двумя узкими щелями и люминесцентный экран, который вспыхивает, когда на него попадает свет.

Начнем экспериментировать, закрыв левую щель. Результатом будет округлая засветка на экране без всяких деталей. Если снизить яркость источника, то станет видно, что это свечение в действительности складывается из случайно расположенных вспышек, вызванных отдельными фотонами. Вспышки непредсказуемы, но их достаточно много, они складываются в округлое пятно.



Вели открыть левую щель и закрыть правую, рисунок на экране в целом практически не изменится, не считая небольшого сдвига влево.

Сюрприз ждет нас, когда будут открыты обе щели. Вместо простого наложения фотонов, прошедших через левую и правую щели, с получением более интенсивного округлого пятна без внутренних деталей результатом оказывается полосатый узор наподобие зебры.



Самая странная вещь в этом новом рисунке – наличие в нем темных полос, куда не попадают фотоны, *несмотря на то что те же области заполнялись вспышками, когда открыта была только одна щель*. Возьмем точку, помеченную буквой X на центральной темной полосе. Фотоны легко проходят через любую из щелей и попадают в точку X, когда в один момент открыта только одна из щелей. Может показаться, что при обеих открытых щелях число фотонов, попадающих в точку X, только возрастет. Но открытие двух щелей дает парадоксальный эффект: поток фотонов, приходящих в точку X, прекращается. Почему открытие обеих щелей делает менее вероятным для фотона попадание в точку X?

Представьте себе кучку пьяных заключенных, шатающихся по подземелью с двумя дверями, ведущими наружу. Тюремщик внимательно следит за тем, чтобы никогда не оставлять открытой одну дверь, поскольку некоторые узники столь пьяны, что могут случайно найти выход. Но у него нет сомнений относительно отпирания сразу двух дверей. Какая-то загадочная магия мешает пьяницам выйти наружу, когда открыты обе двери. Конечно, с настоящими заключенными такого не случается, но нечто в этом роде

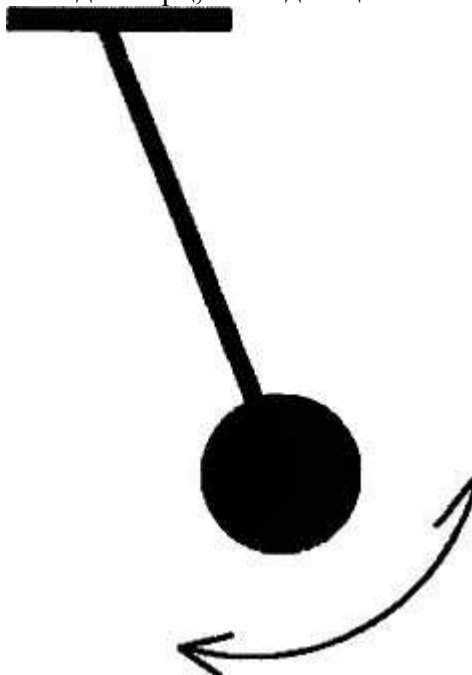
предсказывает иногда квантовая механика не только для фотонов, но и для всех частиц.

Этот эффект кажется странным, если считать, что свет состоит из частиц, но он совершенно естествен для волн. Две волны, расходящиеся из двух щелей, усиливают друг друга в одних точках и гасят – в других. В волновой теории света темные полосы возникают в результате взаимного гашения, которое также называют *деструктивной интерференцией*. Единственная проблема состоит в том, что на самом деле свет иногда ведет себя как частицы.

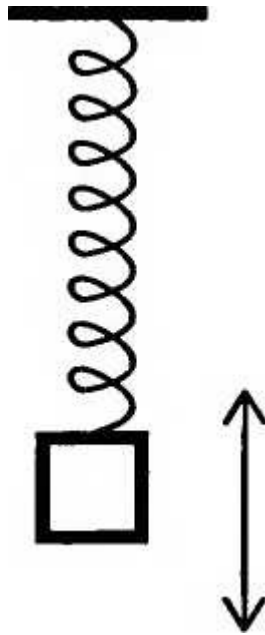
### Квант в квантовой механике

Электромагнитная волна – это пример колебания. В каждой точке пространства электрическое и магнитное поля вибрируют с частотой, которая зависит от цвета излучения. В природе существует множество других колебаний. Вот некоторые широко известные примеры.

♦ Маятник часов. Маятник совершает полное колебание вперед и назад примерно за секунду. Частота такого маятника – один герц, или один цикл в секунду.



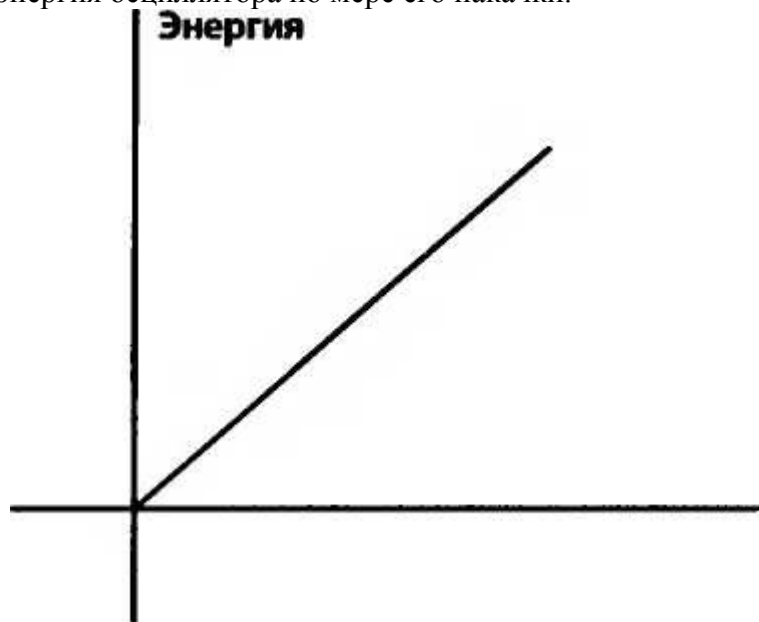
♦ Груз, подвешенный к потолку на пружине. Если пружина достаточно жесткая, частота колебаний составит несколько герц.



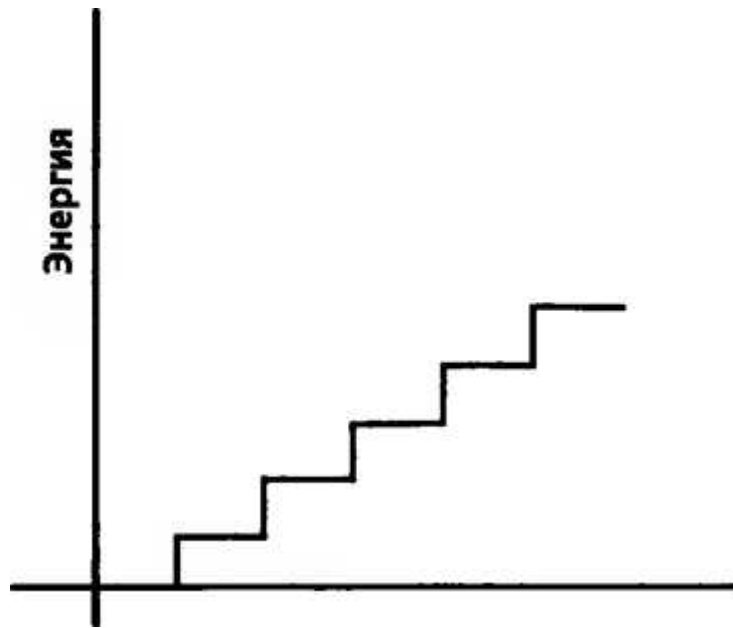
♦ Вибрация камертона или скрипичной струны. И то и другое может давать несколько сотен герц.

♦ Электрический ток в цепи. Он может осциллировать с гораздо большей частотой.

Системы, способные осциллировать, называются – что, в общем, неудивительно – *осцилляторами*. Все они обладают энергией, по крайней мере когда осциллируют, и в классической физике эта энергия может иметь любую величину. Я имею в виду, что осциллятор можно плавно накачивать энергией до любого желаемого значения. На графике показано, как растет энергия осциллятора по мере его накачки.



Но оказывается, что в квантовой механике энергия может поступать только маленькими неделимыми порциями. Если попытаться плавно увеличить энергию осциллятора, результатом будет лестница, а не гладкий пандус. Прибавление может осуществляться лишь порциями, кратными единице, называемой *квантом энергии*.



Какова величина квантовой единицы? Это зависит от частоты осциллятора. Правило здесь в точности то же самое, что было открыто Планком и Эйнштейном для световых квантов: квант энергии  $E$  – это частота осциллятора  $f$ , помноженная на постоянную Планка  $h$  :

$$E = hf.$$

У обычных осцилляторов, таких как маятник, частота не очень велика и шаг по высоте (квант энергии) чрезвычайно мал. В этом случае ступенчатый график состоит из таких крошечных шагов, что выглядит как гладкий подъем. Именно поэтому мы не замечаем *квантования энергии* в повседневной жизни. Однако электромагнитные волны могут иметь достаточно высокие частоты, при которых ступеньки лестницы будут значительно выше. В действительности, как вы могли уже догадаться, увеличение энергии электромагнитной волны на одну ступень – это то же, что добавление одного фотона к пучку света.

Для классически настроенного мозга кажется нелогичным тот факт, что энергия может добавляться только неделимыми квантами, но именно это вытекает из квантовой механики.

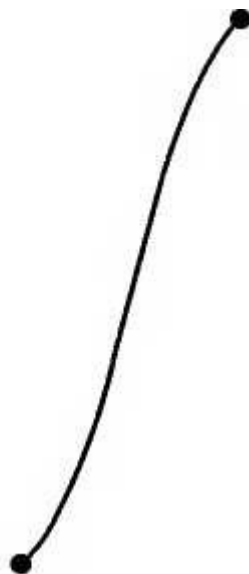
## Квантовая теория поля

Лапласовская картина мира восемнадцатого века была довольно унылой: частицы, ничего, кроме частиц, движущихся по орбитам, которые предопределены деспотичными уравнениями Ньютона. Я бы рад сообщить, что современная физика предлагает более теплую, размытую картину реальности, но боюсь, что это не так. Это по-прежнему частицы, только на современный манер. Железный закон детерминизма заменен более гибким законом квантовой случайности.

Новый математический аппарат, заменивший ньютоновские законы движения, называется квантовой теорией поля, и согласно его диктату, весь природный мир состоит из элементарных частиц, движущихся из одной точки в другую, сталкивающихся, распадающихся и вновь сливающихся. Это колоссальная сеть мировых линий, соединяющих события (точки пространства-времени). Математику этой гигантской паутины из линий и точек нелегко объяснить на обыденном языке, но главные моменты совершенно ясны.

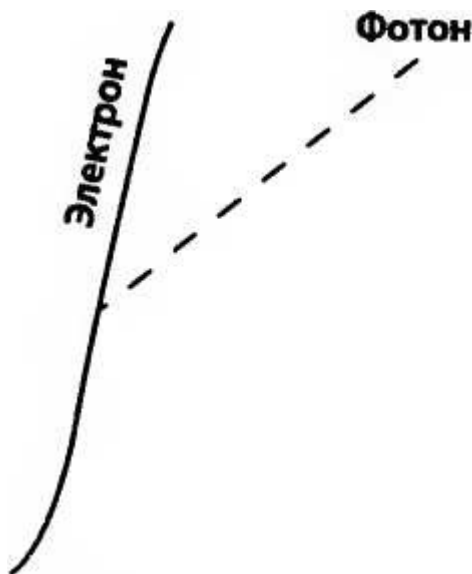
В классической физике частицы движутся от одной точки пространства-времени к другой по строго определенным траекториям. Квантовая механика вносит в их движение неопределенность. Тем не менее мы можем считать, что они проходят между точками пространства-времени, хотя и по неопределенным траекториям. Эти расплывчатые траектории называются *пропагаторами*. Обычно пропагаторы изображаются линиями между двумя пространственно-временными событиями, но лишь потому, что не существует

способа нарисовать неопределенное движение подлинных квантовых частиц.



### Пропагатор

Далее следуют взаимодействия, которые говорят нам, как частицы ведут себя при встрече. Базовый процесс взаимодействия называется узлом. Узел подобен дорожной развилке. Частица движется по своей мировой линии, пока не оказывается на развилке. Но вместо того чтобы выбрать одну из двух дорог, частица разделяется на две – по одной для каждой дороги. Лучший известный пример узла – это испускание фотона заряженной частицей, или электроном. В этом случае одинокий электрон спонтанно разделяется на электрон и фотон<sup>49</sup>. (Мировые линии фотонов традиционно изображают либо волнистыми, либо пунктирными.)



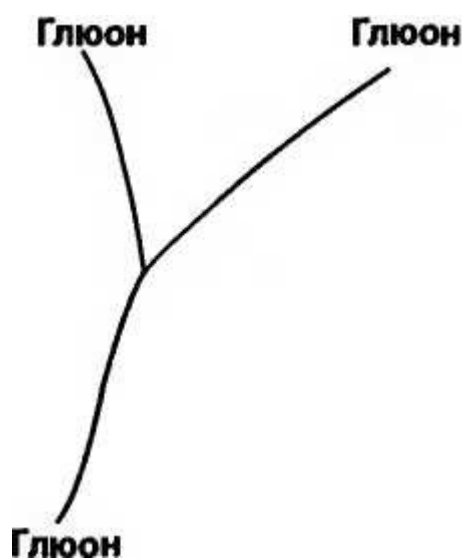
### Узел с испусканием фотона

Это базовый процесс испускания света: от дрожащих электронов отщепляются фотоны.

Существуют множество узлов другого типа, в которых задействуются другие частицы. В атомных ядрах, например, есть частицы, называемые глюонами. Глюон способен распадаться на два глюона.

---

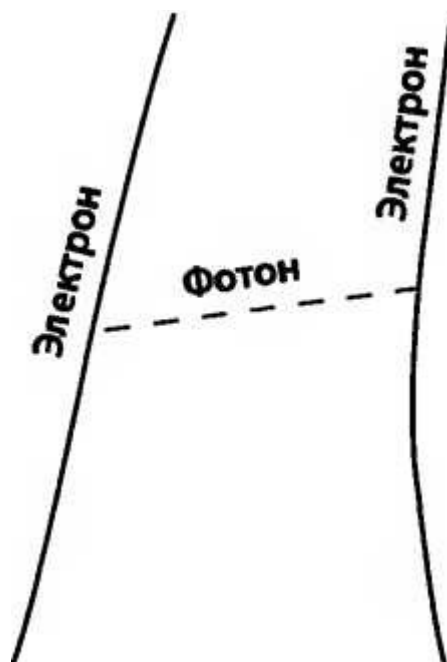
<sup>49</sup> Интуитивно кажется, что, когда нечто разделяется, каждая часть будет меньше оригинала. Это представление унаследовано из повседневного опыта. Разделение электрона на электрон и фотон показывает, насколько обманчивой может быть наша интуиция.



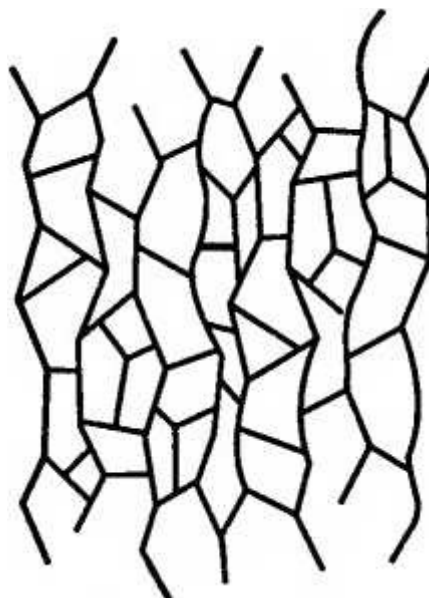
### ***Глюонный узел***

Любой процесс, способный протекать в прямом направлении, может также протекать и в обратном. Это означает, что частицы могут встречаться и сливаться. Например, два глюона могут встретиться и соединиться в один глюон.

Ричард Фейнман придумал, как объединять пропагаторы и узлы, формируя более сложные процессы. Например, существует фейнмановская диаграмма, изображающая фотон, перепрыгивающий с одного электрона на другой, которая описывает, как электроны сталкиваются и рассеиваются.



Другая диаграмма показывает, как глюоны образуют запутанное, липкое, тягучее вещество, которое удерживает вместе кварки в ядре.



Ньютоновская механика ищет ответы на древний вопрос о предсказании будущего по заданному начальному состоянию, включающему положения и скорости множества частиц. Квантовая Теория поля ставит вопрос иначе: дан начальный набор частиц, движущихся определенным образом, какова вероятность различных исходов?

В какой-то мере здесь используется наивная (и ошибочная) версия квантовой теории поля, которую легко бы понял Лаплас, хотя она бы могла ему не понравиться: поведение частицы не детерминировано; но существует положительная вероятность<sup>50</sup> для каждого маршрута, ведущего в прошлое (два электрона) и в будущее (два электрона и фотон). Отсюда может сложиться впечатление, что для нахождения полной вероятности надо просто сложить индивидуальные вероятности для всех возможных маршрутов. Такое заключение идеально соответствовало бы лапласовскому, классически настроенному мышлению, но на самом деле все устроено не так. Правильный рецепт выглядит странно – не пытайтесь прогнуть этот результат, просто примите его.

Верный рецепт является одним из следствий странной «квантовой логики», открытой великим английским физиком Полем Дираком сразу вслед за работами Гейзенберга и Шрёдингера. Фейнман следовал идеям Дирака, когда вводил математические правила вычисления *амплитуды вероятности* для каждой фейнмановской диаграммы. Более того, сложив амплитуды вероятности для всех диаграмм, вы не получите окончательную вероятность. В действительности амплитуды вероятности не обязаны быть положительными числами. Они могут быть положительными, отрицательными и даже комплексными.

Но амплитуда вероятности – это не вероятность. Чтобы найти полную вероятность того, что, скажем, два электрона превратятся в два электрона и фотон, надо прежде всего сложить амплитуды вероятностей для всех фейнмановских диаграмм. Затем, согласно дираковской абстрактной квантовой логике, надо взять полученную величину и *возвести ее в квадрат!* Этот результат всегда положителен, и он дает вероятность для конкретного исхода.

Это необычное правило лежит в самом основании квантовых странностей. Лапласу это показалось бы абсурдом, и даже Эйнштейн не находил в этом смысла. Но квантовая теория поля невероятно точно описывает все, что мы знаем об элементарных частицах, включая то, как они соединяются, формируя ядра, атомы и молекулы. Как я уже говорил во введении, квантовым физикам приходится перенастраиваться на новые правила логики<sup>51</sup>.

<sup>50</sup> Значения вероятностей в обычной теории вероятности всегда выражаются положительными числами. Трудно представить, что могла бы означать отрицательная вероятность. Попробуйте придать смысл следующей фразе: «Если я брошу монету, то вероятность того, что выпадет решка, составляет минус одну треть». Очевидно, что это недоразумение.

<sup>51</sup> Я, конечно, не ожидаю, что неподготовленный читатель полностью поймет этот закон или хотя бы то, почему он так странен. Тем не менее я надеюсь, что у него получится уловить хотя бы запах работы законов



Прежде чем завершить эту главу, я бы хотел вернуться к тому, что так глубоко беспокоило Эйнштейна. Я не знаю наверняка, но предполагаю, что это было связано с предельно бессмысленной природой вероятностных утверждений. Меня всегда озадачивало: что же они на самом деле говорят о нашем мире? Насколько я могу судить, они не означают ничего определенного. Чтобы проиллюстрировать эту мысль, я однажды написал приведенную ниже историю, включенную первоначально в книгу Джона Брокмана «Во что мы верим, но не можем доказать»<sup>52</sup>. История под названием «Беседа со студентом-тугодумом» описывает разговор между профессором физики и студентом, который никак не может уловить суть. Когда я писал эту историю, то отождествлял себя скорее со студентом, чем с профессором.

Студент: Здравствуйте, профессор. У меня проблема. Я решил провести небольшой вероятностный эксперимент – знаете, подбрасывание монетки – и проверить то, чему вы нас учили. Но у меня ничего не вышло.

Профессор: Что ж, я рад, что вы проявили интерес. Что же вы сделали?

Студент: Я подбросил монетку 1000 раз. Помните, вы говорили, что вероятность того, что выпадет «орел», – одна вторая? Я подсчитал, что если подбросить монетку 1000 раз, то «орел» должен выпасть 500 раз. Но он выпал 513 раз. Почему?

Профессор: Вы забыли о допустимой погрешности. Если подбросить монетку какое-то число раз, допустимая погрешность будет равняться квадратному корню от количества бросков. Для 1000 бросков допустимая погрешность около 30. Так что вы получили совершенно предсказуемый результат.

Студент: О, теперь я понял! Каждый раз, когда я подброшу монетку 1000 раз, «орел» выпадет от 470 до 530 раз. Каждый раз! Здорово, теперь я уверен, что это факт!

Профессор: Нет-нет! Это значит, что «орел», вероятно, выпадет от 470 до 530 раз.

Студент: Вы хотите сказать, что «орел» может выпасть 200 раз? Или 850 раз? Или выпадать все время?

Профессор: Вероятно, нет.

Студент: Может быть, проблема в том, что я сделал недостаточно бросков? Может быть, мне нужно пойти домой и подбросить монетку миллион раз? Может быть, тогда результат будет лучше? Профессор: Вероятно, нет.

Студент: Профессор, пожалуйста, скажите мне что-нибудь, в чем я могу быть уверен. Но вы все время твердите свое «вероятно». Вы можете мне объяснить, что такое вероятность, но без слова «вероятно»?

Профессор: Гм-гм. Я попробую. Это значит, что я буду удивлен, если «орел» выпадет чаще, чем предполагает допустимая погрешность.

Студент: О господи! Вы хотите сказать, что все, что вы рассказывали нам о статистической механике, квантовой механике и математической вероятности, – все это значит лишь то, что вы будете удивлены, если оно не сработает?

Профессор: Э-э-э...

Если я подброшу монетку миллион раз, то, совершенно точно, «орел» миллион раз не выпадет. Я не азартен, но я настолько в этом уверен, что, не задумываясь, поставил бы на это свою жизнь или свою душу. Да что там душу, я поставил бы на это свою зарплату за целый год. Я абсолютно убежден, что законы больших чисел – то есть теория вероятности – сработают и не дадут меня в обиду. На них основана вся наука. Но я не могу этого доказать и на самом деле понятия не имею, почему они работают. Может быть, именно поэтому Эйнштейн говорил, что Бог не играет в кости. Вероятно, все-таки играет.

Время от времени мы слышим утверждения физиков о том, что Эйнштейн не понимал квантовую механику и потому тратил свое время на наивные классические теории. Я очень сильно сомневаюсь, что это правда. Его аргументы против квантовой механики чрезвычайно

---

квантовой теории поля.

<sup>52</sup> Приводимая ниже история цитируется по изданию: Брокман Дж. Во что мы верим, но не можем доказать: Интеллектуалы XXI века о современной науке. – М.: Альпина нон-фикшн, 2011. – С. 137–139. – Примем, перев.

изящны, кульминации они достигли в одной из самых сложных и самой цитируемой во всей физической науке статье<sup>53</sup>. Я считаю, что Эйнштейн был обеспокоен теми же вещами, что и занудный студент-тугодум. Как может окончательная теория реальности касаться чего-то столь маловразумительного, как степень нашего удивления относительно исхода эксперимента?

Я продемонстрировал вам некоторые парадоксальные, почти алогичные вещи, которые квантовая механика вываливает на классически настроенный мозг. Но я предполагаю, что вы не вполне удовлетворены. На самом деле я на это надеюсь. Если вы запутались, так и должно быть. Единственное лекарство, которое от этого помогает, – это доза математического анализа и погружение на несколько месяцев в хороший учебник по квантовой механике. Только очень странный мутант или человек, рожденный в очень необычной семье, может быть естественным образом настроен на понимание квантовой механики. Помните, в итоге даже Эйнштейн не смог ее прогнуть.

## 5

### Планк изобретает улучшенный эталонный масштаб

Однажды в стэнфордском кафетерии я заметил группу студентов с моего подготовительного курса физики, которые что-то изучали за столом. «Друзья, чем занимаетесь?» – спросил я. Ответ меня удивил. Они заучивали до последней цифры таблицу постоянных, приведенную на обложке учебника<sup>54</sup>. Таблица наряду с двумя десятками других включала следующие постоянные:

$h$  (постоянная Планка) =  $6,626068 \times 10^{-34}$  м<sup>2</sup>кг/с

Число Авогадро =  $6,0221415 \times 10^{23}$

Заряд электрона =  $1,60217646 \times 10^{-19}$  кулона  $c$  (скорость света) = 299 792 458 м/с

Диаметр протона =  $1,724 \times 10^{-15}$  м

$G$  (гравитационная постоянная) =  $6,6742 \times 10^{-11}$  м<sup>3</sup>с<sup>-2</sup>кг<sup>-1</sup>

На других научных предметах абитуриентов натаскивают запоминать огромное количество информации. Они хорошо усваивают физику, но часто пытаются учить ее тем же способом, которым учат психологию. Правда состоит в том, что физика весьма незначительно нагружает память. Я не уверен, что многие физики сумеют назвать большинство из этих постоянных даже по порядку величины.

Отсюда возникает интересный вопрос: почему численные значения этих постоянных столь неуклюжие? Почему бы им не быть простыми числами вроде 2, 5 или даже 1? Почему они все время оказываются то слишком маленькими (постоянная Планка, заряд электрона), то слишком большими (число Авогадро, скорость света)?

С физикой ответ связан слабо, гораздо больше – с биологией. Возьмем число Авогадро. Оно выражает число молекул, содержащихся в определенном количестве газа. Каком количестве? В таком, с которым было удобно работать химикам начала девятнадцатого века; иными словами, это количество, которое помещается в колбе или другом сосуде, более или менее сопоставимом с человеком по размерам. Фактическое значение числа Авогадро больше связано с числом молекул в теле человека, чем с глубокими физическими принципами<sup>55</sup>.

---

53 A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen. «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?» Physical Review 47 (1935): 777-80. (Русский перевод: Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. Можно ли считать квантово-механическое описание реальности полным? // Эйнштейн А. Собрание научных трудов: В 4 т. Т. III. – М.: Наука, 1966. – С. 604. – Примеч. перев)

54 Все константы приведены к стандартной системе единиц Си, на основе метра (м), килограмма (кг) и секунды (с).

55 Хорошо, тогда почему люди состоят из такого большого числа молекул? Опять это больше связано с природой разумной жизни, а не с фундаментальной физикой. Нужно очень много молекул для построения

Ещё один пример – диаметр протона. Почему он так мал? И вновь ключ к ответу в человеческой психологии. Численное значение в таблице выражено в метрах, но что такое метр? Это принятый в метрической системе единиц аналог английского ярда, который связан с расстоянием от носа до кончика пальца вытянутой руки. Очень вероятно, что это удобная единица для измерения ткани или веревки. Малость протона говорит лишь о том, что нужно очень много протонов, чтобы составить человеческую руку. С точки зрения фундаментальной физики в этом числе нет ничего особенного.

Так почему бы нам не изменить единицы, чтобы эти числа стало проще запоминать? На практике часто так и делается. Например, в астрономии, где для измерения длины используется световой год. (Ненавижу, когда световой год ошибочно используют в качестве единицы времени: «Эгей! Целый световой год прошел, как мы с тобой не виделись!») Скорость света не так велика, если выразить ее в световых годах в секунду. На самом деле она очень мала – всего около  $3 \times 10^{-8}$ . Но что, если также заменить единицу времени и вместо секунды взять год? Поскольку свет тратит ровно один год на то, чтобы пройти один световой год, скорость света составит один световой год в год.

Скорость света – одна из фундаментальных величин в физике, так что есть смысл использовать такие единицы, в которых она равна единице. Но вот, скажем, радиус протона – вещь не особо фундаментальная. Протоны – сложные объекты, состоящие из кварков и других частиц, так зачем предоставлять им почетное первое место? Гораздо осмысленнее выбрать константы, которые управляют глубочайшими и самыми универсальными законами физики. Нет больших разногласий, какие именно это законы.

- ♦ Максимальная скорость *любого* объекта во Вселенной равна скорости света  $c$ . Этот предел скорости – закон не только для света, но для *всего* в природе.

- ♦ *Все* объекты во Вселенной притягивают друг друга с силой, пропорциональной произведению их масс и гравитационной постоянной  $G$ . «*Все* объекты» означает *все* объекты без исключения.

- ♦ Для *любого* объекта во Вселенной произведение его массы на неопределенности положения и скорости никогда не бывает меньше постоянной Планка  $\hbar$ .

Курсив здесь подчеркивает всеобщий характер данных законов. Они применимы ко *всем* объектам вместе и к *каждому* в отдельности – ко *всему сущему*. Эти три закона природы действительно заслуживают того, чтобы их называли универсальными, – в куда большей мере, чем законы ядерной физики или свойства конкретных частиц вроде протона. Это может казаться тривиальным, но одно из самых глубоких озарений относительно структуры физики снизошло на Макса Планка, когда в 1900 году он понял, что можно так выбрать единицы длины, массы и времени, что сделать все три фундаментальные постоянные –  $c$ ,  $G$  и  $\hbar$  – равными единице.

Фундаментальный масштаб – это планковская единица длины. Она намного меньше метра и даже диаметра протона. В действительности она примерно в сто миллиардов миллиардов раз меньше протона (в метрах это примерно  $10^{-35}$ ). Даже если протон увеличить до размеров Солнечной системы, планковская длина будет не больше вируса. Нетленная заслуга Планка в том, что он догадался: этот невозможно крошечный размер должен играть фундаментальную роль в любой окончательной теории физического мира. Планк не знал, что это будет за роль, но он понял, что наименьшие строительные блоки материи будут «планковского размера».

Единица времени, которая потребовалась Планку, чтобы сделать  $c$ ,  $G$  и  $\hbar$  равными единице, тоже оказалась чрезвычайно малой, а именно  $10^{-42}$  секунды, – время, которое требуется свету, чтобы пройти одну планковскую длину.

Наконец, существует планковская единица массы. Учитывая, что планковская длина и планковское время столь невероятно малы (в обыденных, биоориентированных единицах), было бы естественно ожидать, что планковская единица массы окажется много меньше массы любого обычного объекта. Но тут-то вы и ошибетесь. Оказывается, самая

фундаментальная единица массы в физике не так уж страшно мала по биологическим меркам и составляет массу примерно десяти миллионов бактерий. Это примерно равно массе мельчайшего объекта, еще различимого невооруженным глазом, пылинки например.

Эти единицы – планковские длина, время и масса – имеют экстраординарное значение: это размер, время полураспада и масса самой маленькой возможной черной дыры. В следующих главах мы еще вернемся к этому вопросу.

$$E = mc^2$$

Возьмем сосуд, наполним его кубиками льда, крепко запечатаем и взвесим на кухонных весах. Теперь поставим его на горелку и расплавим лед, превратив его в горячую воду. Взвесим снова. Если вы сделаете это достаточно тщательно, добившись, чтобы в сосуд ничего не попадало извне и из него ничего не выходило наружу, то конечный вес окажется равным исходному, вплоть до очень высокой точности взвешивания. Но если бы вы могли измерять вес с погрешностью не больше одной триллионной, то заметили бы различие; горячая вода весила бы немного больше, чем лед. Иначе говоря, нагревание добавляет к весу несколько триллионных долей килограмма.

Что происходит? Ну, просто тепло – это энергия. Но согласно Эйнштейну, энергия – это масса, так что добавление тепла к содержимому сосуда увеличивает его массу. Знаменитое уравнение Эйнштейна  $E = mc^2$  выражает тот факт, что масса и энергия – это одна и та же вещь, измеренная в разных единицах. В сущности, это подобно переводу миль в километры; расстояние в километрах – это расстояние в милях, помноженное на 1,61. В случае массы и энергии переводной коэффициент равен квадрату скорости света.

Стандартная физическая единица для энергии – джоуль. Сто джоулей – это энергия, требуемая для работы 100-ваттной лампочки в течение одной секунды. Один джоуль – это кинетическая энергия двухкилограммового груза, движущегося со скоростью один метр в секунду. Пища ежедневно дает вам около 10 миллионов джоулей энергии. В то же время стандартная международная единица массы – килограмм – равна массе литра воды.

Формула  $E = mc^2$  говорит нам, что масса и энергия – это взаимозаменяемые понятия. Если удастся уничтожить немного массы, она превратится в энергию, часто в форме тепла, хотя и не обязательно. Представьте, что килограмм массы исчез и заменен теплом. Чтобы понять, сколько получится тепла, умножьте один килограмм на очень большое число  $c^2$ . Результатом будет около  $10^{17}$  джоулей. На таком запасе вы сможете прожить 30 миллионов лет или создать очень мощную ядерную боеголовку. К счастью, преобразовать массу в другие формы энергии очень трудно, но Манхэттенский проект<sup>56</sup> доказал, что это возможно.

Для физиков понятия массы и энергии стали настолько близкими, что мы редко вообще их различаем. Например, массу электрона часто выражают определенным числом *электронвольт* – единиц энергии, применяемых в атомной физике.

Выяснив это, вернемся к планковской массе – массе пылинки, – которую также можно назвать планковской энергией. Представим, что эта пылинка благодаря некоему открытию превратилась в тепловую энергию. По величине она была бы примерно равна полному баку бензина. Вы могли бы пересечь Соединенные Штаты, затратив десять планковских масс.

Невообразимая малость объектов планковского масштаба и невероятная сложность их непосредственного наблюдения служат источником глубокой печали для теоретиков. Даже сам факт, что мы просто способны поставить эти вопросы, уже есть триумф человеческого воображения. Но именно в этом далеком мире нам следует искать ключ к парадоксам черных дыр: из-за планковского размера *битов информации*, которые плотными «обоями» покрывают горизонт черной дыры. В действительности горизонт имеет самую высокую плотность информации, которая только допускается законами природы. Далее мы разберемся, каков смысл термина «информация» и тесно связанной с ним концепции

---

<sup>56</sup> Так называлась разработка атомной бомбы в Лос-Аламосе, штат Нью-Мексико, во время Второй мировой войны.

энтропии. И тогда мы будем готовы к тому, чтобы понять, за что велась Битва при черной дыре. Но сначала я хочу объяснить, почему квантовая механика подрывает один из самых надежных выводов общей теории относительности – вечное существование черных дыр.

## 6

### В бродвейском баре

Самая первая моя беседа с Ричардом Фейнманом состоялась в кафе «Уэст Энд» на Бродвее в Верхнем Манхэттене. Шел 1972 год. Я был относительно малоизвестным тридцатидвухлетним физиком; Фейнману было пятьдесят три. Хотя стареющий лев уже перевалил через пик своей силы, он все еще внушал трепет. Фейнман приехал в Колумбийский университет прочитать лекцию о своей новой партонной теории. *Партон*<sup>57</sup> – это фейнмановский термин для гипотетических составляющих (частей) субъядерных частиц – протонов, нейтронов и мезонов. Сегодня мы называем их кварками и глюонами.

В то время Нью-Йорк был крупным центром физики высоких энергий. И средоточием этой деятельности был физический факультет Колумбийского университета. Физика здесь имеет замечательную и славную историю. И. А. Раби, пионер американской физики, основал в Колумбийском университете один из самых престижных в мире физических институтов, но к 1972 году его репутация слегка потускнела. Программа по теоретической физике в Белферской высшей научной школе при Университете Вшива, где я преподавал, была ничуть не хуже, но Коламбия есть Коламбия, и Белфер был далеко не так знаменит.

Лекции Фейнмана ждали с огромным нетерпением. Он занимал совершенно особое место в сердцах и умах физиков. Не только как один из величайших теоретиков всех времен, но и как подлинный кумир для каждого. Актер, шутник, барабанщик, хулиган, иконоборец, гигант интеллекта – он все делал простым и ясным. Все остальные часами просиживали со сложнейшими вычислениями, чтобы найти ответ на физическую задачу, а Фейнман за двадцать секунд объяснял ее так, что ответ становился очевиден.

Эго у Фейнмана было зверским, но рядом с ним было очень весело. Несколько лет спустя мы стали хорошими друзьями, но в 1972 году он был звездой, и я – вроде фаната, поджидающего у служебного выхода, – Джонни из захолустья к северу от 181-й улицы. Я приехал в Коламбию на метро за два часа до лекции, надеясь обменяться несколькими словами с великим человеком.

Факультет теоретической физики размещался на девятом этаже Пупин-Холла<sup>58</sup>. Я считал, что Фейнман должен где-то там тусоваться. Первым я увидел гуру колумбийских физиков Ли Чжэндао<sup>59</sup>. Я спросил его, нет ли поблизости профессора Фейнмана. «Что вам от него нужно?» – дружелюбно ответил Ли. «Ну, я бы хотел задать ему пару вопросов о партонах». – «Он занят». – Конец разговора.

На этом бы и закончилась история, если бы не зов природы. Зайдя в туалет, я увидел Дика, стоящего напротив писсуара. Встав рядом, я спросил: «Профессор Фейнман, могу ли я задать вам вопрос?» – «Да, но позвольте я закончу то, чем занимаюсь, и тогда мы пройдем в кабинет, который мне предоставили. А что за вопрос?» И вот прямо здесь и сейчас я решил, что у меня нет вопросов о партонах, но я могу кое-что придумать по поводу черных дыр. Термин «черная дыра» был предложен Джоном Уилером четырем годами раньше. Уилер был научным руководителем фейнмановской диссертации, но Фейнман сказал мне, что почти ничего не знает о черных дырах. То немного, что знал я, было почерпнуто у моего друга Дэвида Финкелптейна, одного из пионеров физики черных дыр. В 1958 году Дэйв

57 От англ. part – часть. – Примеч. перев.

58 Здание физического и астрономического факультетов Колумбийского университета, построенное в 1925–1927 годах и названное позднее в честь сербско-американского физика Михайло Идворски Пупина (1858–1935), выпускника университета и одного из основателей Национального совета по аэронавтике (НАСА), который позднее был преобразован в NASA. – Примеч. перев.

59 Ли Чжэндао (Tsung-Dao Lee), р. 1926 – китайский и американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1957 года за исследование сохранения четности у элементарных частиц.

написал важную статью, в которой объяснял, что горизонт черной дыры является точкой невозврата. А еще я знал, что в центре черной дыры находится сингулярность, которую окружает горизонт.

Дэйв также объяснил мне, почему ничто не может выйти из-под горизонта. Последнее, что я знал, хотя сейчас не могу вспомнить откуда, было то, что, однажды образовавшись, черная дыра не может распасться или исчезнуть. Две или несколько черных дыр могут слиться, образовав более крупную черную дыру, но ничто и никогда не заставит ее разделиться на две или более черных дыры. Другими словами, если уж черная дыра сформировалась, от нее больше не избавиться.

Примерно в то же время молодой Стивен Хокинг занимался революционным преобразованием классической теории черных дыр. Среди его важнейших открытий был тот факт, что площадь горизонта черной дыры никогда не уменьшается. Стивен с сотрудниками Джеймсом Бардиным и Брэндоном Картером использовали общую теорию относительности для вывода набора законов, управляющих поведением черных дыр. Новые законы имели необъяснимое сходство с законами термодинамики (управляющими теплом), хотя подобие и считалось простым совпадением. Закон необывания площади был аналогичен второму началу термодинамики, которое утверждает, что энтропия системы никогда не убывает. Сомневаюсь, чтобы я знал об этой работе или вообще слышал имя Стивена Хокинга ко времени той лекции Фейнмана, однако хокинговским законам динамики черных дыр предстояло оказывать глубочайшее влияние на мои исследования в течение более чем 20 лет.

Как бы то ни было, вопрос, который я хотел поставить перед Фейнманом, был о том, может ли квантовая механика заставить черную дыру распасться на черные дыры меньшего размера. Это представлялось мне чем-то вроде фрагментации очень большого атомного ядра на ядра меньшей величины. Я торопливо объяснил Фейнману, почему я думаю, что это должно происходить.

Фейнман сказал, что никогда не думал над этим. И более того, ему не нравится сам предмет квантовой гравитации. Эффекты квантовой механики в гравитации и гравитации в квантовой механике оказывались слишком малыми для измерения. Не то чтобы он считал этот предмет внутренне неинтересным, но без каких-либо измеримых эффектов, направляющих теорию, было безнадежно гадать, как она реально работает. Он сказал, что думал об этом много лет назад и не хотел бы задумываться об этом вновь. Он предположил, что может пройти лет пятьсот, прежде чем удастся понять квантовую гравитацию. В любом случае, через час ему предстоит читать лекцию и ему надо отдохнуть.

Лекция была чисто фейнмановская. Своим присутствием он заполнял всю сцену – темпераментный актер с бруклинским акцентом и жестикуляцией, иллюстрирующей каждое утверждение. Аудитория замороженно застыла. Он показывал, как можно просто и интуитивно мыслить о сложных задачах квантовой теории поля. Почти все остальные использовали другие, старые методы анализа задач, к которым он обращался. Эти старые методы были сложными, но он нашел упрощающие приемы – партонные приемы. Фейнман взмахивал своей волшебной палочкой, и все вопросы внезапно снимались. Причем самое забавное, что старые методы основывались на его же фейнмановских диаграммах!

Но лучшей частью лекции был момент, когда Ли Чжэндао прервал ее вопросом, или, правильнее сказать, сделал утверждение, замаскированное под вопрос. Фейнман говорил, что некоторые типы диаграмм никогда не встречаются в его новом методе и это все упрощает. Они назывались Z-диаграммами. Ли спросил: «Не правда ли, в некоторых теориях с векторными и спинорными полями Z-диаграммы не всегда дают ноль? Но я надеюсь, что это, вероятно, можно исправить». В зале стало тихо, как в склепе. Фейнман посмотрел на гуру секунд пять, а затем сказал: «Исправьте!» И продолжил лекцию.

После лекции Фейнман подошел ко мне и спросил: «Л как ваше имя?» Он сказал, что подумал над моим вопросом и хотел бы о нем поговорить, и не знаю ли я место, где можно было бы встретиться вечером. Так мы оказались в кафе «Уэст Энд».

Мы еще вернемся в кафе, но прежде я должен еще кое-что рассказать вам о гравитации

и квантовой механике.

Вопрос, который я хотел обсудить, относился к влиянию квантовой механики на черные дыры. Общая теория относительности – это классическая теория гравитации. Когда физик использует слово «классический», он не подразумевает, что это связано с Древней Грецией. Это лишь означает, что теория не учитывает эффекты квантовой механики. В том, как квантовая теория влияет на гравитационное поле, очень много непонятного, но то немногое, что известно, связано с небольшими возмущениями, которые распространяются сквозь пространство в виде *гравитационных волн*. Фейнману мы обязаны большей частью того, что знаем относительно квантовой теории этих возмущений.

В главе 4 мы узнали, что Бог, по-видимому, проигнорировал мнение Эйнштейна относительно игры в кости. Суть в том, что вещи, четко определенные в классической физике, в квантовой становятся неопределенными. Квантовая механика никогда не говорит нам, что случится; она дает нам вероятности того, что случится это или то. Когда именно распадется радиоактивный атом, непредсказуемо, но квантовая механика может сказать нам, что он, вероятно, распадется в ближайшие десять секунд.

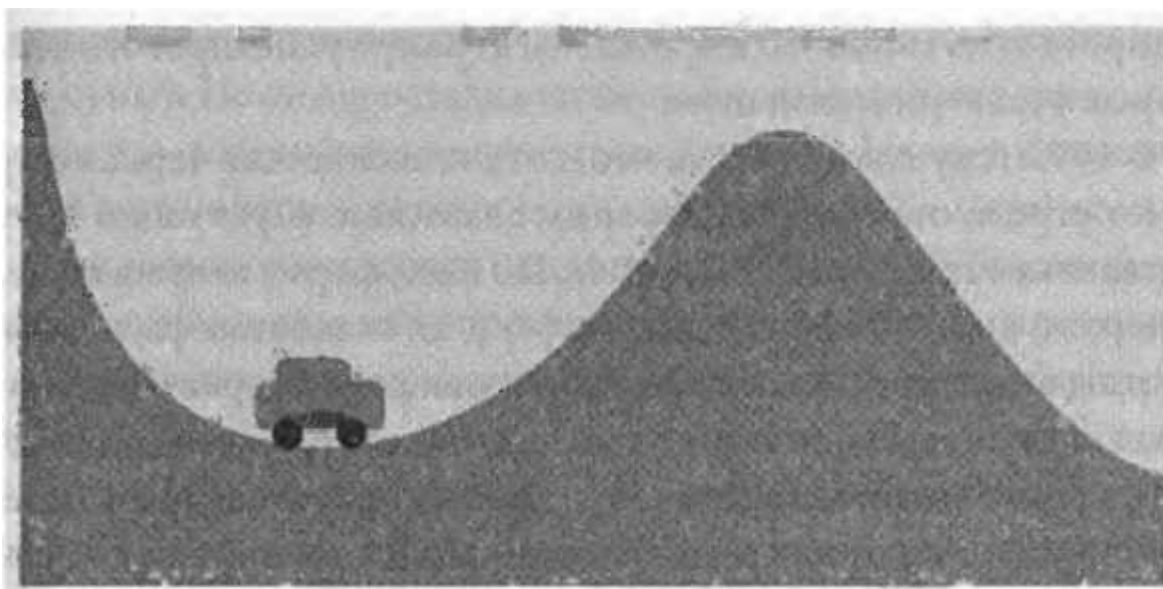
Нобелевский лауреат по физике Мюррей Гелл-Манн позаимствовал лозунг из книги «Король былого и грядущего» Т. Уайта<sup>60</sup>: «Все, что не запрещено, – обязательно». В частности, в классической физике множество событий просто не могут случиться. В большинстве случаев, однако, эти события возможны в квантовой теории. Вместо того чтобы быть невозможными, эти события просто крайне маловероятны. Но, несмотря на их невероятность, если подождать достаточно долго, они в конце концов произойдут. Так что все незапрещенное обязательно.

Хорошим примером этого служит явление, называемое *туннелированием*. Представьте себе автомобиль, припаркованный на холме со впадиной на нем.

Пренебрежем всем, что не относится к делу, вроде трения или сопротивления воздуха. Предположим также, что водитель забыл поставить машину на ручной тормоз, так что она может свободно катиться. Ясно, что, если автомобиль стоит внизу впадины, он сам собой не начнет двигаться. Смещение в любую сторону приведет к подъему по склону, и если автомобиль изначально покоился, у него не будет энергии, чтобы двигаться вверх. Если позднее мы обнаружим этот автомобиль скатывающимся с холма за возвышением, следует предположить, что либо кто-то вытолкнул его, либо он получил откуда-то энергию, чтобы тем или иным способом перевалить через бугор. Спонтанное перепрыгивание через возвышенность в классической механике невозможно.

---

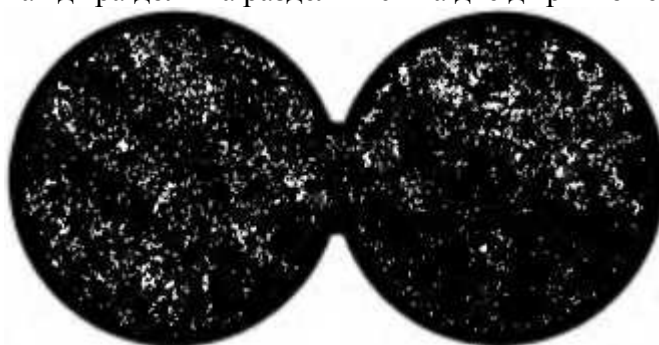
<sup>60</sup> Тетралогия «Король былого и грядущего» английского писателя Теренса Хэнбери Уайта (1906–1964) – это воссозданная на основе британских легенд авторская интерпретация истории короля Артура, его учителя, волшебника Мерлина, рыцарей круглого стола. – Примем, перев.



Но помните: все, что не запрещено, — обязательно. Если бы автомобиль был квантово-механическим (а таковы на самом деле все автомобили), ничто не мешало бы ему внезапно появиться с другой стороны бугра. Это может быть крайне маловероятно, — для большого тяжелого объекта вроде автомобиля это очень, *очень* маловероятно, — но это не невозможно. Так что за достаточно большое время это обязательно случится. Если подождать достаточно долго, то мы обнаружим автомобиль скатывающимся вниз с другой стороны от возвышения. Это явление называется туннелированием, поскольку оно выглядит так, будто автомобиль прошел по туннелю под бугром.

Для столь массивного объекта, как автомобиль, вероятность туннелирования так мала, что потребуется невообразимое время (в среднем), чтобы он спонтанно оказался с другой стороны пригорка. Для записи числа, достаточно большого, чтобы выразить это время, потребуется так много цифр, что даже если каждая из них будет не больше протона, они, при плотной упаковке, с большим Избытком заполнят всю Вселенную. Однако тот же самый эффект Может позволить альфа-частице (два протона и два нейтрона) туннелировать из атомного ядра или электрону туннелировать через разрыв в электрической цепи.

В 1972 году я воображал, что, хотя классическая черная дыра имеет строго определенную форму, квантовые флуктуации могут заставить ее горизонт подрагивать. По идее, форма невращающейся черной дыры — это идеальная сфера, но квантовые флуктуации должны быть способны на короткое время деформировать ее, придавая сплюснутый или вытянутый вид. Более того, иногда флуктуации могут быть столь велики, что черная дыра почти превращается в пару сфер меньшего размера, соединенных тонкой перемычкой. Из этого состояния ей легко разделиться. Тяжелые атомные ядра спонтанно распадаются подобным образом, почему бы такому не случиться с черной дырой? В классике этого не может случиться, так же как автомобиль не может спонтанно перепрыгнуть через барьер. Но запрещено ли это абсолютно? Я не видел тому никаких причин. Подождите достаточно долго, рассуждал я, и черная дыра должна разделиться на две дыры поменьше.





### *Мое представление о распаде черной дыры*

Теперь вернемся в кафе «Уэст Энд». Заказав пиво, я ждал Фейнмана около получаса. Чем больше я думал, тем осмысленнее все это мне казалось. Черная дыра может распасться путем квантового туннелирования сначала на две части, затем на четыре, восемь и, в конце концов, на огромное число микроскопических частей. В свете квантовой механики было бессмысленно верить в вечность черных дыр.

Фейнман вошел в кафе за одну-две минуты до срока и подошел к моему столику. Я чувствовал себя хозяином и заказал два пива.

Прежде чем я успел заплатить, он достал бумажник и положил нужную сумму. Не знаю, оставил ли он чаевые. Потягивая пиво, я заметил, что стакан Фейнмана не касается стола. Начав с изложения своих аргументов, я закончил, сказав, что черные дыры должны в конце концов распадаться на крошечные куски. Чем бы они могли быть? Хотя это осталось произнесенным, единственным разумным ответом были элементарные частицы, такие как фотоны, электроны и позитроны.

Фейнман согласился, что нет никаких препятствий к тому, чтобы такое происходило, но он считает, что я нарисовал ошибочную картину. Первое деление черной дыры я представил как распад на два более или менее равных фрагмента. Каждый из них снова делился пополам, пока фрагменты не становились микроскопическими.

Проблема в том, что для разделения на части большой черной дыры потребовалась бы гигантская квантовая флуктуация. Фейнман чувствовал, что более правдоподобной была картина, в которой горизонт делится на часть, почти равную исходному горизонту, и вторую микроскопическую часть, которая улетает прочь. По мере повторения этого процесса черная дыра будет постепенно уменьшаться, пока от нее ничего не останется. Это звучало убедительно. Откалывание крошечного кусочка горизонта кажется намного более вероятным, чем распад черной дыры на два крупных фрагмента.



### *Фейнмановское представление о распаде черной дыры*

Беседа продолжалась около часа. Я не помню ни как мы попрощались, ни был ли какой-то план развивать эту идею. Я встретил льва, и он меня не разочаровал.

Поразмыслив мы больше над этой задачей, то могли бы понять, что гравитация, скорее всего, притянет крошечные фрагменты обратно к горизонту. Некоторые выброшенные фрагменты могут сталкиваться с падающими. Область непосредственно над горизонтом окажется сложной мешаниной сталкивающихся фрагментов, нагревающейся за счет повторяющихся столкновений. Мы могли бы даже догадаться, что область над самым горизонтом будет кишеть массивными частицами, образующими горячую атмосферу. И можно было бы додуматься, что эта горячая масса будет вести себя как любой разогретый объект, то есть рассеивать энергию в виде теплового излучения. Но мы этого не сделали. Фейнман вернулся к своим партонам, а я – к вопросу о том, что удерживает кварки внутри протонов.

Теперь пришло время рассказать, что же в точности означает термин «информация».

Информация, энтропия и энергия – эти три неразделимые концепции будут предметом следующей главы.

## 7

### Энергия и энтропия

#### Энергия

Энергия – это оборотень. Подобно мифическим созданиям, способным превращаться из человека в животное, растение, камень, энергия тоже может менять свою форму. Кинетическая, потенциальная, химическая, электрическая, ядерная и тепловая – это лишь некоторые из множества форм, которые может принимать энергия. Она постоянно переходит из одной формы в другую, но одно неизменно: энергия сохраняется; полная сумма по всем формам энергии никогда не меняется.

Вот некоторые примеры ее превращений.

♦ Сизиф стоит в низшей энергетической точке. Прежде чем в бессчетный раз толкать свой камень вверх по склону, он останавливается отдохнуть и подкрепиться медом. Достигнув же вершины, приговоренный богами царь наблюдает, как камень под действием гравитации в бессчетный плюс один раз катится вниз. Бедный Сизиф обречен вечно превращать химическую энергию (мед) в потенциальную энергию, а затем в кинетическую энергию. Но подождите, а что происходит с кинетической энергией камня, когда тот скатился и остановился у подножия холма? Она превратилась в тепло. Часть тепла ушла в атмосферу, часть – в землю. Даже Сизиф согрелся от усилий. Сизифов цикл преобразования энергии:

химическая → потенциальная → кинетическая → тепловая.

♦ Вода падает с Ниагарского водопада и набирает скорость. Поток, насыщенный кинетической энергией, попадает в водозабор турбины, где вращает ротор. Вырабатывается электричество и по проводам поступает в сеть. Какова схема трансформации энергии? Вот она:

потенциальная → кинетическая → электрическая.

Вдобавок часть энергии бесполезно превращается в тепло: выходящая из турбины вода теплее входящей.

♦ Эйнштейн провозгласил, что масса – это энергия. Утверждая, что  $E = mc^2$ , Эйнштейн имел в виду, что каждый предмет содержит скрытую энергию, которую можно извлечь, если каким-то образом изменить его массу. Например, ядро урана спонтанно распадается на ядро тория и ядро гелия. Торий и гелий вместе имеют чуть меньшую массу, чем исходный уран. Этот небольшой избыток массы превращается в кинетическую энергию ядер тория и гелия, а также в несколько фотонов. Когда атомы замедляются, а фотоны поглощаются, избыток энергии становится теплом.

Из всех обычных форм энергии тепло – самая загадочная. Что это? Это субстанция, подобная воде, или что-то более эфемерное? До появления современной молекулярной теории теплоты физики и химики считали ее субстанцией, ведущей себя подобно жидкости. Они называли ее *флогистоном* и представляли, что она перетекает от горячих объектов к холодным, охлаждая тем самым горячие и нагревая холодные. Поэтому мы до сих пор говорим о потоках тепла.

Но тепло – не субстанция, это форма энергии. Сожмитесь до размера молекулы и осмотритесь кругом в ванне, наполненной горячей водой. Вы увидите молекулы, беспорядочно движущиеся и сталкивающиеся в непрерывающемся хаотическом танце. Подождите, пока вода остынет, и осмотритесь снова: молекулы стали двигаться медленнее. Охладите их до точки замерзания, и молекулы соединятся в кристалл твердого льда. Но даже в нем молекулы продолжают колебаться. Они прекращают движение (если не считать

квантовых нулевых колебаний) только тогда, когда будет отведена вся энергия. Дальше этой точки абсолютного нуля – минус 273,15 градуса Цельсия – температура воды понижаться не может. Каждая молекула жестко зафиксирована на своем месте в идеальной кристаллической решетке, все бестолковые хаотические движения прекратились.

Принцип сохранения энергии при ее превращениях между теплом и другими формами называется *первым началом термодинамики*.

## Энтропия

Вряд ли можно назвать удачной идею припарковать свой BMW в дождевом лесу на пятьсот лет. Вернувшись, вы обнаружите лишь кучу ржавчины. Это и есть рост энтропии. Если оставить кучу ржавчины еще на пятьсот лет, вы можете быть совершенно уверены, что она не превратится снова в работающий BMW. Если кратко, то *второе начало термодинамики* говорит: энтропия возрастает. Об энтропии говорят все – поэты, философы, компьютерщики, – но что же это такое? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим более внимательно разницу между BMW и кучей ржавчины. То и другое состоит примерно из  $10^{28}$  атомов, в основном железа (а в случае ржавчины еще и кислорода). Представим, что вы берете эти атомы и случайно их перемешиваете. Каковы шансы, что они соединятся в форме работающего автомобиля? Нужно немало труда, чтобы рассчитать, насколько именно это невероятно, но, я думаю, все согласятся, что вероятность подобного очень низка. Очевидно, будет гораздо вероятнее получить кучу ржавчины, чем новенькую машину. Или даже старую и ржавую. Если разделить атомы, а потом смешивать их снова, и снова, и снова, вы в конце концов получите автомобиль, но прежде получится куда больше ржавых куч. Почему? Что такого особенного в автомобиле? Или в куче ржавчины?

Если представить себе все возможные способы, которыми можно собрать атомы, то подавляющее большинство вариантов будут выглядеть как ржавые кучи. И гораздо меньшее число будет напоминать автомобиль. И даже среди последних, заглянув внутрь, вы, скорее всего, обнаружите ржавую кучу. Работающий автомобиль получится в исчезающе малом числе вариантов. Энтропия автомобиля и энтропия ржавой кучи как-то связаны с числом вариантов, которые будут восприниматься как автомобиль и как ржавая куча соответственно. Если перемешать атомы автомобиля, вы с гораздо большей вероятностью получите кучу ржавчины, потому что такая куча реализуется намного большим числом вариантов, чем автомобиль.

А вот другой пример. Обезьяна, стучащая по клавишам пишущей машинки, будет почти всегда печатать абракадабру. Очень редко ей удастся построить грамматически правильное предложение вроде такого: «Я хочу рассудить мою гипотенузу с помощью точки с запятой». Еще реже у нее будет получаться осмысленная фраза вроде: «У короля Кнуда<sup>61</sup> была бородавка на подбородке». А еще, если взять буквы осмысленного предложения, перемешать их и выложить друг за другом, как в игре «Эрудит», результат почти наверняка окажется абракадаброй. Причина? Существует гораздо больше бессмысленных последовательностей из двадцати или тридцати букв, чем тех, которые имеют смысл.

Английский алфавит содержит двадцать шесть букв, но есть и более простые системы письменности. Азбука Морзе – очень простая система, использующая всего два символа: точку и тире. Строго говоря, в ней три символа – точка, тире и пробел, – но всегда можно заменить пробел специальной последовательностью точек и тире, которая в других случаях вряд ли встретится. Если игнорировать пробелы, на описание короля Кнуда и его бородавки азбукой Морзе уходит в целом 110 знаков<sup>62</sup>:

Сколько различных сообщений азбукой Морзе можно составить из 110 точек и/или

---

<sup>61</sup> Кнуд Великий – король Англии, Дании и Норвегии в первой половине XI века. – *Примеч. черев.*

<sup>62</sup> Примеры русифицированы, в частности использована русская версия азбуки Морзе. Численные оценки соответственно скорректированы. – *Примеч. черев.*

тире? Всё, что нужно, – это перемножить 110 двоек и получить  $2^{110}$ , что составляет примерно миллион миллиардов миллиардов миллиардов.

Когда информация кодируется с помощью двух символов – это могут быть точки и тире, единицы и нули или любые другие пары, – такие символы называются *битами*. Таким образом, в кодировке Морзе фраза «У короля Кнуда была бородавка на подбородке» представляет собой 110-битное сообщение. Если вы собираетесь читать эту книгу дальше, то было бы неплохо запомнить определение технического термина *бит*. Его значение отличается от того, что использовано во фразе: «За это он не раз бывал бит». Бит – это отдельная минимальная единица информации, подобно точкам или тире в азбуке Морзе.

Зачем нам эти трудности с переводом информации в точки и тире, нули и единицы? Почему не использовать последовательность 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, а еще лучше буквы алфавита? Сообщения было бы проще читать, и они занимали бы гораздо меньше места.

Суть в том, что буквы алфавита (как и десять обычных цифр) – это человеческое изобретение, которые мы обучаемся распознавать и хранить в памяти. Но каждая буква или цифра несет сразу много информации за счет весьма тонкой разницы между буквами А и Б или цифрами 5 и 8. Телеграфисты и компьютерщики, которые полагаются только на простейшие математические правила, предпочитают – на самом деле они просто вынуждены – использовать *двоичный код* из точек и тире или нулей и единиц. Между прочим, когда Карл Саган разрабатывал систему для отправки сообщений негуманоидным цивилизациям, живущим в далеких планетных системах, он использовал двоичный код.

Вернемся к королю Кнуду. Сколько из 110-битных сообщений будут *связными*? На самом деле я не знаю, возможно, несколько миллиардов. Но все равно это – чрезвычайно малая доля от  $2^{110}$ . Так что почти наверняка если вы возьмете 110 битов или 37 букв фразы «У короля Кнуда была бородавка на подбородке» и перемешаете их, результатом будет абракадабра. Вот что я получил, когда проделал это с фишками «Эрудита» (выкинув пробелы):

ОРКЫУРООЛО ДАДВЛБОНБРЕ ДКБКАУАОЯНАОКДПА

Допустим, вы перемешивали буквы совсем недолго. Сообщение лишь слегка утратит связность. «У кроля Кнуда была бородавка а подбородкен». Но постепенно буквы будут превращаться во все менее осмысленную мешанину. Бессмысленных комбинаций так много, что сползание к абракадабре неизбежно.

Теперь я могу дать определение энтропии. *Энтропия – это мера числа вариантов, которые соответствуют некоему конкретному распознаваемому критерию*. Если критерий состоит в наличии 110 битов, тогда число вариантов составляет  $2^{110}$ .

Но энтропия – это не само число вариантов, в данном случае – не  $2^{110}$ . Она равна просто 110–числу раз, сколько надо помножить на себя двойку, чтобы получить количество вариантов. В математике количество перемножений двойки на себя, необходимое для получения определенного числа, называют *логарифмом*<sup>63</sup>. Так, 110 – это логарифм  $2^{110}$ . Энтропия, таким образом, – это логарифм числа вариантов.

Из  $2^{110}$  возможностей лишь очень небольшая доля представляет собой осмысленные фразы. Допустим, что их миллиард. Чтобы получить миллиард, надо возвести двойку в 30-ю степень. Иными словами, миллиард – это около  $2^{30}$ , или, что эквивалентно, логарифм миллиарда равен 30. Отсюда следует, что энтропия осмысленного предложения всего лишь около 30, что намного меньше 110. Бессмысленные цепочки символов, очевидно, имеют

---

63 Строго говоря, это логарифм по основанию 2. Есть и другие определения логарифма. Например, вместо числа двоек можно взять количество десятков, которые надо перемножить, чтобы получить заданное число. Это будет определением логарифма по основанию 10. Нечего и говорить, что десятков для получения заданного числа понадобится меньше, чем двоек. Формальное физическое определение энтропии – это число раз, которое нужно перемножить на себя математическую постоянную  $e$ . Это «экспоненциальное» число примерно равно  $e \approx 2,71828183$ . Иными словами, энтропия – это натуральный логарифм, или логарифм по основанию  $e$ , тогда как число битов (110 в нашем примере) – это логарифм по основанию 2. Натуральный логарифм немного меньше числа битов – примерно с коэффициентом 0,7. Так что для пуристов энтропия 110-битного сообщения равна  $0,7 \times 110$ , что составляет около 77. В этой книге я буду игнорировать разницу между битами и энтропией.

большую энтропию, чем комбинации, составляющие осмысленные фразы. Неудивительно, что энтропия возрастает, когда буквы перемешиваются.

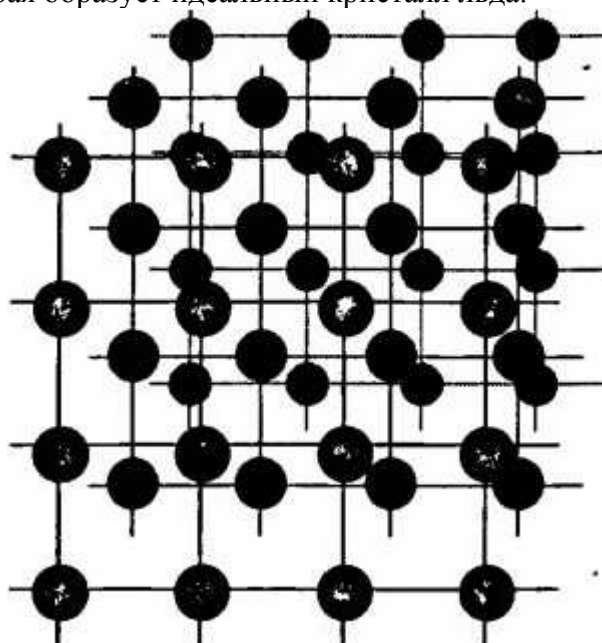
Предположим, компания BMW подняла управление качеством до такого уровня, что все автомобили, сходящие с конвейера, абсолютно идентичны. Иными словами, допустим, что существует одна, и только одна комбинация атомов, которая может считаться истинным BMW. Какова будет ее энтропия? Ответ – ноль. Когда такой BMW сходит с конвейера, в нем не будет никакой неопределенности. Когда задан единственный уникальный вариант, энтропии вообще нет.

Второе начало термодинамики, которое говорит, что энтропия возрастает, это просто утверждение, что с течением времени мы теряем контроль за деталями. Представьте, что мы уронили крохотную каплю черных чернил в ванну с теплой водой. Вначале мы точно знаем, где находятся чернила. Число возможных конфигураций чернил не так велико. Но по мере того как мы следим за диффузией чернил в воде, мы все меньше и меньше знаем о местоположении отдельных молекул чернил. Число вариантов, отвечающих тому, что мы видим, а именно в ванне с однородной, слегка посеревшей водой, становится колоссальным. Можно ждать и ждать, но мы не увидим, как чернила вновь соберутся в концентрированную каплю. Энтропия возрастает. Это второе начало термодинамики. Все стремится к скучной однородности.

Вот еще один пример – ванна, полная горячей воды. Как много мы знаем о воде в ванне? Предположим, что она налита в ванну достаточно давно и все заметные течения прекратились. Можно измерить количество воды в ванне (190 литров) и ее температуру (32 градуса Цельсия). Но ванна заполнена молекулами воды, и, очевидно, очень большое число вариантов размещения молекул соответствует заданным условиям – 190 литров воды при 32 градусах Цельсия. Мы сможем узнать намного больше, только если точно обмерим каждый атом.

Энтропия – это мера того, сколь много информации скрыто в деталях, которые по той или иной причине трудно наблюдать. Таким образом, *энтропия – это скрытая информация*. В большинстве случаев информация бывает скрыта, потому что касается вещей слишком малых, чтобы их увидеть, и слишком многочисленных, чтобы за ними уследить. В случае с водой в ванне это микроскопические подробности, касающиеся молекул воды: положение и движение каждой из миллиардов миллиардов миллиардов молекул воды в ванне.

Что случится с энтропией, если вода охладится до температуры абсолютного нуля? Если отвести от воды всю без исключения энергию, молекулы сами соберутся в уникальную структуру – решетку, которая образует идеальный кристалл льда.



### ***Кристаллическая решетка***

И хотя молекулы слишком малы, чтобы их видеть, если вы знакомы со свойствами кристаллов, то сможете предсказать положение каждой молекулы. Идеальный кристалл, подобно идеальному BMW, вообще не имеет энтропии.

### **Сколько битов можно хранить в библиотеке?**

Неоднозначности и тонкие нюансы в использовании языка часто бывают очень важны. Фактически, если бы слова имели идеально точные значения, которые можно заложить в компьютер, язык и литература сильно обеднели бы. Однако научная точность требует высокой степени лингвистической строгости. Слово «информация» означает много разных вещей: «Я думаю, ваша информация ошибочна». «Для информации: у Марса два спутника». «У меня диплом по теории информации». «Вы можете найти эту информацию в Библиотеке Конгресса». В каждом из этих предложений слово «информация» используется по-своему. Только в последнем примере имеет смысл вопрос: «Где находится информация?»

Давайте поразмыслим над этой идеей локализации. Если я скажу вам, что президент Грант похоронен в мавзолее Гранта, вы не усомнитесь, что я сообщил вам порцию информации. Но где находится эта информация? В вашей голове? В моей голове? Она слишком абстрактна, чтобы иметь местоположение? Она рассредоточена по всей Вселенной для использования везде и всеми?

Вот один из очень четких ответов: информация находится на странице, сохраненная в виде физических букв, состоящих из углерода и других молекул. В этом смысле информация – это конкретный предмет, почти субстанция. Она настолько конкретная, что информация в вашей книге и в моей книге – это разная информация. В вашей книге сообщается, что Грант похоронен в мавзолее Гранта. Вы можете догадываться, что то же самое сказано и в моей книге, но достоверно вам это неизвестно. А вдруг в моей книге сказано, что Грант похоронен в Великой пирамиде в Гизе? На самом деле ни одна книга не содержит этой информации. Информация о том, что Грант похоронен в мавзолее Гранта, находится в мавзолее Гранта.

В том понимании, в каком физики используют это слово, информация состоит из материи<sup>64</sup> и где-то находится. Информация в этой книге – это прямоугольный том, размером 25 сантиметров на 15 сантиметров на 2,5 сантиметра, то есть 25х15х2,5 или примерно 940 кубических сантиметров<sup>65</sup>. Сколько битов информации скрыто между ее обложками? В печатной строке хватает места примерно на 70 символов – букв, знаков пунктуации и пробелов. При 37 строках на странице и 350 страницах это будет почти миллион символов.

Клавиатура моего компьютера содержит около 100 символов, включая буквы верхнего и нижнего регистра, цифры и знаки пунктуации. Это означает, что число различных сообщений, которые могут содержаться в этой книге, – около сотни, перемноженной на себя миллион раз, другими словами – 100 в миллионной степени. Это количество – колоссальное, кстати, число – можно получить, возведя двойку в степень около 7 миллионов. Таким образом, книга содержит примерно 7 миллионов битов информации. Иначе говоря, если бы я писал книгу азбукой Морзе, мне потребовалось бы 7 миллионов точек и тире. Поделив их на объем книги, получаем примерно 7400 битов на кубический сантиметр. Это плотность информации в данной стопке печатных страниц.

Однажды я прочитал, что великая Александрийская библиотека перед тем, как ее сожгли дотла, содержала триллион битов информации. Хотя она и не относилась к официальным семи чудесам света, библиотека была тем не менее одним из величайших сокровищ Античности. Построенная во времена правления Птолемея I, она, говорят,

---

<sup>64</sup> Когда физики используют слово «материя», они имеют в виду не только вещи, состоящие из атомов. Другие элементарные частицы, такие как фотоны, нейтрино и гравитоны, также рассматриваются как материя.

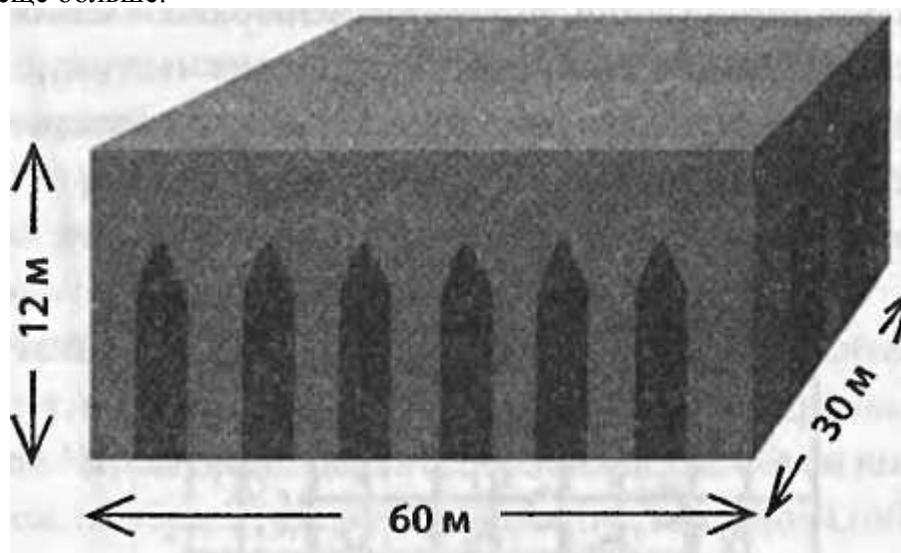
<sup>65</sup> Эти размеры – грубая оценка, основанная на размерах предыдущего английского издания этой книги в твердом переплете. Не сомневаюсь, что фактические размеры этой книги окажутся несколько иными. (Размеры при переводе выражены близкими значениями в метрических единицах, а последующие численные оценки соответственно скорректированы. – Примеч. перев.)

содержала среди полумиллиона пергаментных свитков копию любого когда-либо составленного важного документа. Неизвестно, кто ее сжег, но мы уверены, что дым унес огромное количество бесценной информации. Но сколько именно? Я полагаю, что на древнем свитке помещалось около пятидесяти современных страниц. Если эти страницы были подобны тем, что вы читаете, то свиток содержал около миллиона битов плюс-минус несколько сотен тысяч. В таком случае библиотека Птолемея могла содержать полтриллиона ( $1 \text{ триллион} = 10^{12}$ ) битов – близко к тому, что я читал.

Потеря этой информации – одно из величайших несчастий, с которым приходится мириться сегодня ученым, исследующим Древний мир. Но могло быть и хуже. Что, если каждый уголок, каждый доступный кубометр был заполнен книгами вроде этой? Я не знаю точно, насколько велика была Александрийская библиотека, но, допустим,  $60 \times 30 \times 12$  метров, или около 22 тысяч кубических метров, – размер не самого маленького современного общественного здания. Это 22 миллиарда кубических сантиметров. Зная это, легко оценить, сколько битов могло содержаться в здании. При плотности 7400 битов в кубическом сантиметре получается  $1,6 \times 10^{14}$  битов. Колоссально.

Но зачем привязываться к книгам? Если каждую книгу сжать до одной десятой ее объема, то можно упаковать в 10 раз больше битов.

Перенос содержания на микрофиши позволит хранить еще больше. А если все книги оцифровать, то еще больше.



Есть ли фундаментальный физический предел объема пространства, необходимого для хранения одного бита? Должен ли физический размер реального бита быть больше атома, ядра, кварка? Можно ли бесконечно делить пространство, наполняя его бесконечным количеством информации? Или существует предел – не практический технологический предел, а вытекающий из глубочайших законов природы?

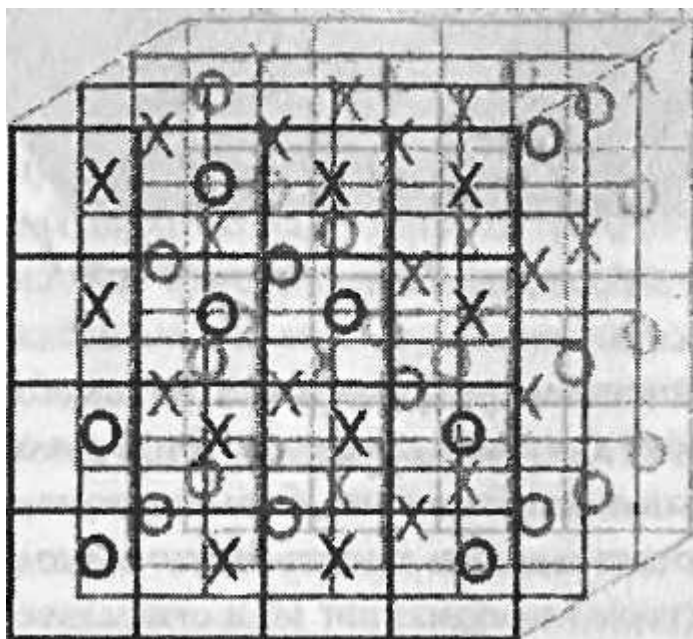
### Наименьший бит

Меньше, чем атом, меньше, чем кварк, меньше даже, чем нейтрино, отдельный бит может быть самым фундаментальным строительным блоком. Без всякой структуры, бит либо есть, либо его нет. Джон Уилер считал, что все материальные предметы состоят из битов информации, и выражал эту идею слоганом: «Суть из бита»<sup>66</sup>.

Джон представлял, что бит, будучи самым фундаментальным объектом, имеет самый маленький возможный размер, равный фундаментальному квантовому размеру, открытому Максом Планком более столетия назад. В первом приближении согласно картине, которую держит в голове большинство физиков, пространство можно разделить на крошечные ячейки

<sup>66</sup> В оригинале: «It from bit». Слово «it», помимо того что является местоимением «оно», имеет в роли существительного значение «квинтэссенция, сущность чего-либо». – Примеч. перев.

планковского размера наподобие трехмерной шахматной доски. В каждой ячейке может храниться бит информации. Бит можно изображать как очень простую частицу. Каждая ячейка либо содержит частицу, либо нет. Можно также представлять себе эти ячейки как гигантское поле для игры в крестики-нолики.



Согласно уилеровской концепции «Суть из бита», физические условия в мире в любой момент времени можно представить подобным «сообщением». Если бы мы умели читать этот код, мы точно знали бы, что происходит в данной области пространства. Например, является ли она тем, что мы обычно называем пустым пространством – вакуумом, или же это кусок железа, или внутренняя часть атомного ядра.

Поскольку все в мире постоянно меняется – планеты движутся, частицы распадаются, люди рождаются и умирают, – сообщения, выраженные крестиками и ноликами, также должны меняться. В какой-то момент рисунок может выглядеть как на приведенной выше иллюстрации. А чуть позже он может измениться.

В этом уилеровском мире информации законы физики сводились бы к правилам, по которым одни конфигурации битов сменяются другими от мгновения к мгновению. Такие правила, если они корректно составлены, позволили бы волнам крестиков и ноликов распространяться по решетке, представляя световые волны. Большой плотный ком ноликов мог бы возмущать распределение крестиков и ноликов в своей окрестности и таким образом представлять гравитационное поле большой массы.

Теперь вернемся к вопросу о том, сколько информации могло поместиться внутри Александрийской библиотеки. Все, что нужно сделать, это разделить ее объем – 22 миллиарда кубических дюймов – на ячейки планковского размера. Получится примерно  $10^{109}$  битов.

Это очень много – гораздо больше, чем во всем Интернете и во всех книгах, на всех CD и жестких дисках в мире, причем во много раз больше. Чтобы представить себе, сколь велик объем информации  $10^{109}$  битов, вообразите, сколько обычных книг понадобилось бы, чтобы его вместить. Ответ – больше, чем может поместиться во всей наблюдаемой Вселенной.

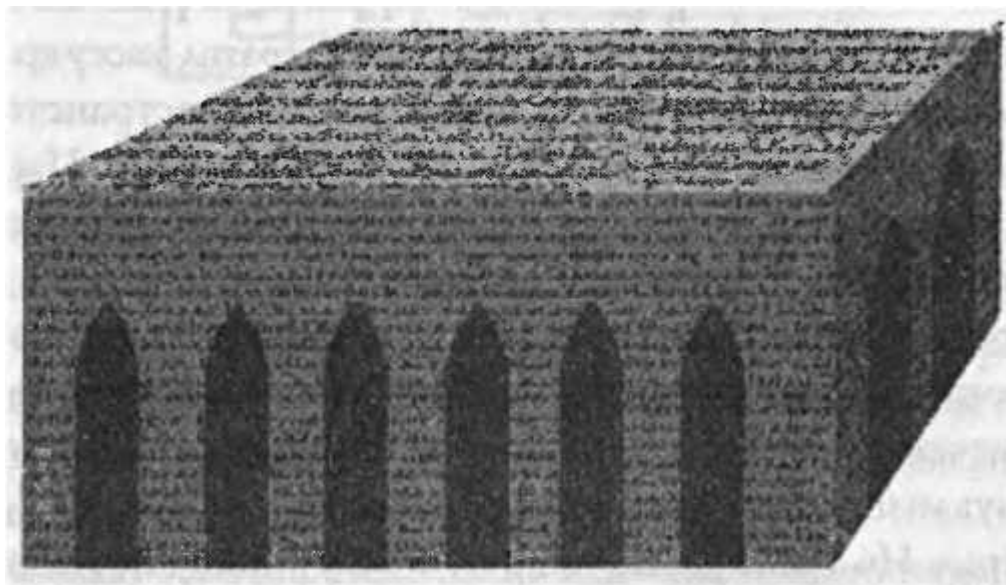
Концепция «Суть из бита», описывающая «ячеистый» мир, заполненный битами информации планковского размера, довольно заманчива. И она весьма разнопланово повлияла на физиков. Ричард Фейнман был ее горячим сторонником. Он потратил массу времени, выстраивая упрощенные миры, созданные из пространственно-временных битов. Но это заблуждение. Как мы увидим, Птолемей был бы разочарован, узнав, что его великая



библиотека никогда не могла бы вмещать более чем  $10^{74}$  битов<sup>67</sup>.

*Я* могу более или менее ясно показать, что такое миллион: в куб со стороной один метр поместится миллион маленьких мармеладок. А как насчет миллиарда или триллиона? Различие между ними труднее визуализировать, хотя триллион всего в тысячу раз больше миллиарда. Но такие числа, как  $10^{74}$  и  $10^{109}$ , слишком велики для осознания, за исключением того, что  $10^{109}$  намного больше  $10^{74}$ . В действительности  $10^{74}$ , реальное число битов, которое могло бы вместиться в Александрийскую библиотеку, — это ничтожно малая доля от высчитанных нами  $10^{109}$  битов. Откуда такое невероятное Расхождение? Это история для следующей главы, но я дам здесь Небольшую подсказку.

Страхи и паранойя среди королей и принцев — это общее место в истории. *Я* понятия не имею, страдал ли от них Птолемей, но давайте представим, как он мог бы ответить на слухи о том, что его враги спрятали в его собственной библиотеке скрытую информацию. Он мог бы счесть оправданным издание драконовского закона, запрещающего всякую скрытую информацию. В случае Александрийской библиотеки воображаемый Птолемеев закон требовал бы, чтобы каждый бит информации был виден извне здания. Во исполнение этого закона вся информация должна быть записана на внешних стенах библиотеки. Библиотекаря не позволялось бы скрывать внутри ни единого бита. Иероглифы на внешних стенах — позволены. Римские, греческие или арабские надписи на стенах — разрешены. Но вот вносить свитки внутрь — запрещено. Какая бездарная трата места! Но таков закон. В таких условиях какое максимальное число битов Птолемей мог бы рассчитывать сохранить в своей библиотеке?



Чтобы найти ответ, Птолемей приказал своим слугам тщательно измерить внешние размеры здания и посчитать площадь стен и крыши (арками и полами пренебрежем). У них получилось  $(60 \times 12) + (60 \times 12) + (30 \times 12) + (30 \times 12) + (60 \times 30)$ , что составляет около 4 тысяч квадратных метров. Обратите внимание, что на этот раз единицей измерения будет *квадратный метр*, а не *кубический*.

Но царь захотел, чтобы площадь измерялась в планковских единицах, а не в квадратных метрах. *Я* это для вас подсчитаю. Количество битов, которые он мог бы расклеить по стенам и крыше, составляет около  $10^{74}$ .

Одно из самых неожиданных и странных открытий современной физики состоит в том, что в реальном мире нет надобности в Птолемеевом законе. Природа уже предусмотрела такой закон, и даже короли не способны его нарушить. Это один из глубочайших и трудных для понимания законов природы, который был нами открыт: *максимальное количество информации, которое может содержаться в области пространства, равно площади этой*

---

67 Как водится, примерно такое количество битов, которое могло бы поместиться во Вселенной, целиком заполненной книгами.

области, а не ее объему. Это странное ограничение на заполнение пространства информацией станет темой главы 18.

## Энтропия и тепло

Тепло – это энергия случайного хаотического движения, а энтропия – это количество скрытой микроскопической информации. Рассмотрим ванну с водой, на этот раз охлажденной до наименьшей возможной температуры – абсолютного нуля, точки, в которой молекулы зафиксированы в строго определенных местах ледяного кристалла. Имеется очень небольшая неопределенность в положении каждой молекулы. Фактически всякий, кто знает теорию ледяных кристаллов, может даже без микроскопа точно сказать, где находится каждый атом. Нет никакой скрытой информации. Энергия, температура и энтропия – все равны нулю.

Теперь добавим немного тепла, подогрев лед. Молекулы начинают подрагивать, но только слегка. Небольшое количество информации потеряно; некоторые детали, пусть и немногие, выходят из-под нашего контроля. Число конфигураций, которые мы можем спутать между собой, становится больше, чем прежде. Так порция тепла повышает энтропию, и с добавлением энергии все только ухудшается. Кристалл приближается к точке плавления, а молекулы начинают смещаться друг относительно друга. Уследить за всеми подробностями вскоре становится невозможно. Другими словами, с ростом энергии растет и энтропия.

Энергия и энтропия – не одно и то же. Энергия принимает множество форм, но одна из них, тепло, срослась с энтропией, наподобие сиамских близнецов.

## Еще немного о втором начале

Первое начало термодинамики – это закон сохранения энергии: невозможно создавать энергию; невозможно ее уничтожить; все, что можно сделать, – изменить ее форму. Второе начало еще более обескураживающее: неведение всегда возрастает.

Представьте себе сцену, в которой ныряльщик прыгает с трамплина в бассейн:  
потенциальная энергия → кинетическая энергия → тепло.

Он быстро останавливается, а исходная потенциальная энергия превращается в небольшое увеличение тепловой энергии воды. И вместе с этим небольшим нагревом слегка увеличивается энтропия.

Ныряльщик не прочь повторить выступление, но он ленив и не хочет снова подниматься по лестнице на трамплин. Он знает, что энергия никогда не исчезает, так что почему бы не подождать, пока тепло из бассейна не превратится снова в потенциальную энергию – *его* потенциальную энергию? Ничто в законе сохранения энергии не препятствует обращению его прыжка: чтобы ныряльщика забросило обратно на трамплин, а бассейн немного остыл. При этом бы не только он оказался на трамплине, но и энтропия бассейна уменьшилась, приведя к неожиданному снижению нашего незнания.

К сожалению, наш мокрый приятель освоил только половину курса термодинамики – первую половину. Во второй половине он бы узнал то, что всем нам известно: энтропия *всегда* возрастает. Энергия *всегда* деградирует. При преобразованиях между потенциальной, кинетической, химической, другими формами энергии и теплом в выигрыше всегда оказывается тепло, его становится больше, а других организованных, нехаотических форм энергии – меньше. Это второе начало термодинамики: общее количество энтропии в мире всегда возрастает.

Именно поэтому при нажатии тормоза движущийся автомобиль взвизгивает и останавливается, но нажатие тормоза в стоящем автомобиле не приводит его в движение. Беспорядочное тепло земли и воздуха не может преобразоваться в более организованную кинетическую энергию движения автомобиля. По этой же причине тепло моря невозможно

направить на решение мировых энергетических проблем. В целом организованная энергия деградирует, превращаясь в тепло, и обратного пути не существует.

Тепло, энтропия, информация – какое отношение эти практические, утилитарные понятия имеют к черным дырам и основаниям физики? Ответ – самое непосредственное. В следующей главе мы увидим, что черные дыры – это фундаментальные резервуары скрытой информации. На самом деле они – самые плотные информационные хранилища в природе. И это может быть лучшим определением черной дыры. Давайте посмотрим, как Якоб Бекенштейн и Стивен Хокинг пришли к пониманию данного ключевого факта.

## 8

### **Уилеровские мальчики, или Сколько информации можно затолкать в черную дыру?**

В 1972 году, пока я беседовал с Ричардом Фейнманом в кафе «Уэст Энд», принстонский аспирант Якоб Бекенштейн задавался вопросом: что происходит с теплом, энтропией и информацией в черных дырах? В то время Принстон был мировым центром обучения гравитационных физиков. Это могло быть как-то связано с тем, что здесь более двух десятилетий жил Эйнштейн, хотя к 1972 году с его смерти прошло уже семнадцать лет. Принстонским профессором был один из величайших провидцев современной физики Джон Арчибальд Уилер, вдохновивший на изучение гравитации и размышления о черных дырах многих выдающихся молодых ученых. Среди знаменитых физиков, испытавших глубокое влияние Уилера в тот период, были Чарльз Мизнер, Кип Торн, Клаудио Тейтельбойм и Якоб Бекенштейн. Уилер, который ранее был научным руководителем диссертации Фейнмана, был, в свою очередь, учеником Эйнштейна. Как и сам великий ученый, он верил, что ключ к законам природы лежит в теории гравитации. Но в отличие от Эйнштейна Уилер, который сотрудничал с Нильсом Бором, верил также и в квантовую механику. Так что Принстон был центром исследований не только по гравитации, но также и по квантовой механике.

В то время теория гравитации была относительно непопулярной тихой заводью теоретической физики. Физики, занимавшиеся элементарными частицами, добивались колоссальных успехов в редукционистском марше ко все более тонким структурам. Атомы давно уступили место ядрам, а ядра – кваркам. Обнаружилась истинная роль нейтрино как равноправных партнеров электронов, и выдвигались гипотезы о новых частицах, таких как очарованный кварк, до экспериментального открытия которого оставался год или два. Радиоактивность ядер наконец была адекватно объяснена, и вот-вот предстояло появиться Стандартной модели элементарных частиц, физики, изучающие элементарные частицы, включая и меня, полагали, что есть занятия получше, чем тратить свое время на гравитацию. Были и исключения вроде Стивена Вайнберга, но большинство считало эту тему легкомысленной.

В ретроспективе это пренебрежение к гравитации смотрится крайне близоруким. Почему энергичные лидеры физической науки, смелые пионеры этой области знаний, были столь беспечны в отношении гравитации? Дело в том, что они не могли даже представить себе, чтобы гравитация играла значимую роль во взаимодействии элементарных частиц друг с другом. Представьте, что у вас есть тумблер, позволяющий выключать электрические силы, действующие между ядром атома и электронами, так чтобы только гравитационное притяжение удерживало электроны на своих орбитах. Что случится с атомом, когда вы щелкнете тумблером? Атом немедленно распухнет, поскольку скрепляющая его сила уменьшится. Насколько большим стал бы при этом обычный атом? Значительно больше всей наблюдаемой Вселенной!

А что случится, если оставить работать электрические силы, но выключить гравитацию? Земля улетит от Солнца, но изменения в отдельных атомах будут столь малы, что их не удастся обнаружить. Количественно гравитационные силы между двумя электронами в атоме примерно в миллион миллиардов миллиардов миллиардов миллиардов

раз слабее электрических сил.

Такова была интеллектуальная среда, когда Джон Уилер принялся храбро исследовать океан неведения, отделявший обычный мир элементарных частиц от эйнштейновской теории гравитации. Уилер сам был ходячей загадкой. Внешне он выглядел и разговаривал как типичный бизнесмен. Он легко бы вписался в зал заседаний самой консервативной корпорации Америки. Фактически его политические взгляды и были консервативными. В самый разгар холодной войны Джон стоял на позициях решительного антикоммунизма. А еще на протяжении эпохи беспрецедентной социальной активности университетских кампусов в 1960-х и 1970-х годов он был глубоко любим своими студентами. Клаудио Тейтельбойм, ныне самый знаменитый латиноамериканский физик, был одним из уилеровских студентов<sup>68</sup>. Будучи отпрыском известной чилийской семьи левой политической ориентации, он стал одним из многочисленных учеников Джона, снискавших научную славу. Семья была связана с Сальвадором Альенде; сам Клаудио был бесстрашным и откровенным врагом диктаторского режима Пиночета. Но, несмотря на политические расхождения, между Джоном и Клаудио возникла крепчайшая дружба, основанная на глубокой симпатии и взаимном уважении мнений.

Впервые я встретил Уилера в 1961 году. Я был студентом Сити-колледжа Нью-Йорка с несколько странной академической справкой. На встречу с ним меня взял один из моих учителей, Гарри Судак – грызущий сигары и сквернословящий профессор из той же еврейской левой рабочей среды, что и я. Расчет был на то, чтобы впечатлить Уилера и устроить меня аспирантом, несмотря на отсутствие диплома. В то время я работал водопроводчиком в Южном Бронксе, и моя мать считала, что к встрече я должен быть надлежащим образом одет. Для моей мамы это значило, что следует показать солидарность с моим социальным классом и быть в своей рабочей одежде. Сейчас мой водопроводчик в Пало-Альто одевается также, как и я, когда читаю лекции в Стэнфордском университете. Но в 1961 году мой костюм водопроводчика был таким же, как у моего отца и всех его приятелей-сантехников в Южном Бронксе, – комбинезон в стиле Крошки Абнера<sup>69</sup>, синяя фланелевая рубашка и тяжелые со стальными подковами башмаки. Я также носил кепку, чтобы уберечь волосы от грязи и пыли.

Когда Гарри заехал за мной, чтобы отправиться в Принстон, он обомлел. Большая сигара выпала у него изо рта, и он отправил меня наверх переодеваться. Он сказал, что Джон Уилер – совсем другой парень.

Когда я вошел в величественный профессорский кабинет, то понял, что имел в виду Гарри. Единственный способ описать человека, который меня приветствовал, – это сказать, что он выглядел республиканцем. Какого черта меня занесло в это вражеское логово?

Двумя часами позже я был полностью очарован. Джон с энтузиазмом описывал свои представления о том, как пространство и время становятся бешеным, дрожащим, пенящимся миром квантовых флуктуаций, когда рассматриваешь их в чудовищной силы микроскоп. Он сказал мне, что самая глубокая и вдохновляющая проблема физики – это объединение двух великих эйнштейновских теорий – общей теории относительности и квантовой механики. Он объяснил, что лишь на планковском расстоянии элементарные частицы раскрывают свою истинную природу, и она должна быть целиком геометрической – квантово-геометрической. На глазах молодого честолобивого физика важный бизнесмен превратился в идеалистического мечтателя. Больше всего на свете я хотел последовать в бой за этим человеком.

Был ли на самом деле Джон Уилер столь консервативным, каким он казался? Честно

---

<sup>68</sup> Жизнь Клаудио была полна драматических поворотов. Одно из его самых восхитительных приключений случилось в 2008 году, когда он обнаружил, что его отцом был Альваро Бунстер, патриарх героической антифашистской семьи. Одна из крупнейших чилийских газет дала об этом такой заголовок: «Знаменитый чилийский физик, изучавший происхождение Вселенной, выяснил собственное происхождение». В результате Клаудио поменял фамилию на Бунстер.

<sup>69</sup> Крошка Абнер – персонаж комиксов и комедийных фильмов, здоровенный добродушный работяга, который всегда носит рабочий комбинезон с лямкой через одно плечо. – Примеч. перев.

говоря, я не знаю. Но он определенно не был ханжой-морализатором. Однажды, когда Джон и мы с женой Энни выпивали в прибрежном кафе Вальпараисо, он поднялся со словами, что хочет прогуляться и посмотреть на южноамериканских девушек в бикини. В то время ему было уже сильно за восемьдесят.

Как бы то ни было, я так никогда и не стал одним из уилеровских мальчиков; Принстон меня не принял. Так что я отправился в Корнелл, где физика была куда слабее. Прошло много лет, прежде чем я вновь ощутил тот же трепет, что в 1961 году.

Где-то около 1967 года Уилер очень заинтересовался гравитационно сколлапсировавшими объектами, которые Карл Шварцшильд описал в 1917 году. Тогда они назывались черными или темными звездами. Но это не отражало сущности данных объектов – тот факт, что это глубокие дыры в пространстве, гравитационное притяжение которых непреодолимо. Уилер стал называть их черными дырами. Сначала знаменитый американский физический журнал *Physical Review* отказался использовать такое название. Сегодня причина этого выглядит смешной: термин «черная дыра» считался непристойным! Однако Джон пробил его через редакционную коллегию, и черные дыры вышли в свет<sup>70</sup>.

Забавно, что следующий тезис Джона гласил: «Черные дыры не имеют волос». Не знаю, возражал ли *Physical Review* на этот раз, но терминология закрепилась. Уилер вовсе не пытался провоцировать редакторов. Напротив, он приводил очень серьезные соображения относительно свойств горизонтов черных дыр. Под «волосами» он имел в виду наблюдаемые свойства – какие-нибудь кочки или другие неоднородности. Уилер отмечал, что горизонт черной дыры гладкий и лишен каких-либо деталей, подобно лысой голове, – на самом деле он еще намного более гладкий. Когда черная дыра образуется – скажем, при коллапсе звезды, – горизонт очень быстро приобретает форму идеальной, без каких-либо особенностей, сферы. Если не считать массы и скорости вращения, любая черная дыра совершенно неотличима от других. По крайней мере, так считалось.

Израильтянин Якоб Бекенштейн – маленький тихий человек. Но его мягкое поведение в научном сообществе контрастирует с его интеллектуальной смелостью. В 1972 году он был одним из аспирантов Уилера, заинтересовавшимся черными дырами. Однако они занимали его не как небесные тела, которые когда-нибудь можно будет увидеть в телескоп. Страстью Бекенштейна были основания физики, ее самые фундаментальные принципы, и он чувствовал, что черные дыры могут рассказать о законах природы нечто очень важное. Особенно его интересовал вопрос, терзавший и Эйнштейна: как черные дыры уживаются с принципами квантовой механики и термодинамики. По сути, стиль физических исследований Бекенштейна был очень похож на эйнштейновский; оба они были мастерами мысленного эксперимента. По минимуму используя математику, но очень глубоко размышляя о принципах физики и о том, как их применять в воображаемых (но возможных) физических условиях, оба ученых могли получать далеко идущие выводы, которые сильно влияли на будущее физики.

Вот вкратце вопрос, который поставил Бекенштейн. В вашем распоряжении контейнер с горячим газом, имеющим высокий уровень энтропии. Вы бросаете контейнер с энтропией в черную дыру. Здравый смысл говорит, что контейнер просто исчезнет под горизонтом. С точки зрения любых практических задач энтропия полностью исчезнет из наблюдаемой Вселенной. Согласно доминирующему представлению, гладкий, лысый горизонт не способен скрывать никакую информацию. Так что будет казаться, что энтропия мира убывает, что противоречит второму началу термодинамики, который говорит, что энтропия никогда не убывает. Неужели можно так легко нарушить столь важный принцип, как второе начало? Эйнштейн бы ужаснулся.

Бекенштейн заключил, что второе начало слишком глубоко встроено в систему физических законов, чтобы так легко нарушаться. Поэтому он выдвинул радикально новое предположение: сами черные дыры должны обладать энтропией. Он утверждал, что при подсчете общей энтропии Вселенной – недостающей информации в звездах, межзвездном

---

70 Я впервые услышал эту историю от выдающегося релятивиста Вернера Израэля.

газе, атмосферах планет и всех ваннах с горячей водой – необходимо добавить определенное количество энтропии в счет каждой черной дыры. Благодаря этой идее Бекенштейн спас второе начало. Эйнштейн, без сомнения, одобрил бы это.

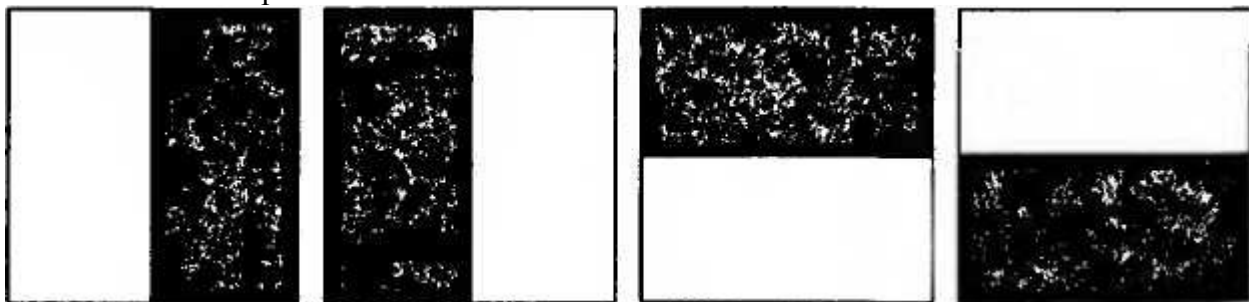
Вот как рассуждал Бекенштейн. Энтропия всегда сопутствует энергии. Она связана с числом комбинаций чего-то, а это что-то во всех случаях является энергией. Даже чернила на этой странице состоят из имеющих массу атомов, которые, согласно Эйнштейну, обладают энергией, поскольку масса – это форма энергии. Можно сказать, что энтропия соответствует числу возможных способов организации порций энергии.

Когда Бекенштейн в своем воображении засовывал контейнер с горячим газом в черную дыру, он добавлял ей энергию. Это оборачивалось увеличением массы и размеров черной дыры. Вели, как предположил Бекенштейн, черные дыры имеют энтропию, которая растет вместе с их массой, то появляется шанс спасти второе начало. Энтропия черной дыры должна возрастать сильнее, чем необходимо для компенсации потерь.

Прежде чем рассказывать, как Бекенштейн вывел формулу для энтропии черной дыры, надо объяснить, почему эта идея была такой шокирующей, что, согласно Хокингу, он первоначально отбросил ее как вздорную<sup>71</sup>.

Энтропия учитывает различные варианты организации, но что это такое? Если горизонт черной дыры лишен деталей, как самая гладкая из мыслимых лысин, то что там подсчитывать? По этой логике, черная дыра должна иметь нулевую энтропию. Утверждение Джона Уилера о том, что «черные дыры не имеют волос», выглядит прямо противоречащим теории Якоба Бекенштейна.

Как примирить учителя и студента? Позвольте привести поясняющий пример. Отпечаток на листе с разными градациями серого в действительности состоит из крошечных черных и белых точек. Предположим, в нашем распоряжении имеется миллион черных точек и миллион белых. Один из возможных рисунков получается, если разделить страницу пополам по вертикали или по горизонтали. Одну половину можно сделать черной, другую – белой. Есть только четыре способа выполнить это.

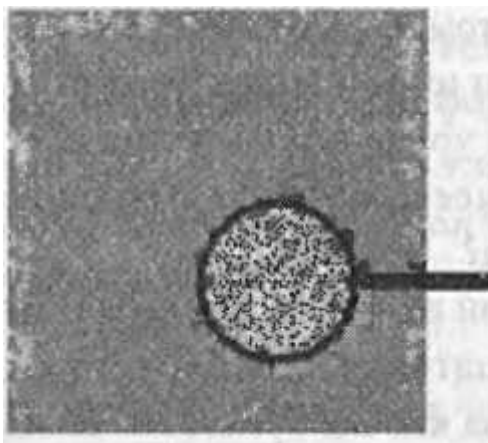


Получается четкий рисунок с резкими контрастами, но имеющий всего несколько вариаций. Четкий рисунок с резкими контрастами обычно означает низкую энтропию.

Теперь выберем другую крайность и равномерно распределим по той же площади равное число черных и белых пикселей. Получится более или менее однородный серый цвет. Если пиксели действительно маленькие, этот серый фон будет выглядеть совершенно однородным. Имеется колоссальное число способов перераспределить черные и белые точки так, что мы не различим варианты без увеличительного стекла.

---

<sup>71</sup> Подробнее об этом первоначальном скепсисе можно прочитать в его книге «Краткая история времени» (Русский перевод: Хокинг С. Краткая история времени. – СПб.: Амфора, 2007. – Примеч. перев.)



В этом случае видно, что высокая энтропия часто сопутствует однородному, «лысому» виду.

Связь внешней однородности и высокой энтропии указывает на нечто важное. Она подразумевает, что система, какой бы она ни была, должна состоять из большого числа микроскопических объектов, которые (а) слишком малы, чтобы их увидеть, и (б) могут комбинироваться множеством разных способов без изменения общего вида системы.

### **Бекенштейн вычисляет энтропию черной дыры**

Мысль Бекенштейна о том, что черные дыры обладают энтропией, то есть, иными словами, несмотря на свою безволосость, содержат скрытую информацию, оказалась одним из тех простых, но глубоких суждений, которые одним махом меняют ситуацию в физике. Когда я начинал писать книги для широкой публики, мне настоятельно советовали ограничиться одной-единственной формулой:  $E = mc^2$ . Мне говорили, что с каждым дополнительным уравнением продажи книги будут падать на десять тысяч экземпляров. Если честно, это противоречит моему опыту. Так что после долгих колебаний я решил пойти на риск. Доказательство Бекенштейна столь необычайно простое и красивое, что отказ от него обесценил бы эту книгу. Тем не менее я приложил усилия и разъяснил результаты так, чтобы менее склонные к математике читатели могли спокойно пропустить несколько простых формул, не теряя понимания сути.

Бекенштейн не ставил напрямую вопрос о том, сколько битов можно скрыть внутри черной дыры данного размера. Вместо этого он задался вопросом о том, как изменится размер черной дыры, если сбросить в нее один бит информации. Это похоже на вопрос о том, насколько поднимется уровень воды в ванне, если добавить в нее одну каплю воды. Точнее даже: насколько он поднимется при добавлении одного атома?

Сразу возник другой вопрос: а как добавить один бит? Может быть, для этого Бекенштейну надо бросить в черную дыру одну точку, напечатанную на клочке бумаги? Очевидно, нет; точка состоит из огромного числа атомов, и то же самое относится к бумаге. Поэтому в точке содержится куда больше одного бита информации. Лучший подход – это вбросить одну элементарную частицу.

Предположим, например, что в черную дыру падает одиночный фотон. Даже один фотон может нести более одного бита информации. В частности, масса информации содержится в координатах точки, где фотон пересекает горизонт. Здесь Бекенштейн ловко применил гейзенберговскую концепцию *неопределенности*. Он посчитал, что положение фотона должно быть максимально неопределенным, лишь бы только он попадал в черную дыру. Такой «неопределенный фотон» несет лишь один бит информации, а именно находится ли он где-то внутри черной дыры.

Если помните, в главе 4 говорилось о том, что разрешающая способность светового луча не превышает длины его волны. В данном случае Бекенштейн не собирался рассматривать детали на горизонте; наоборот, горизонт должен был выглядеть максимально

размытым. Хитрость была в том, чтобы использовать такой длинноволновый фотон, чтобы он распределился по всему горизонту. Иными словами, если горизонт имеет шварцшильдовский радиус то фотон должен иметь такую же длину волны. Кажется, что можно использовать и более длинные волны, но такие фотоны будут отскакивать от черной дыры, а не захватываться ею.

Бекенштейн подозревал, что добавление лишнего бита к черной дыре вызовет прирост ее размера, пусть и очень небольшой, подобно тому как добавление лишней молекулы резины к воздушному шару ненамного его увеличит. Однако для вычисления этого прироста требуется несколько промежуточных шагов. Давайте сначала бегло с ними ознакомимся.

1. Первым делом надо узнать, насколько увеличится энергия черной дыры при добавлении одного бита информации.

2. Далее нужно определить, насколько изменится масса черной дыры с добавлением лишнего бита. Для этого вспомним знаменитую формулу Эйнштейна:

$$E = mc^2$$

Однако нам понадобится обратить ее, что позволит узнать изменение массы по величине добавленной энергии.

3. Когда масса определена, можно вычислить изменение шварцшильдовского радиуса, используя ту же формулу, которую вывели Митчел, Лаплас и Шварцшильд (см. главу 2):

$$R_s = 2MG/c^2$$

4. Наконец, надо определить прирост площади горизонта. Для этого нужна формула площади сферы:

$$\text{Площадь горизонта} = 4\pi R_s^2.$$

Начнем с энергии однобитного фотона. Как я уже объяснял, фотон должен иметь достаточно большую длину волны, чтобы его положение внутри черной дыры было неопределенным. Это значит, что длина волны должна быть  $R_s$ . Согласно Эйнштейну, фотон с длиной волны  $R_s$  имеет энергию  $E$ , определяемую следующей формулой.<sup>72</sup>

$$E = hc/R_s.$$

В этой формуле  $h$  – постоянная Планка, а  $c$  – скорость света. Из нее следует, что сбрасывание в черную дыру одного бита информации добавляет ей энергию величиной  $hc/R_s$ .

Следующий шаг – это расчет изменения массы черной дыры. Для пересчета энергии в массу ее надо разделить на  $c^2$ , а значит, масса черной дыры возрастет на величину  $h/R_sc$ :

$$\text{Изменение массы} = h/R_sc.$$

Подставим в эту формулу числа, чтобы увидеть, сколько же добавит один бит к массе черной дыры, имеющей массу Солнца.

$$\text{Постоянная Планка, } h = 6,6 \times 10^{-34}$$

$$\text{Шварцшильдовский радиус черной дыры, } R_s = 3000 \text{ м}$$

$$\text{Скорость света, } c = 3 \times 10^8$$

$$\text{Гравитационная постоянная, } G = 6,7 \times 10^{-11}$$

Таким образом, один бит информации добавляет к черной дыре солнечной массы поразительно малую величину:

$$\text{Прирост массы} = 10^{-45} \text{ килограмма.}$$

И все же, как говорится, «это больше, чем ничто»<sup>73</sup>.

Перейдем к третьему шагу: используем связь между массой и радиусом для вычисления изменения  $R_s$ . В алгебраической форме ответ будет таким:

$$\text{Прирост } R_s = 2hG / (R_s c^3).$$

---

<sup>72</sup> Частота  $f$  фотона с длиной волны  $R_s$  равна  $c/R_s$ . Используя формулу Эйнштейна – Планка  $E = hf$ , получаем, что энергия фотона равна  $hc/R_s$ .

<sup>73</sup> Автор цитирует фразу-рефрен: «That ain't nothing» из одноименной песни рэппера Master P. – Примеч. перев.



У черной дыры солнечной массы  $R_s$  составляет около 3000 м. Если подставить все числа, то окажется, что радиус увеличится на  $10^{-72}$  м. Это не только безмерно меньше протона, но также безмерно меньше планковской длины ( $10^{-35}$  м). При таком малом изменении непонятно, зачем мы вообще это вычисляем, но было бы ошибкой пренебречь этой малостью.

Последний шаг состоит в определении того, насколько изменится площадь горизонта. Для черной дыры солнечной массы прирост площади горизонта составляет около  $10^{-70}$  квадратного метра. Это очень малая величина, но опять, «это больше, чем ничто». И не просто больше, чем ничто, а нечто совершенно особое:  $10^{-70}$  м<sup>2</sup>, оказывается, как раз равняется *одной квадратной планковской единице*.

Это случайное совпадение? Что получится, если взять черную дыру земной массы (размером с клюквину) или черную дыру в миллиард раз массивнее Солнца? Попробуйте – с числами или с формулами. Каков бы ни был исходный размер черной дыры, всегда выполняется правило:

*Добавление одного бита информации увеличивает площадь горизонта любой черной дыры на одну планковскую единицу площади, или на одну квадратную планковскую единицу.*

Каким-то образом в принципах квантовой механики и общей теории относительности скрыта загадочная связь между невидимыми битами информации и кусочками площади планковского размера.

Когда я объяснил все это на своем подготовительном курсе по физике в Стэнфорде, кто-то на заднем ряду протяжно присвистнул и произнес: «Кру-у-уто». Это действительно круто, а еще глубоко и, вероятно, содержит ключ к загадке квантовой гравитации.

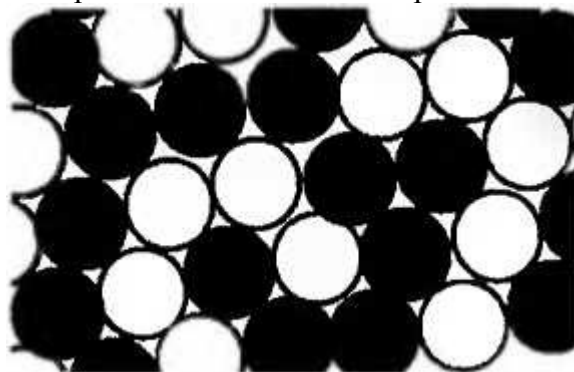
Теперь представьте формирование черной дыры бит за битом, так же как можно наполнять ванну атом за атомом. Каждый раз при добавлении бита информации площадь горизонта прирастает на одну планковскую единицу. К тому времени, когда черная дыра будет готова, площадь ее горизонта окажется равной общему числу битов скрытой в ней информации. Так что главное достижение Бекенштейна можно суммировать тезисом:

*Энтропия черной дыры, измеренная в битах, пропорциональна площади ее горизонта, измеренной в планковских единицах.*

Или, еще более кратко:

*Информация равна площади.*

Это выглядит почти так, как если бы горизонт был плотно покрыт несжимаемыми битами информации; сходным образом можно плотно покрывать столешницу монетами.



При добавлении новых монет площадь, занятая всеми монетами вместе, будет расти. Биты, монеты – принцип один и тот же.

Единственная проблема с этой иллюстрацией заключается в том, что на горизонте нет монет. Будь они там, Алиса обнаружила бы их, падая в черную дыру. Согласно общей теории относительности, для свободно падающей Алисы горизонт – это невидимая точка невозврата. Сама возможность для нее встретить что-то вроде стола с монетами прямо противоречит эйнштейновскому принципу эквивалентности.

Этот конфликт – очевидная несовместимость между представлением о горизонте как о *поверхности, плотно заполненной материальными битами*, и как о *точке невозврата* – и

стал казус белли для Битвы при черной дыре.

Другой момент, озадачивающий физиков с момента открытия Бекенштейна: почему энтропия пропорциональна площади горизонта, а не внутреннему объему черной дыры? Кажется, что внутри пропадает огромное количество места. Фактически черная дыра ужасно похожа на Птолемееву библиотеку. Мы еще вернемся к этому вопросу в главе 18, где увидим, что весь мир – это голограмма.

Хотя Бекенштейн пришел к правильному выводу – энтропия черной дыры действительно пропорциональна площади, его доказательство не было идеально строгим, и он об этом знал. Он не говорил, что энтропия *равна* площади, измеренной в планковских единицах. Из-за ряда неопределенностей в его выкладках он мог лишь утверждать, что энтропия черной дыры *примерно равна* (или пропорциональна) ее площади. В физике слово «примерно» – очень ненадежное. Означает оно удвоенную площадь или четверть площади? Хотя доказательство Бекенштейна и было блестящим, оно не позволяло точно определить коэффициент пропорциональности.

В следующей главе мы увидим, как открытие Бекенштейном энтропии черных дыр привело Стивена Хокинга к величайшему озарению: черные дыры обладают не только энтропией, как совершенно верно догадался Бекенштейн, но у них также есть и температура. Это не бесконечно холодные, мертвые объекты, какими физики их себе представляли. Черные дыры высвечивают свою внутреннюю теплоту, но в итоге эта теплота приводит к их гибели.

## 9

### Черный свет

Зимний ветер отвратителен в больших городах. Он свищет вдоль длинных улиц между плоскими фасадами домов, завихряется вокруг углов, безжалостно бичуя несчастных пешеходов. В один ненастный день в 1974 году я отправился на длинную пробежку по обледелым улицам Манхэттена. Пар от дыхания оседал сосульками на моих длинных волосах. Пробежав пятнадцать миль, я совершенно выдохся, но до теплого офиса, к сожалению, оставалось еще две мили. Без кошелька у меня не было даже двадцати центов, чтобы сесть на метро. Но тут мне улыбнулось счастье. Когда я сошел с тротуара где-то в районе Дикманстрит, рядом остановился автомобиль, и из него высунулась голова Оге Петерсена. Прелестный датчанин Оге, до того как перебраться в Соединенные Штаты, был ассистентом Нильса Бора в Копенгагене. Он обожал квантовую механику и жил и дышал боровской философией.

В машине Оге спросил, не иду ли я на лекцию Денниса Скиамы в Белферской школе? Я и не думал. На самом деле я ничего не знал о Скиаме и его лекции. Все мои мысли были о тарелке супа в университетском кафетерии. Оге познакомился со Скиамой в Англии и сказал, что это чрезвычайно забавный англичанин из Кембриджского университета, от которого можно ждать массы отличных шуток. Оге считал, что лекция Скиамы будет иметь отношение к черным дырам – об одной работе, выполненной его студентом, гудит весь Кембридж. Я пообещал Оге, что появлюсь.

Кафетерий университета Ешива не был местом в моем вкусе. Еда неплохая – суп был кошерным (что меня совершенно не волновало) и горячим (вот это было важно), однако разговоры между студентами меня тяготили: почти все они были о законе. Не о федеральном законе, не о законах штата или города и не о научных законах, это была мелочная казуистика, касающаяся талмудического закона, который занимал молодых студентов Ешивы: будет ли кошерной пепси-кола, если она произведена на заводе, который построен на месте бывшей свинофермы? А если земля была покрыта фанерой перед строительством завода? Такого рода были вопросы. Но горячий суп и холодная погода склонили меня к тому, чтобы расслабиться и послушать студентов за соседним столом. На этот раз разговор зашел о предмете, о котором даже я иногда забочусь, – о туалетной бумаге! Ожесточенная

талмудическая полемика разгорелась вокруг исключительно важного вопроса: можно ли в шабат заменять в держателе рулон с туалетной бумагой или надо использовать бумагу прямо от неподвешенного рулона? Одна фракция, цитируя труды Рабби Акивы, высказывала предположение, что этот великий человек настаивал бы на строгом подчинении определенным законам, которые запрещают замену рулона. Другая фракция считала, что несравненный Рамбам<sup>74</sup> очень ясно выразил в «Путеводителе растерянных», что некоторые необходимые работы исключаются из талмудических запретов, а логический анализ склоняет к тому выводу, что замена туалетной бумаги является одной из таких работ. Спустя полчаса дискуссия все еще сохраняла остроту. В сражение вступили еще несколько молодых будущих раввинов с новыми весьма искусными, почти математическими аргументами, и я наконец, устал от этой полемики.

Вас может удивить, какое отношение все это имеет к теме данной книги, к черным дырам. Лишь одно: из-за отдыха в кафетерии я пропустил первые сорок минут блестящей лекции Денниса Скиама.

Кембриджский университет, где Скиама был профессором астрономии и космологии, являлся одним из трех мест (помимо Принстона и Москвы<sup>75</sup>), где лучшие из лучших пробовали силу своего интеллекта на величайших загадках гравитации. Как и в Принстоне, его молодых интеллектуальных воинов возглавлял харизматичный вдохновенный лидер. Мальчики Скиама были звездной командой блестящих молодых физиков, в число которых входили Брэндон Картер, сформулировавший антропный принцип в космологии, сэр Мартин Рис, королевский астроном Великобритании, занимающий ныне кафедру сэра Эдмонда Галлея (чье имя носит комета Галлея), Филип Канделас, ныне занимающий кафедру математики имени Роуза Болла в Оксфорде, Дэвид Дойч, один из изобретателей квантовых вычислений, и Джон Барроу, выдающийся кембриджский астроном. Ах да, был еще Стивен Хокинг, который ныне занимает кафедру Исаака Ньютона в Кембридже. На самом деле в тот холодный день 1974 года Деннис рассказывал именно о работе Стивена, но тогда имя Стивена Хокинга ничего для меня не значило.

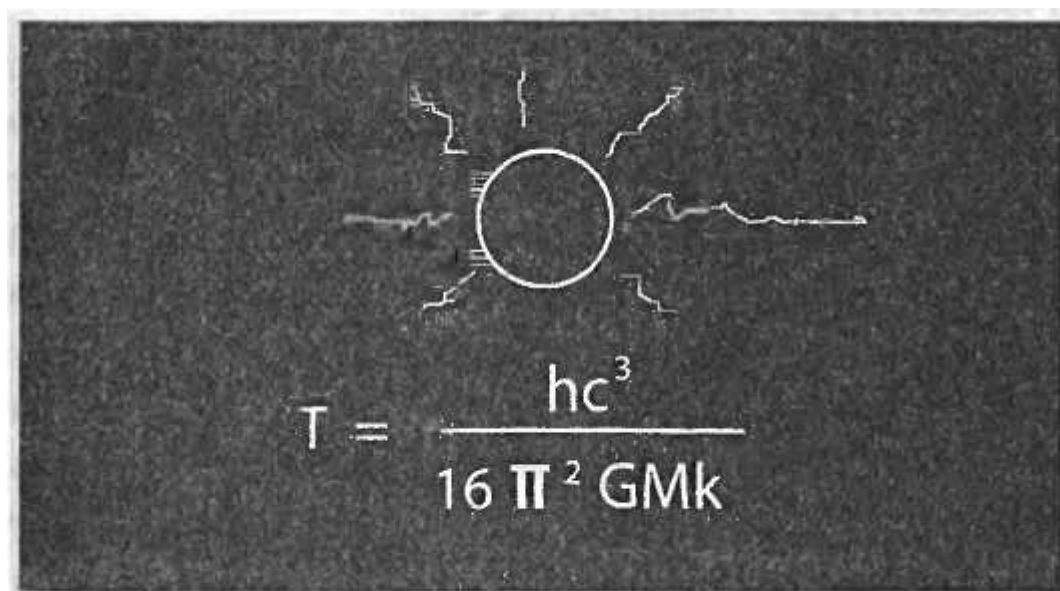
К моменту моего прихода Скиама прочитал уже две трети своей лекции. Я сразу пожалел, что не появился раньше. Мне не улыбалось вновь бежать по обледенелым мостовым в своем спортивном костюме. Тем более что к концу лекции стемнело и, без сомнения, стало еще холоднее. Но было и нечто большее, чем страх обморожения, отчего мне хотелось бы, чтобы лекция еще только начиналась. Как и говорил Оге, Деннис был невероятно интересным докладчиком. Его шутки действительно были великолепны, но еще более я был поражен единственной формулой на доске.

Обычно к концу лекции по теоретической физике доска бывает заполнена математическими символами. Однако Скиама не злоупотреблял уравнениями. Когда я пришел, доска выглядела примерно так:

---

<sup>74</sup> Рамбам – это прозвище Рабби Моше бен Маймона, который в иудейском мире больше известен как Маймонид.

<sup>75</sup> Великий гравитационный центр в Москве возглавлялся легендарным российским астрофизиком и космологом Яковом Зельдовичем.



За пять минут я расшифровал смысл символов. Фактически это были стандартные обозначения хорошо знакомых физикам величин. Но я не знал контекста – что эта формула описывает, – хотя чувствовалось, что она или очень глубокая, или очень глупая. В нее входили только самые фундаментальные константы: гравитационная постоянная  $G$ , определяющая силу гравитации, была в знаменателе – довольно странное для нее место; скорость света  $c$  указывала на использование специальной теории относительности; постоянная Планка  $h$  намекала на квантовую механику; а еще была постоянная Больцмана  $k$ . Именно она казалась тут совершенно неуместной. Что, черт побери, она тут делает? Постоянная Больцмана связана с теплотой и микроскопической природой энтропии. Как попала энтропия в формулу квантовой гравитации?

А как же числа 16 и  $\pi^2$ ? Это математические величины, которые появляются во всех формулах. Они ни на что не указывают. Обозначением было знакомо, а слова Скиамы подтвердили мое первое впечатление:  $M$  – это масса. Через пять минут я был уверен, что это масса черной дыры.

О'кей, черные дыры, гравитация и относительность. Это имело смысл, однако добавление квантовой механики выглядело уже странно. Черные дыры невероятно массивны – как звезды, из которых они возникают. Но квантовая механика занимается малыми объектами: атомами, электронами и фотонами. Каким образом она оказалась замешана в обсуждение столь тяжелых вещей, как звезды?

Более же всего сбивало с толку то, что в левой части уравнения стояла температура  $T$ . Температура чего?

Последних пятнадцати или двадцати минут лекции Скиамы мне хватило, чтобы сложить вместе все элементы. Один из студентов Денниса открыл нечто очень странное: квантовая механика наделяет черные дыры тепловыми свойствами, и вместе с теплотой они обретают температуру. Уравнение на доске было формулой для вычисления температуры черной дыры.

Как странно, подумал я. Что привело Скиаму к идиотской идее, будто у мертвой звезды, звезды, которая полностью исчерпала запасы топлива, должна быть температура, отличная от абсолютного нуля?

Глядя на загадочную формулу, я видел интересные взаимосвязи: температура черной дыры была обратно пропорциональна ее массе; чем больше масса, тем меньше температура. Гигантские астрономические черные дыры, сопоставимые со звездами, должны иметь крошечную температуру, гораздо ниже, чем у любого объекта в любой земной лаборатории. Но настоящим сюрпризом, заставившим меня привстать с кресла, было то, что крошечные черные дыры, если они существуют, должны быть невероятно горячими – горячее всего, что мы можем вообразить.

У Скиамы был припасен и еще один сюрприз: черные дыры испаряются! До того времени физики считали, что черные дыры вечны, как бриллианты. Однажды образовавшуюся черную дыру невозможно уничтожить никаким известным физическим механизмом. Черная пустота в пространстве, образованная умершей звездой, будет существовать вечно – бесконечно холодная и бесконечно тихая.

Однако Скиама сказал нам, что, подобно капле воды, оставленной на солнце, черные дыры мало-помалу испаряются и в конце концов исчезают. Как он объяснил, электромагнитное тепловое излучение уносит часть массы черной дыры.

Чтобы объяснить, как Деннис со своим студентом пришли этой мысли, я должен познакомить вас с некоторыми фактами, касающимися тепла и теплового излучения. Я еще вернусь к черным дырам, но сначала сделаю отступление.

## Тепло и температура

Тепло и температура относятся к числу самых известных физических понятий. У всех нас есть встроенный термостат. Эволюция обеспечила нас врожденным чувством холода и тепла.

Тепло – это наличие теплоты, холод – ее отсутствие. Но что за сущность такая – теплота? Что в ванне с горячей водой есть такого, что исчезает, когда ванна остывает? Если внимательно посмотреть в микроскоп, на крошечные пылинки или частицы пыли, взвешенные в теплой воде, то станет видно, что они пошатываются, как пьяные матросы. Чем горячее вода, тем более оживленными выглядят пылинки. В 1905 году Альберт Эйнштейн<sup>76</sup> объяснил это броуновское движение тем, что пылинки постоянно бомбардируются быстро движущимися энергичными молекулами. Вода, как и все вещества, состоит из молекул, снующих туда-сюда, врезающихся друг в друга, в стенки сосуда и в любые посторонние загрязнители. Когда это движение является случайным и хаотическим, мы называем его теплом. В обычных предметах добавление энергии в форме тепла вызывает увеличение случайных кинетических энергий молекул.

Температура, конечно, связана с теплотой. Когда беспорядочно движущиеся молекулы ударяют по вашей коже, они возбуждают нервные окончания, и вы чувствуете температуру. Чем больше энергия отдельных молекул, тем сильнее воздействие на нервные окончания и тем вам становится горячее. Ваша кожа – лишь один из множества типов термометров, которые могут воспринимать и регистрировать хаотические движения молекул.

Так что, грубо говоря, температура объекта – это мера энергии его отдельных молекул. Когда объект остывает, энергия уходит, и молекулы замедляются. В конце концов, если отводить все больше и больше энергии, молекулы достигают наинизшего энергетического состояния. Если игнорировать квантовую механику, то это случится, когда движение молекул полностью прекратится. В этом состоянии больше нет энергии, которую можно отвести, и объект будет находиться при абсолютном нуле. Ниже температуру опустить невозможно.

## Черные дыры и черные тела

Большинство объектов отражают хотя бы немного света. Причина, по которой красная краска выглядит красной, состоит в том, что она отражает красный свет. Точнее, она отражает некоторое сочетание длин волн, которые глаз и мозг воспринимают как красное. Аналогично, синяя краска отражает сочетание, которое мы воспринимаем как синее. Снег

---

<sup>76</sup> В 1905 году Эйнштейн начал две революции в физике и завершил третью. Двумя новыми революциями были, конечно, специальная теория относительности и квантовая (или фотонная) теория света. В том же году Эйнштейн дал первое убедительное свидетельство молекулярной теории строения вещества в своей знаменитой статье о броуновском движении. Такие физики, как Джеймс Клерк Максвелл и Людвиг Больцман, уже давно подозревали, что теплота – это случайные движения гипотетических молекул вещества, но именно Эйнштейн обеспечил эту теорию надежным доказательством.

белый, потому что поверхность ледяных кристаллов отражает все видимые цвета одинаково. (Единственное различие между снегом и зеркальным листом льда в том, что зернистая структура снега рассеивает свет по всем направлениям, разбивая отраженное изображение на тысячи крошечных фрагментов.) Но некоторые поверхности свет почти не отражают. Всякий свет, падающий на закопченное днище котелка, поглощается слоем копоти, нагревая черное покрытие, а в конечном счете и сам металл. Такие объекты мозг воспринимает как черные.

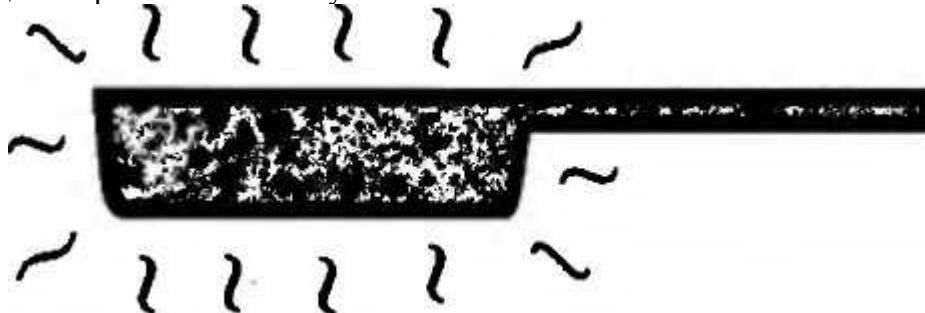


Физический термин для объекта, поглощающего абсолютно весь падающий свет, – *черное тело*<sup>77</sup>. Ко времени лекции Скиамы в моем университете в Нью-Йорке физики давно знали, что черные дыры – это черные тела. Лаплас и Митчел догадывались об этом в восемнадцатом веке, а шварцшильдовское решение эйнштейновских уравнений это доказало. Свет, попадающий под горизонт черной дыры, полностью поглощается. Горизонты черных дыр – чернейшие из черных объектов.

Но вот чего никто не знал до открытия Хокинга, это того, что черные дыры имеют температуру. Прежде, если спросить у физика: «Какая температура у черной дыры?» – первой реакцией, вероятно, было бы: «Черные дыры не имеют температуры». Вы могли бы возразить: «Ерунда. У всего есть температура». Небольшое размышление тогда привело бы к ответу: «О'кей, черные дыры не обладают теплотой, так что у них температура абсолютного нуля – наинизшая возможная». Фактически до Хокинга все физики утверждали, что черные дыры – это черные тела, но черные тела с нулевой абсолютной температурой.

Сегодня некорректно говорить, что черные дыры не испускают никакого света. Возьмите закопченный котелок, разогрейте его до нескольких сотен градусов, и он начнет светиться красным. Еще горячее – и свечение станет оранжевым, затем желтым и, наконец, ярким голубовато-белым. Любопытно, что, согласно определению физиков, Солнце является черным телом. Как странно, скажете вы: трудно вообразить что-то более далекое от черного, чем Солнце. И действительно, поверхность Солнца испускает огромное количество света, но она *ничего не отражает*. Это делает его для физика черным телом.

Охладите горячий котелок, и он станет светиться в невидимом инфракрасном свете. Даже самые холодные объекты испускают немного электромагнитного излучения, если только не находятся при абсолютном нуле.



Но излучение, испускаемое черными телами, – это не отраженный свет; оно порождается колебаниями и столкновениями атомов, и, в отличие от отраженного света, его цвет зависит от температуры тела.

То, что объяснил Деннис Скиама, было удивительно (и казалось в то время немного сумасшедшим). Он говорил, что черные дыры – это черные тела, но они не находятся при абсолютном нуле. Каждая черная дыра имеет температуру, зависящую от ее массы. И формула этой зависимости была на доске.

Он рассказал и еще об одной вещи, в некотором смысле самой поразительной. Раз черная дыра обладает теплотой и температурой, она должна испускать электромагнитное

<sup>77</sup> Полностью этот термин звучит как «абсолютно черное тело». Автор использует сокращенный вариант. – Примем, перев.

излучение – фотоны – точно так же, как и горячий черный котелок. Это означает, что она теряет энергию. Согласно эйнштейновской формуле  $E = mc^2$ , энергия и масса – это в действительности одно и то же. Так что если черная дыра теряет энергию, она также теряет и массу.

Вот мы и подошли к кульминационному пункту рассказанной Скиамой истории. Размер черной дыры – радиус ее горизонта – прямо пропорционален массе. Если масса убывает, значит, размер черной дыры уменьшается. Так что, излучая энергию, черная дыра съеживается, пока не станет размером не больше элементарной частицы, и тогда она исчезает. Согласно Скиаме, черные дыры испаряются, подобно лужам в летний день.

На протяжении всей лекции, по крайней мере той части, что я застал, Скиама ясно давал понять, что не он является автором этих открытий. «Стивен говорит то», «Стивен говорит это»... Но, несмотря на слова Денниса, к концу лекции у Меня сложилось впечатление, что неизвестному студенту Стивену Хокингу просто посчастливилось оказаться в нужное время в нужном месте, чтобы попасть в исследовательский проект Денниса. Для известного физика обычное дело – многократно упоминать на лекции яркого студента. Была идея блестящей или безумной, для меня было естественно предполагать, что она исходит от более крупного ученого.

В тот вечер я был глубоко не прав с этим допущением. Мы с Оге и еще несколько преподавателей физического факультета позвали Денниса на ужин в замечательный итальянский ресторан в квартале «Маленькая Италия». За едой Деннис все рассказал нам о своем замечательном студенте.

На самом деле Стивен вовсе не был студентом. Когда Деннис говорил о «своем студенте Хокинге», это было примерно в том смысле, в котором гордый отец нобелевского лауреата может говорить «мой мальчик». К 1974 году Стивен был восходящей звездой в мире общей теории относительности. Он и Роджер Пенроуз сделали огромный вклад в эту науку. Лишь в силу моего глубокого Неведения я мог подумать о нем как об обычном студенте у знаменитого научного руководителя.

Под добрую итальянскую еду и отличное вино я слушал потрясающую историю, удивительнее всякого вымысла, о молодом гении, который прославился лишь после того, как у него выявили неизлечимое изнурительное заболевание. Блестящий, но невыразимо эгоцентричный и поверхностный аспирант – Деннис говорил, что его чаще можно было увидеть разгуливающим навеселе со своими пьющими приятелями, чем изучающим физику, – Стивен получил диагноз «боковой амиотрофический склероза, или болезнь Лу Герига. Заболевание быстро прогрессировало, и ко времени нашего ужина Хокинг был уже почти полностью парализован. Но, хотя он не мог писать уравнения и был едва способен общаться, он боролся со своим медицинским роком, одновременно блистая фейерверком замечательных идей. Прогноз был печальным. Болезнь Лу Герига – это brutальный убийца, и, по всем расчетам, Стивен уже пару лет как должен был быть мертв. Между тем он вовсе отрывался, радостно (выражение Скиамы) революционизируя физику. Тогда рассказ Денниса о том, как Стивен смело противостоит невзгодам, казался преувеличением. Но, зная Стивена почти двадцать пять лет, я бы сказал, что это очень точное описание.

Стивен и Скиама, они оба были для меня неизвестными величинами, и я понятия не имел, является ли испарение черных дыр небылицей, дикой спекуляцией или гениальной идеей. Вполне могло быть, что я пропустил какую-то важную часть доказательства, пока просвещался по части еврейских законов о туалетной бумаге. Более вероятно, что Деннис просто сообщил вывод Стивена, не поддерживая его техническими обоснованиями. В конце концов, Скиама не был экспертом в передовых методах квантовой теории поля, использованных Хокингом. Как я уже говорил, он не злоупотреблял уравнениями.

Оглядываясь назад, я нахожу странным, что не связал лекцию Скиамы с коротким разговором, который двумя годами ранее состоялся у меня с Ричардом Фейнманом в кафе «Уэст Энд». Мы с Фейнманом тоже рассуждали о том, как черные дыры могут в конце концов распадаться. Но прошло много месяцев, прежде чем я все это соотнес.

## Доказательство Стивена

Стивен, по его собственным словам, сначала не поверил странному выводу, сделанному Якобом Бекенштейном, в то время никому не известным принстонским студентом. Каким образом черные дыры могут обладать энтропией? Энтропия связана с незнанием – незнанием скрытой микроскопической структуры, подобно нашему незнанию точного положения молекул в ванне с теплой водой. Эйнштейновская теория гравитации и решение Шварцшильда для черной дыры ничего не говорят о микроскопических сущностях. Более того, похоже, что в черной дыре просто нет ничего, что можно было бы не знать. Шварцшильдовское решение уравнений Эйнштейна было единственным и точным. Для каждого значения массы и углового момента было одно, и только одно решение, описывающее черную дыру. Именно это имел в виду Джон Уилер, говоря, что «черные дыры не имеют волос». Согласно обычной логике, уникальная конфигурация (вспомните идеальный BMW из главы 7) не должна обладать энтропией. Бекенштейновская энтропия не имела смысла для Хокинга, пока он не изобрел свой собственный способ думать о ней.

Ключом для Хокинга стала температура, а не энтропия. Само по себе существование энтропии не подразумевает, что у системы есть температура<sup>78</sup>. Третья величина, энергия, также входила в уравнения. Связь между энергией, энтропией и температурой отсылает нас к зарождению термодинамики<sup>79</sup> в начале девятнадцатого века. В моде тогда были паровые двигатели, а француза Николя Леонара Сади Карно можно было назвать паровым инженером. Он интересовался очень практичным вопросом: как самым эффективным способом использовать тепло, содержащееся в данном количестве пара, для выполнения полезной работы – как получить максимальный навар с бакса. В данном случае под полезной работой подразумевалось ускорение локомотива, для чего требовалось преобразовывать тепловую энергию в кинетическую энергию большой массы железа.

Тепло – это неорганизованная хаотическая энергия случайного движения молекул. Напротив, кинетическая энергия локомотива организована в форме одновременного синхронизированного движения огромного числа совместно движущихся молекул. Так что задача состояла в том, чтобы превратить определенное количество неорганизованной энергии в организованную. Проблема состояла в том, что никто на самом деле не понимал, что в точности означает «организованная» и «неорганизованная» энергия. Карно первым определил энтропию как меру неорганизованности.

Сам я впервые познакомился с понятием энтропии, будучи студентом-механиком. Ни я сам, ни мои сокурсники не знали ничего о молекулярной теории теплоты, и я готов поспорить, что наш профессор – тоже. Курс «Машиностроение 101: термодинамика для механиков» был настолько путаным, что я, будучи определенно лучшим студентом в группе, ничего не мог понять. Хуже всего дело было с концепцией энтропии. Нам говорили, что если мы что-нибудь немного нагреем, то изменение тепловой энергии, деленное на температуру, даст измерение энтропии. Все это записали, но никто не понял смысла. Для меня это было совершенно невразумительно: «Изменение числа сосисок, деленное на коэффициент кислых щей, называется белорожальностью»<sup>80</sup>.

Частью этой проблемы было мое полное непонимание температуры. Согласно моему профессору, температура – это то, что измеряется термометром. «Да, – мог бы спросить я, – но *что* это такое?» Я совершенно уверен, что ответом было бы: «Я уже сказал вам; это то, что измеряется термометром».

Определять энтропию через температуру – это запрягать телегу впереди лошади. Хотя мы и правда обладаем врожденным чувством температуры, более абстрактные концепции

<sup>78</sup> Теоретически можно вообразить систему, которая переупорядочивается без изменения энергии, но в реальном мире такого никогда не бывает.

<sup>79</sup> Термодинамика – учение о теплоте.

<sup>80</sup> В оригинале: «The change in the number of sausages divided by the onionization is called the floogelweiss.» – Примем, tiepee.



энергии и энтропии гораздо фундаментальнее. Профессор должен был сначала объяснить, что энтропия – это мера скрытой информации и выражается в битах. А затем он мог переходить к утверждению (корректному):

*Температура – это прирост энергии системы при добавлении одного бита энтропии*<sup>81</sup>.

Изменение энергии при добавлении одного бита? Это же в точности то, что вычислил для черной дыры Бекенштейн. Похоже, он, сам того не осознавая, подсчитал температуру черной дыры.

Хокинг немедленно заметил упущение Бекенштейна, но мысль о том, что черная дыра имеет температуру, показалась Стивену столь абсурдной, что его первой реакцией было отбросить как недоразумение энтропию вместе с температурой. Возможно, отчасти причиной этого отторжения было то, что смехотворной идеей казалось испарение черной дыры. Я точно не знаю, что заставило Стивена передумать, но он это сделал. Используя сложнейшую математику квантовой теории поля, он нашел собственный способ доказать, что черные дыры излучают энергию.

Термин «квантовая теория поля» отражает замешательство, возникшее при открытии Эйнштейном фотонов. С одной стороны, Максвелл убедительно доказал, что свет – это волнообразное возмущение электромагнитного поля. Он и другие рассматривали пространство как нечто, способное колебаться, почти как студень в миске. Гипотетический студень называли светоносным эфиром, и, как по студню, под действием вибрации (например, от дрожащей вилки) по нему распространялись возмущения. Максвелл представлял себе колеблющиеся электрические заряды, распределенные по эфиру и излучающие световые волны. Эйнштейновские фотоны запутали все более чем на двадцать лет, пока Поль Дирак не применил наконец мощный математический аппарат квантовой механики к волнообразным колебаниям электромагнитного поля.

Для Хокинга самым важным следствием квантовой теории поля была идея о том, что электромагнитное поле подвержено «квантовой дрожи» (см. главу 4) даже в отсутствие возмущающих его зарядов. В пустом пространстве электромагнитное поле мерцает и колеблется за счет *вакуумных флуктуаций*. Почему мы не чувствуем этих вибраций в пустом пространстве? Вовсе не потому, что они очень слабые. На самом деле колебания электромагнитного поля в небольшой области пространства чрезвычайно сильны. Но поскольку пустое пространство обладает меньшей энергией, чем что-либо иное, энергия квантовых флуктуаций никаким способом не может передаться нашим телам.

В природе существует и другой тип дрожания, который *очень* заметен, – это тепловая дрожь. В чем разница между котлом холодной воды и котлом горячей воды? В температуре, скажете вы. Но это просто способ сказать, что горячая вода ощущается как горячая, а холодная – как холодная. В действительности различие состоит в том, что горячая вода обладает большей энергией и энтропией – котел заполнен хаотически, беспорядочно движущимися молекулами, за которыми очень трудно уследить. Это движение не имеет никакого отношения к квантовой механике и вовсе не является малозаметным. Суньте палец в котел, и вы без проблем заметите тепловые флуктуации.

Беспорядочное тепловое движение отдельных молекул нельзя увидеть, поскольку молекулы воды слишком малы, но прямые следствия теплового дрожания нетрудно заметить. Как я уже упоминал, частицы пылицы, находящиеся в стакане теплой воды, будут беспорядочно дергаться, совершая броуновское движение, которое никак не связано с квантовой механикой. Эта теплота, содержащаяся в воде, заставляет ее молекулы беспорядочно бомбардировать частицы пылицы. Если опустить палец в стакан, та же беспорядочная бомбардировка вашей кожи возбудит нервные окончания и вызовет ощущение теплой воды. Кожа и нервы при этом поглощают немного энергии из окружающей среды.

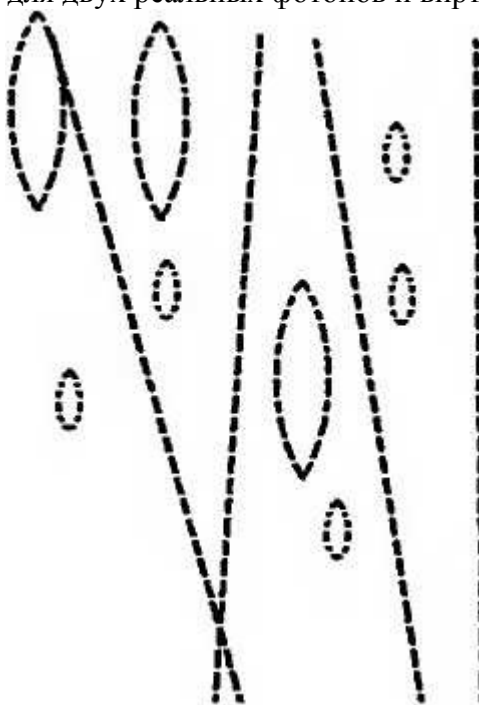
---

<sup>81</sup> Строго говоря, это температура (отсчитываемая от абсолютного нуля), помноженная на постоянную Больцмана. Эта постоянная – не что иное, как переводной коэффициент, который физики часто делают равным единице выбором соответствующей шкалы температур.

Даже в отсутствие воды, воздуха и любого другого вещества чувствительные к теплу нервы могут возбуждаться тепловыми вибрациями излучения черного тела. В этом случае нервы получают тепло из окружающей среды, поглощая фотоны. Но это возможно, только если температура выше абсолютного нуля. При абсолютном нуле квантовая дрожь электрического и магнитного полей куда более трудноуловима и не имеет столь очевидных проявлений.

Два типа дрожи – тепловая и квантовая – очень разные, и в обычных условиях их между собой не перепутаешь. Квантовые флуктуации – это неотъемлемое свойство вакуума, и от них нельзя избавиться, тогда как тепловые флуктуации возникают от избытка энергии. Хитрость квантовых флуктуаций – почему мы их не ощущаем и в чем их отличие от тепловых флуктуаций – лежит на грани объяснимого в книге, в которой стараешься избегать сложной математики; любая аналогия или картинка, которую я использую, будет логически некорректна. Но какое-то объяснение необходимо, если вы хотите уловить, каковы были ставки в Битве при черной дыре. Только не забывайте предупреждение Фейнмана относительно объяснения квантовых явлений (см. с. 85).

Квантовая теория поля предлагает способ визуализации двух типов квантовых флуктуаций. Тепловые флуктуации связаны с присутствием *реальных фотонов*, бомбардирующих нашу кожу и передающих ей энергию. Квантовые флуктуации вызваны парами виртуальных фотонов, которые возникают, а затем быстро вновь поглощаются вакуумом. Вот фейнмановская диаграмма пространства-времени – время по вертикали, пространство по горизонтали – для двух реальных фотонов и виртуальных пар.



*Реальные фотоны* – это прямые пунктирные линии. Их присутствие указывает на теплоту и тепловую дрожь. Но если пространство находится при абсолютном нуле, реальных фотонов не будет. Остаются лишь микроскопические петли виртуальных фотонов, которые быстрыми вспылками обретают и утрачивают существование. Пары виртуальных фотонов составляют часть вакуума – того, что мы называем пустым пространством, – даже когда температура равна абсолютному нулю.

В обычных условиях два типа дрожи нельзя спутать. Однако горизонт черной дыры – вещь необычная. Вблизи горизонта эти два типа флуктуаций начинают смешиваться таким способом, которого никто никогда не ожидал. Чтобы получить представление о том, как это происходит, вообразите Алису, свободно падающую в черную дыру в среде, имеющей температуру абсолютного нуля, – в абсолютном вакууме. Она окружена парами виртуальных фотонов, но она их не замечает. Реальных фотонов вокруг нее нет.

Теперь рассмотрим Боба, который висит над горизонтом. Для него все сильно запутывается. Некоторые пары виртуальных фотонов – те, что не замечает Алиса, – могут частично находиться внутри горизонта, а частично вовне. Но частица, находящаяся за горизонтом, лишена всякой связи с Бобом. Он видит лишь один фотон и не может распознать, что он принадлежит виртуальной паре. Верите вы или нет, но такой фотон, застрявший вовне, в то время как его партнер оказался за горизонтом, будет воздействовать на Боба и его кожу в точности так же, как если бы это был обычный тепловой фотон. Вблизи горизонта разделение теплового и квантового зависит от наблюдателя: то, что Алиса воспринимает (или не воспринимает) как квантовый шум, Боб регистрирует как тепловую энергию. В случае черной дыры тепловые и квантовые флуктуации становятся двумя сторонами одной медали. Мы вернемся к этому вопросу в главе 20, когда будем рассматривать Алисин самолет.

Опираясь на математику квантовой теории поля, Хокинг рассчитал, что флуктуации вакуума в присутствии черной дыры приводят к испусканию фотонов, в точности как если бы горизонт черной дыры был горячим черным телом. Эти фотоны называются *хокинговским излучением*. Самое интересное, что черная дыра излучает так, как будто ее температура примерно равна той, что получилась бы из доказательства Бекенштейна, если бы сам Бекенштейн сделал этот вывод. В действительности Хокинг пошел дальше Бекенштейна; его методы оказались столь аккуратны, что позволили вычислить точную температуру, а по ней и энтропию черной дыры. Бекенштейн утверждал лишь, что энтропия пропорциональна площади горизонта, измеренной в планковских единицах. Хокингу уже не требовалось использовать неопределенный термин «пропорциональна». Согласно его расчетам, энтропия черной дыры в точности равна одной четверти площади горизонта, измеренной в планковских единицах.

Кстати, выведенное Хокингом уравнение для температуры черной дыры как раз и было на доске, когда я пришел на лекцию Скиамы:

$$T = \frac{1}{16\pi^2} \times \frac{c^3 h}{GMk}.$$

Обратите внимание, что в формуле Хокинга масса черной дыры стоит в знаменателе. Это значит, что чем больше масса, тем холоднее черная дыра, и наоборот: чем меньше масса, тем черная дыра теплее.

Давайте применим эту формулу к какой-нибудь черной дыре. Вот значения всех постоянных<sup>82</sup>:

$$c = 3 \times 10^8$$

$$G = 6,7 \times 10^{-11}$$

$$h = 7 \times 10^{-34}$$

$$k = 1,4 \times 10^{-23}.$$

Рассмотрим случай звезды с массой в пять раз больше солнечной, которая в конечном счете коллапсирует в черную дыру. Ее масса в килограммах будет:

$$M = 10^{31}.$$

Если подставить все эти числа в формулу Хокинга, получится, что температура черной дыры составляет  $10^{-8}$  градусов Кельвина. Это очень низкая температура – всего десять миллиардных градуса над абсолютным нулем! В природе нет ничего столь холодного. Межзвездное и даже межгалактическое пространство намного теплее.

Еще более холодные черные дыры находятся в центрах галактик. Будучи в миллиард раз массивнее звездных черных дыр, они в миллиард раз больше и в миллиард раз холоднее. Но можно представить себе и гораздо меньшие черные дыры. Допустим, какой-то катаклизм

---

<sup>82</sup> Все значения выражены в метрах, секундах, килограммах и градусах Кельвина. Градусы шкалы Кельвина такие же, как и на шкале Цельсия, но температура отсчитывается от абсолютного нуля, а не от точки замерзания воды. Обычная комнатная температура составляет 300 градусов Кельвина.

сжал Землю. Ее масса примерно в миллион раз меньше массы звезды. Получившаяся черная дыра будет иметь колоссальную температуру – около 0,01 градуса над абсолютным нулем: намного теплее звездной черной дыры, но все равно ужасно холодно – холоднее жидкого гелия и намного холоднее замерзшего кислорода. Черная дыра с массой Луны разогреется уже до 1 градуса Кельвина.

Но рассмотрим теперь, что происходит, когда черная дыра испускает хокинговское излучение и испаряется. По мере уменьшения массы черная дыра сжимается, а ее температура растет. Со временем черная дыра становится горячей. К тому моменту, когда ее масса становится с большой валун, температура вырастет до миллиарда миллиардов градусов. А при достижении планковской массы температура поднимется до  $10^{32}$  градусов. Единственное место и время, когда во Вселенной могла быть подобная температура, – это самое начало Большого взрыва.

Расчеты Хокинга, показывающие, как испаряются черные дыры, – это настоящее чудо изобретательности. Я думаю, что к тому времени, когда их следствия будут вполне поняты, физики станут рассматривать их как начало великой научной революции. Еще слишком рано точно предсказывать, чем обернется эта революция, но она затронет очень глубокие вопросы: природу пространства-времени, роль элементарных частиц и загадки происхождения Вселенной. Ученые задаются вопросом: принадлежит ли Хокинг к числу величайших физиков всех времен и каково его место в этой иерархии. Тем, кто сомневается в величии Хокинга, я просто предлагаю прочитать его статью 1975 года «Рождение частиц черными дырами».

Но как бы Стивен Хокинг ни был велик, по крайней мере однажды он сбился с пути, и именно с этого началась Битва при черной дыре.

## **Часть II**

### **Неожиданная атака**

#### **10**

#### **Как Стивен потерял свои биты и не знал, где их найти**

*В моем изложении событий есть что-то неправдоподобное – следовательно, я допустил ошибку.*

*– Шерлок Холмс<sup>83</sup>*

В газетах порой пишут, что иракская война тянулась дольше Второй мировой. Журналисты, конечно, имели в виду, что война в Ираке была продолжительнее периода активного участия Америки во Второй мировой войне, которая началась осенью 1939 года и закончилась лишь в 1945-м. Американцы склонны забывать, что ко времени атаки на Перл-Харбор шел уже третий год войны.

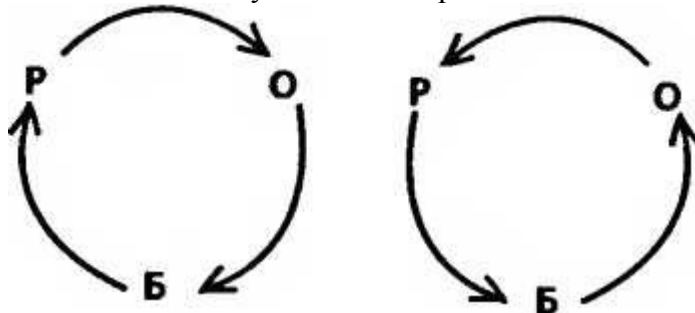
Возможно, я допускаю ту же эгоцентричную ошибку, говоря, что Битва при черной дыре завязалась в 1983 году, в мансарде у Вернера Эрхарда. Атака Стивена на самом деле началась в 1976 году, однако не бывает сражения без противника. Его нападение было в основном проигнорировано, хотя это и была прямая атака на один из самых надежных принципов физики – закон, утверждающий, что информация никогда не исчезает, или, в краткой форме, закон сохранения информации. Ввиду его исключительной важности для всего дальнейшего изложения давайте рассмотрим закон сохранения информации еще раз.

#### **Информация навсегда**

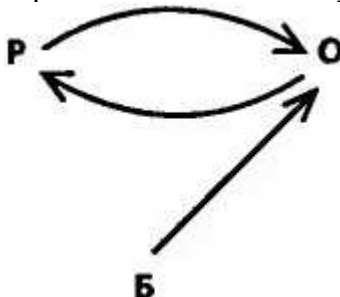
---

<sup>83</sup> Из рассказа «Случай в интернате», цит. по: Артур Конан Дойл. Записки о Шерлоке Холмсе. – М.: АСТ; Хранитель, 2007.

Что означает уничтожение в применении к информации? В классической физике ответ прост: информация уничтожается, если в будущем теряются следы прошлого. Как ни удивительно, это может происходить даже в случае детерминистических законов. Чтобы показать это, давайте вернемся к трехсторонней монете, с которой мы играли в главе 4. Три стороны монеты обозначались Р, О и Б (решка, орел и боковая сторона). В той главе два детерминистических закона я описал следующими диаграммами:



Оба закона обладают свойством детерминистичности, так что, каково бы ни было состояние монеты, можно с полной уверенностью указать ее следующее и предыдущее состояния. Сравним это с законом который описывается следующей диаграммой:



или формулой  
 $R=O \quad O=R \quad B=O$

В словесной формулировке: если в один момент монета лежит решкой, то в следующее мгновение она ляжет орлом. Если она лежит орлом, то ляжет решкой. Если же она лежит на боку, то в следующий момент ляжет орлом. Данное правило совершенно детерминистично: с чего бы вы ни начали, будущее предопределено этим законом. Допустим, к примеру, начальное состояние было Б. Дальнейшая История полностью предопределена: БОРОРОРОР О... Если мы начнем с Р, то история будет: РОРОРОРОРОР О... Если же в начале будет О, то мы получим историю: ОРОРОРОРОР О...

С этим законом что-то не так, но что именно? Как и другие детерминистические законы, он полностью предопределяет будущее.

Но если попытаться определить прошлое, ничего не получится. Допустим, мы обнаружили монету в состоянии Р. Можно быть уверенными, что предыдущим состоянием было О. Пока все хорошо. Но попробуем сделать еще один шаг в прошлое. Имеются два состояния, которые ведут к О, а именно Р и Б. Это создает проблему: получили мы О из Р или из Б? Узнать это невозможно. Вот это я и называю потерей информации, но в классической физике такого никогда не случается. Математические правила, на которых строятся законы Ньютона и максвелловская теория электромагнетизма, не оставляют сомнений: за каждым состоянием следует единственное состояние, и предшествует ему также единственное.

Другой путь, на котором может теряться информация, связан с наличием в законе доли неопределенности. В этом случае нельзя быть полностью уверенным ни в будущем, ни в прошлом.

Как я уже объяснял, квантовая механика включает элемент случайности, но в более глубоком смысле информация в ней никогда не теряется. Я проиллюстрировал это на примере с фотоном в главе 4, давайте сделаем это снова, на этот раз на примере электрона, сталкивающегося с неподвижной мишенью вроде тяжелого ядра. Электрон подлетает слева,

двигаясь в горизонтальном направлении.



Он сталкивается с ядром и рассеивается в некотором непредсказуемом новом направлении. Хороший квантовый теоретик рассчитает вероятность того, что электрон отскочит, например, в перпендикулярном направлении, но не сможет надежно это направление предсказать.

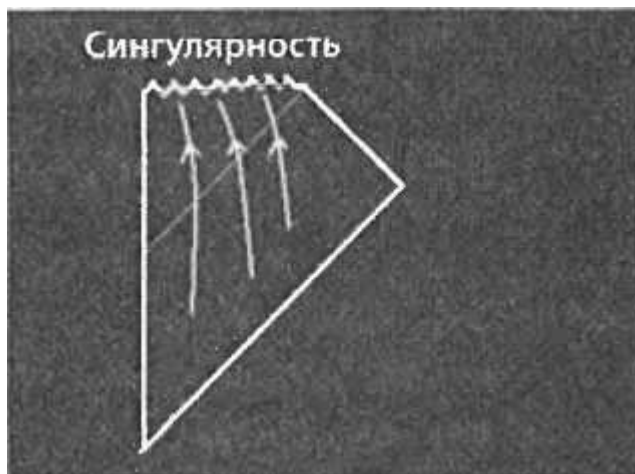
Есть два способа проверить, сохраняется ли информация о начальном движении. Оба они включают запуск электрона назад под управлением обращенных вспять законов.

В первом случае наблюдатель проверяет, где находится электрон непосредственно перед обращением закона. Это можно сделать разными способами, в большинстве из которых в качестве зондов служат фотоны. Во втором случае наблюдатель не беспокоится о проверке; он просто реверсирует закон, никак не вмешиваясь в поведение электрона. Результаты этих двух экспериментов разделяются радикально. В первом случае электрон, двинувшись назад, оказывается в итоге в случайном месте и движется в непредсказуемом направлении. Во втором случае, когда проверка не выполнялась, электрон в конце возвратной последовательности всегда оказывается движущимся назад в горизонтальном направлении. Когда наблюдатель в первый раз после начала эксперимента посмотрит на электрон, он обнаружит, что тот движется точно так же, как в начале, только в обратную сторону. Похоже, что информация теряется лишь тогда, когда мы активно взаимодействуем с электроном. В квантовой механике до тех пор, пока мы не взаимодействуем с системой, информация, которую она несет, остается столь же нерушимой, как и в классической физике.

### Атака Стивена

Нелегко найти две более мрачные физиономии, чем были у меня и Герарда 'т Хоофта в тот день в Сан-Франциско в 1983 году. Высоко над Франклин-стрит в мансарде Вернера Эрхарда была объявлена война и совершено открытое нападение на наши самые глубокие убеждения. Стивен Наглец, Стивен Храбрец, Стивен Разрушитель располагал всем тяжелым вооружением, а его ангельская/демоническая улыбка показывала, что он об этом знает.

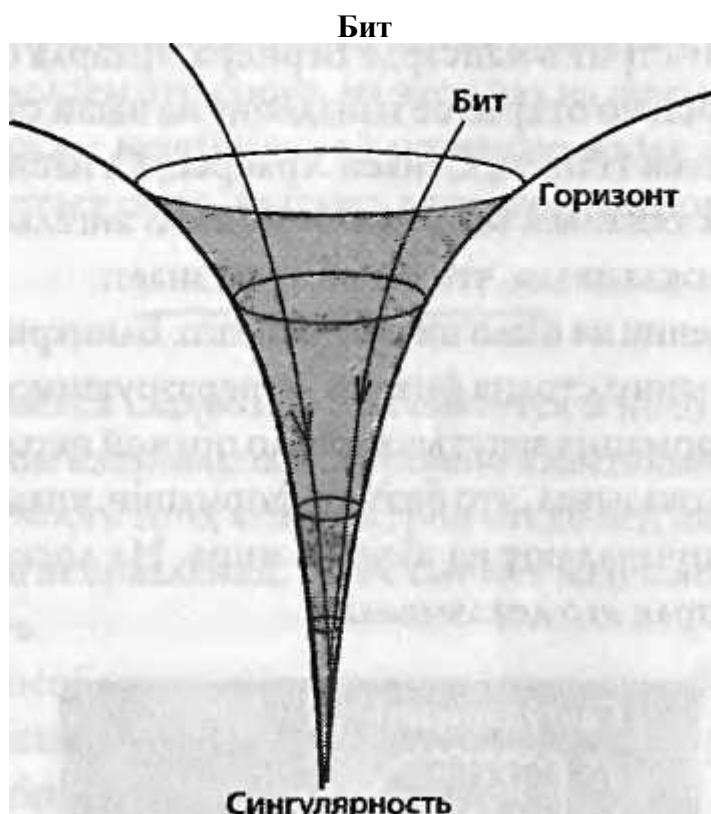
В этом нападении не было ничего личного. Блицкриг был нацелен против центрального столпа физики – неразрушимости информации. Часто информация запутывается до полной нераспознаваемости, но Стивен доказывал, что биты информации, упавшие в черную дыру, навсегда пропадают из нашего мира. На доске у него была диаграмма, которая это доказывала.



В ходе своих блестящих исследований геометрии пространства-времени Роджер Пенроуз изобрел способ визуального представления всего пространства-времени на одной

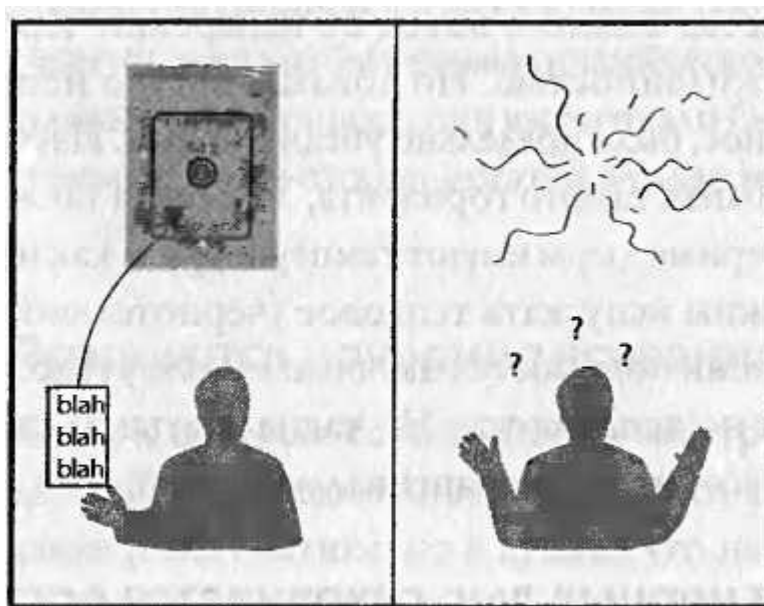
доске или одном листе бумаги. Даже если пространство-время бесконечно, Пенроуз искажал его, сжимая при помощи хитрых математических приемов, так чтобы оно целиком умещалось в конечной области. Диаграмма Пенроуза, нарисованная на доске в особняке Вернера, изображала черную дыру с битами информации, падающими за горизонт. Горизонт был показан диагональной линией, и как только бит ее пересекал, он не мог вырваться назад, не превышая скорости света. Диаграмма также показывала, что каждый такой бит обречен попасть в сингулярность.

Диаграммы Пенроуза – необходимый инструмент теоретических физиков, но для их понимания нужна небольшая подготовка. Вот более знакомая картина, представляющая ту же самую черную дыру.



Идея Стивена была проста. Биты проваливаются в черную дыру, подобно метафорическим головастикам из главы 2, которые по беспечности попадают за точку невозврата.

Но не тот факт, что биты информации могут навсегда скрыться за горизонтом, так беспокоил нас с 'т Хоофтом. Падение информации в черную дыру ничем не хуже ее запирания в очень надежном сейфе. Здесь же происходило нечто более зловещее. Возможность спрятать информацию в сейфе вряд ли станет поводом для беспокойства, но что, если после закрытия двери сейф прямо на ваших глазах испарится? Именно это предсказывал Хокинг для черных дыр.



К 1983 году я уже давно связал испарение черных дыр и наш разговор с Ричардом Фейнманом в кафе «Уэст Энд» в 1972 году. Сама мысль о том, что черные дыры могут в итоге распасться на элементарные частицы, совершенно меня не тревожила. Но вот утверждение Стивена вызвало у меня недоверие: *когда черная дыра испаряется, захваченные ею биты информации исчезают из нашей Вселенной. Информация не зашумляется. Она необратимо и навечно уничтожается.*

Стивен со счастливым видом танцевал на могиле квантовой механики, а мы с 'т Хоофтом пребывали в полном замешательстве. Для нас подобная идея ставила под угрозу все законы физики. Попытка соединить общую теорию относительности с законами квантовой механики казалась чем-то вроде крушения столкнувшихся поездов.

Я не в курсе, знал ли 'т Хоофт о радикальной идее Стивена до встречи в мансарде у Вернера, но сам я впервые услышал о ней Именно там. Как бы то ни было, идея к тому времени уже не была Новой. Стивен разработал свои аргументы несколькими годами Ранее в опубликованных статьях и выполнил хорошую домашнюю работу. Он уже рассмотрел и отмел все возражения, которые я мог придумать, чтобы избежать его «информационного парадокса». Рассмотрим четыре из них.

## **1. Черные дыры на самом деле не испаряются**

Для большинства физиков вывод об испарении черных дыр был большой неожиданностью. Но доказательство испарения, хотя и весьма сложное, было предельно убедительным. Изучая квантовые флуктуации вблизи самого горизонта, Хокинг (а также Билл Унру) доказал, что черные дыры имеют температуру и, как и все нагретые объекты, должны испускать тепловое (чернотельное) излучение. Время от времени появляются научные статьи, утверждающие, что черные дыры не испаряются. Но такие статьи быстро теряются в огромной мусорной куче маргинальных идей.

## **2. От черных дыр сохраняется остаток**

Хотя испарение черных дыр казалось твердо установленным, было также ясно, что по мере испарения они становятся горячее и меньше. В какой-то момент испаряющаяся черная дыра станет такой горячей, что будет излучать частицы чрезвычайно высокой энергии. В финальной вспышке испарения они будут иметь энергию, далеко превосходящую все, с чем мы когда-либо сталкивались. Об этом последнем вздохе известно очень мало. Возможно, черная дыра прекратит испаряться, когда достигнет планковской массы (то есть массы пылинки). К этому моменту ее радиус будет равен планковской длине, и никто не может



сказать, что случится потом. Есть такая логическая возможность, что черная дыра прекратит испарение и от нее сохранится остаток – крошечный информационный сейф, содержащий всю захваченную информацию. Согласно этой идее, каждый бит информации, который когда-либо упал в черную дыру, остается плотно запечатанным в этом невообразимо малом сейфике. Крошечный планковский остаток обладал бы тогда фантастическими свойствами: он был бы неизмеримо малой частицей, в которой может скрываться любое количество информации.

Хотя идея остатка была популярной альтернативой разрушению информации (на самом деле куда более популярной, чем правильная идея), она никогда меня не привлекала. Она выглядит как уловка для ухода от вопроса. Но это не только вопрос вкуса. Частица, способная скрывать бесконечное количество информации, обладала бы бесконечной энтропией. Существование таких бесконечно энтропийных частиц привело бы к термодинамической катастрофе: возникая в тепловых флуктуациях, они вытягивали бы всю теплоту из любой системы. На мой взгляд, остатки нельзя рассматривать всерьез.

### 3. Рождаются дочерние вселенные

Время от времени я получаю сообщения по электронной почте, которые всегда начинаются однотипно: «Я не ученый и слабо разбираюсь в физике и математике, но я думаю, что нашел решение проблемы, над которой вы и Хикинс... – иногда пишут «Хокинге», а порой «Хоскинс» –...работаете». Решение, предлагаемое в этих сообщениях, – это почти всегда *дочерние вселенные*. Где-то глубоко внутри черной дыры кусок пространства распадается и образует крошечную самодостаточную вселенную, отделенную от нашей области пространства-времени. (Я всегда представляю себе воздушный шарик с гелием, выскользнувший и улетевший.) Автор обычно доказывает, что вся информация, когда-либо упавшая в черную дыру, попадает в дочернюю вселенную. Это решает проблему: информация не уничтожается; она просто утекает куда-то в гиперпространство, надпространство, метапространство, или куда там деваются дочерние вселенные. Наконец, когда черная дыра Испаряется, разлом в пространстве заживаем, и, будучи отделенными! попавшие в переделку биты становятся абсолютно ненаблюдаемыми.

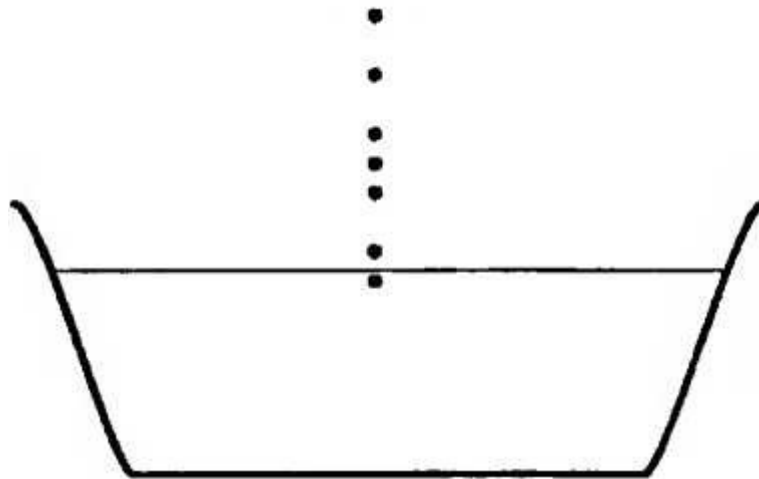
Дочерние вселенные – возможно, и не совсем глупая идея, особенно если допустить, что эти дочки вырастают. Наша Вселенная сама расширяется. Возможно, каждая дочерняя вселенная тоже Расширяется и в конце концов созревает до полноценной вселенной с галактиками, звездами, планетами, собаками, кошками, людьми и своими собственными черными дырами. Но в качестве решения проблемы потерянной информации это просто бездоказательный уход от темы. Физика занимается наблюдениями и экспериментированием. Если дочерние вселенные уносят информацию, которая становится ненаблюдаемой, то для нашего мира результат будет точно такой же, как если бы информация уничтожалась, со всеми неприятными последствиями такого уничтожения<sup>84</sup>.

### 4. Вариант с ванной

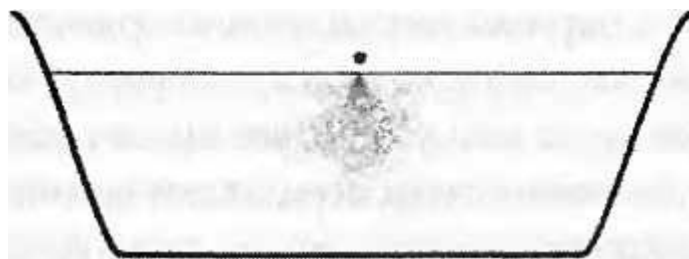
Данный вариант был наименее популярным возражением против хокингской идеи. Эксперты по черным дырам и общей теории относительности отвергали его как «бьющий мимо цели». Тем не менее это была единственная возможность, которая имела смысл для меня. Представьте себе капли чернил, падающие в ванну с водой и несущие сообщение: буль, буль, кап, буль, кап, пропуск, кап, буль.

---

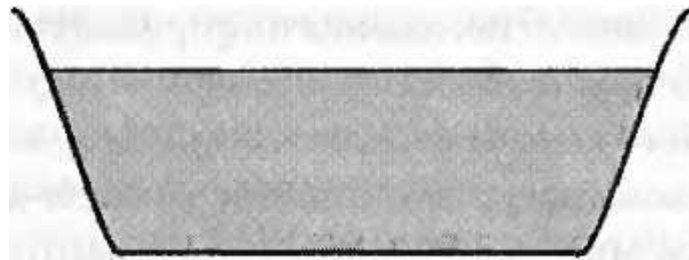
<sup>84</sup> Как я кратко упоминал в главе 1, самое неприятное из этих последствий состоит в том, что потеря информации подразумевает увеличение энтропии, а это, в свою очередь, означает выработку тепла. Мы с Бэнском и Пескином показали, что квантовые флуктуации будут тогда превращаться в тепловые и мир почти мгновенно разогреется до невероятно высокой температуры.



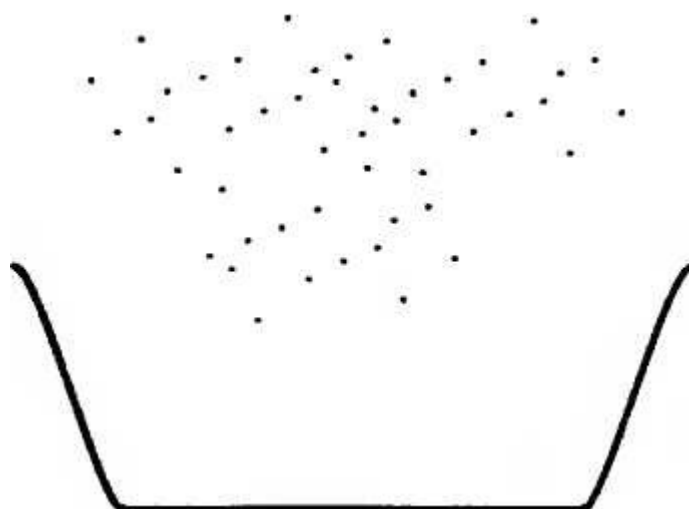
Очень быстро четко оформленные капли начинают растворяться, прочитать сообщение становится все труднее, а по воде расплываются чернильные облака.



Спустя несколько часов остается лишь ванна, заполненная однородной, чуть сероватой водой.



Хотя с практической точки зрения сообщение безнадежно зашумлено, принципы квантовой механики утверждают, что оно по-прежнему присутствует в хаосе огромного числа движущихся молекул. Но вскоре жидкость начинает испаряться из ванны. Молекула за молекулой, чернила и вода улетают в пустое пространство, оставляя ванну пустой и сухой. Информация исчезает, но уничтожается ли она? Хотя она зашумлена настолько, что нет никакой практической возможности ее восстановить, ни один бит информации не пропал. Что с ней случилось, вполне очевидно: она была унесена продуктами испарения, облаком молекул, улетевших в пространство.



Возвращаясь к черным дырам, рассмотрим, что происходит с провалившейся в них информацией при их испарении. Если черная дыра чем-то похожа на ванну, то ответ будет таким же: все биты информации в конечном счете передаются фотонам или другим частицам, уносящим энергию черной дыры. Другими словами, информация сохраняется среди многочисленных частиц, составляющих хокинговское излучение. Мы с 'т Хоофтом были убеждены, что так оно и есть. Но практически никто из специалистов по черным дырам нам не верил.

Есть и другой способ понимания информационного парадокса Стивена. Вместо того чтобы позволить черной дыре исчезнуть, мы будем, по мере того как она испаряется, подкармливать ее новыми предметами – компьютерами, книгами, компакт-дисками – как раз в таком темпе, чтобы не позволять ей уменьшаться. Иначе говоря, мы будем восполнять черной дыре ее потери бесконечным потоком информации, чтобы предотвратить ее уменьшение. Согласно Хокингу, черная дыра, хотя и не растет (она испаряется по мере того, как мы ее подкармливаем), информацию заглатывает как будто бы без всяких ограничений.

Все это напоминает любимый мной в детстве цирковой номер. Больше всего мне нравились клоуны, а из всех их номеров наиболее впечатлял меня фокус с клоунским вагончиком. Я не знаю, как они это проделывали, но в очень маленькую кабинку втискивалось поразительное число клоунов. Но что, если в вагончик залезает нескончаемый поток клоунов, а обратно никто не выходит? Это же не может продолжаться бесконечно, правда? Клоунская емкость любого вагона конечна, и когда она целиком заполнена, то хоть что-то – может, клоуны, а может, сосиски – должно начать выходить обратно.

Информация как клоуны, а черные дыры – как их вагончик. Для черной дыры данного размера есть предельное число битов, которое она может содержать. Вы уже можете догадаться, что этот предел есть энтропия черной дыры. Если черная дыра подобна другим объектам, то, когда емкость заполнена, либо дыра должна начать расти, либо информация должна начать просачиваться наружу. Но как она может просачиваться, если горизонт на самом деле является точкой невозврата?

Неужели Стивен был так бестолков и не видел, что хокинговское излучение может содержать скрытую информацию? Конечно нет. Несмотря на свою молодость, Стивен знал о черных дырах по крайней мере не меньше, чем кто-либо другой, и намного больше, чем я. Он очень глубоко продумал аналогию с ванной и нашел серьезное основание, чтобы ее отвергнуть.

Геометрия шварцшильдовской черной дыры к середине 1970-х годов была полностью ясна. Всякий, кто был в теме, рассматривал горизонт в качестве точки невозврата. И как в аналогии со сточным отверстием, эйнштейновская теория предсказывала, что всякий, кто по неосторожности пересечет горизонт, не заметит при этом ничего особенного: горизонт – это математическая поверхность, не имеющая физического воплощения.

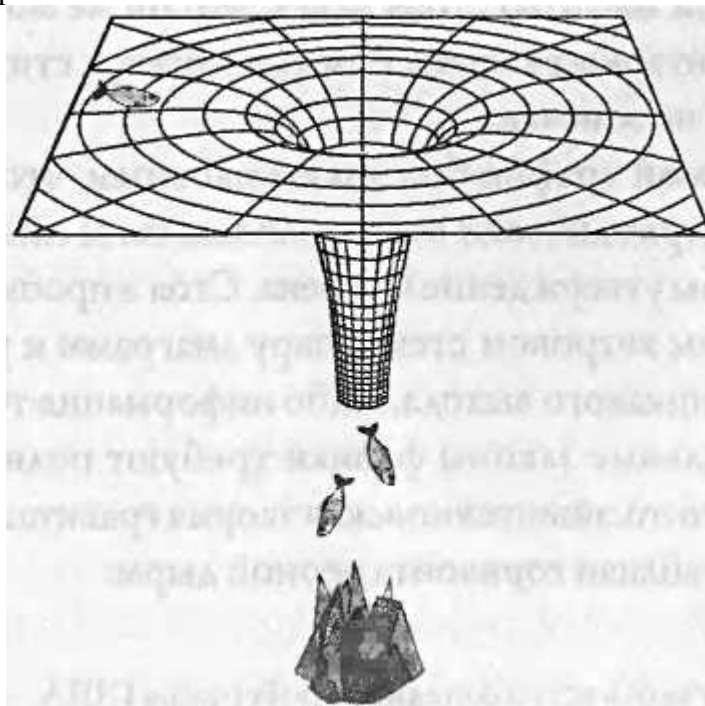
В души релятивистов были внедрены следующие два важнейших факта.

♦ На горизонте нет препятствий, способных помешать объекту его пересечь и попасть

внутри черной дыры.

♦ Ничто: ни фотон, ни какого-либо типа сигнал – не может вернуться назад из-за горизонта. Чтобы это сделать, понадобилось бы превысить скорость света, а это, согласно Эйнштейну, невозможно.

Чтобы максимально все это прояснить, вернемся к бесконечному озеру из главы 2 с опасным стоком в центре.



Рассмотрим бит информации, плывущий по течению. Пока он не прошел точку невозврата, его еще можно вернуть назад. Но возле этой точки нет никакого предупреждения; бит проплывет мимо нее, и как только это случится, он не сможет вернуться, не превышая ограничение скорости. Теперь бит навсегда потерян.

Математика общей теории относительности не оставляла сомнений относительно горизонтов черных дыр. Это были просто ничем не отмеченные точки невозврата, не создающие никаких препятствий для падающих объектов.

Такое понимание глубоко укоренилось в сознании всех теоретиков. Именно по этой причине Хокинг был уверен, что биты не только проваливаются сквозь горизонт, но также навсегда теряются для внешнего мира. Открыв, что черные дыры испаряются, Стивен заключил, что информация не может уходить вместе с этим излучением. Она должна оставаться – но где? После испарения черной дыры не будет никакого места, где она могла бы скрываться.

Я покидал Вернера в дурном настроении. По меркам Сан-Франциско было очень холодно, я был в легкой куртке, не помнил, где припарковал машину, и очень злился на своих коллег. Перед уходом я попытался обсудить с ними аргументы Стивена и был удивлен явным отсутствием любопытства и обеспокоенности. Группа состояла в основном из физиков-ядерщиков, которые не особо интересовались гравитацией. Как и Фейнман, они считали, что планковский масштаб столь далек, что он не может влиять на свойства элементарных частиц. Рим был в огне, и гунны – у ворот, но никто этого не замечал.

По пути домой трафик был таким плотным, что движение на 101-м шоссе<sup>85</sup> периодически останавливалось. Я никак не мог выкинуть из головы утверждение Стивена. Стоя в пробке, я нарисовал на заиндевевшем ветровом стекле пару диаграмм и уравнений, но так и не нашел никакого выхода. Либо информация теряется, и тогда фундаментальные законы физики требуют полнейшего пересмотра, либо что-то эйнштейновская теория гравитации совершенно не работает вблизи горизонта черной дыры.

---

85 Шоссе 101 идет вдоль всего Западного побережья США. – Примеч. перев.

Как воспринял все это 'т Хоофт? Я бы сказал, очень ясно. Его неприятие хокинговских заявлений было несомненным. Точку зрения Герарда я опишу в следующей главе, но сначала надо объяснить смысл S-матрицы, его самого сильного оружия.

## 11

### Датское сопротивление

Давайте начнем с одной долгой истории, причем случившейся не с нами, а с некой планетной системой, центральная звезда которой в десять раз тяжелее Солнца. Эта система не всегда была планетной; она берет начало в гигантском облаке газа, в основном из атомов водорода и гелия, но с примесью всех остальных элементов периодической таблицы. Вдобавок там есть свободные электроны и ионы. Иными словами, все начинается с очень разреженного облака частиц.

И тут за дело берется гравитация. Облако начинает само себя притягивать. Под действием собственного веса оно сжимается, и в этом процессе гравитационная потенциальная энергия превращается в кинетическую. Частицы движутся все быстрее, тогда как пространство между ними уменьшается. Уплотняясь, облако разогревается, пока наконец не станет настолько горячим, чтобы зажечься и стать звездой. Однако звезда захватывает не весь газ; кое-что остается на орбите и сжимается в планеты, астероиды, кометы и прочий мусор.

Проходит десять миллионов лет, и вот звезда исчерпала запасы водорода. В этот момент начинается короткий – длительностью, возможно, всего несколько сотен тысяч лет – период ее жизни в форме красного сверхгиганта. Наконец она умирает, порождая в катастрофическом, направленном внутрь себя взрыве черную дыру.

Потом медленно, очень медленно черная дыра излучает свою массу. Хокинговское испарение рассеивается в пространстве, унося энергию в форме фотонов и других частиц. Спустя ужасающе долгий отрезок времени – что-то около  $10^{68}$  лет – черная дыра исчезает в финальной вспышке высокоэнергичных частиц. К тому времени планеты давно уже распались на элементарные частицы.

Частицы приходят, и частицы уходят – таков ход истории. Все столкновения элементарных частиц, включая и те, что происходят в лабораториях, начинаются и заканчиваются одинаково: частицы сближаются и затем расходятся, а в промежутке между ними что-то случается. Так почему же долгая история звезды, пусть даже включающая на каком-то этапе черную дыру, фундаментально отличается от *любого* столкновения элементарных частиц? Герард 'т Хоофт как раз и полагал, что никакой разницы нет, и это может быть ключом к объяснению ошибки Хокинга.

Столкновения как атомов, так и элементарных частиц описываются математическим объектом, называемым S-матрицей, где S происходит от слова *scattering* – рассеяние. S-матрица – это гигантская таблица для всех возможных обстоятельств и результатов столкновения с численными значениями, которые можно пересчитать в вероятности. Это, конечно, не таблица, напечатанная в виде толстой книги, а определенная математическая абстракция.

Рассмотрим электрон и протон, которые движутся навстречу друг другу вдоль горизонтальной оси со скоростями соответственно 20 и 4 % от скорости света. С какой вероятностью конечным результатом их столкновения станут электрон, протон и еще четыре фотона? S-матрица – это математическая таблица таких вероятностей (строго говоря, амплитуд вероятности), которая сводит воедино квантовую историю столкновения. 'т Хоофт, как и я, был глубоко убежден, что вся история звезды (газовое облако → планетная система → красный гигант → черная дыра → хокинговское излучение) может быть сведена к единой S-матрице.

Одним из самых важных свойств S-матрицы является *обратимость*. Чтобы помочь разобраться в значении этого термина, я приведу экстремальный пример. Наш мысленный

эксперимент включает столкновение двух «частиц». Одна из них будет довольно необычной. Это не одиночная элементарная частица, а огромное число атомов плутония. Фактически эта крайне опасная частица представляет собой атомную бомбу со столь чувствительным взрывателем, что он может сработать под воздействием одного-единственного электрона.

Другая частица, участвующая в столкновении, как раз и будет электроном. Итак, на входе таблицы S-матрицы мы имеем бомбу и электрон. А что будет на выходе? Хаос. Беспорядочное извержение атомов горячего газа, нейтронов, фотонов и нейтрино. Конечно, настоящая S-матрица будет невероятно сложна. В ней должны быть детально перечислены все образующиеся фрагменты вместе с направлениями и скоростями их движения, а затем указана соответствующая амплитуда вероятности, и так для каждого возможного исхода. Неизмеримо упрощенная версия S-матрицы могла бы выглядеть примерно так:[1]<sup>86</sup>

Вход	Выход			
	электрон, протон и четыре фотона	* * * *	осколки	еще
	электрон, протон и фотон	0,002 + 0,321i		
	*			
	*	Амплитуды вероятности		
	*			
	*			
	*			
	электрон и бомба		0,012 + 0,002i	0,143

Теперь вернемся к обратимости. S-матрица обладает тем свойством, что у нее есть обратная матрица. Это свойство – математическое выражение закона, говорящего о том, что информация никогда не теряется. Обратная S-матрица – это оператор, который возвращает назад изменения, производимые S-матрицей. Другими словами, это в точности то же самое, что я описывал раньше, говоря об *обращении законов*. Обратная S-матрица заставляет все идти в обратную сторону – от выхода к входу. Можно говорить об этом как о развороте направления движения всех результирующих частиц в тем самым об обращении всей системы, как в фильме, запущенном задом наперед. Если по окончании столкновения применить операцию обращения (развернуть все назад), фрагменты станут сближаться и собираться в исходную бомбу, включая все высокоточные цепи и чувствительные механизмы. И, да, конечно, там будет исходный электрон, теперь уже улетающий прочь от бомбы. Иными словами, S-матрица не только предсказывает будущее по прошлому, но также

<sup>86</sup> У настоящей S-матрицы было бы бесконечное число входов и выходов (строк и столбцов), а в каждой ячейке стояло бы комплексное число.

позволяет реконструировать прошлое по будущему. S-матрица – это код, устройство которого гарантирует, что никакая информация никогда не теряется.

Однако такой эксперимент очень сложен. Любая ничтожная ошибка – единственный искаженный фотон – разрушит код. В частности, нельзя подглядывать или иным образом взаимодействовать ни с одной частицей, пока не совершится обращение. В противном случае вместо исходной бомбы и электрона получится еще больший хаос.

Герард 'т Хоофт вступил в Битву при черной дыре под знаменем S-матрицы. Его позиция была совершенно прямолинейной: образование и последующее испарение черной дыры – просто очень сложный пример столкновения частиц. В фундаментальном плане это ничем не отличается от столкновения электрона с протоном в лаборатории. На самом деле если бы удалось в невероятной пропорции увеличить энергию электрона и протона, то их столкновение породило бы черную дыру. Коллапс газового облака – лишь один из способов создания черной дыры. При наличии достаточно большого ускорителя всего из двух частиц можно создать черную дыру, которая затем испарится.

Для Стивена Хокинга тот факт, что S-матрица предполагает сохранение информации, доказывал ошибочность такого описания истории черной дыры. С его точки зрения, точная информация о газовом облаке – состояло ли оно из водорода, гелия или веселящего газа – уходит в сток за точкой невозврата и пропадает, когда черная дыра испаряется. Был исходный газ комковатым или однородным, сколько именно в нем было частиц – все эти подробности теряются навсегда. Разворот всех результирующих частиц и проследивание обратного хода всех событий не приведут к реконструкции исходного состояния. По Хокингу, обращение конечного излучения породит лишь еще более однородное хокинговское излучение.

Если Хокинг прав, то весь процесс «частицы → черная дыра → хокинговское излучение» нельзя описывать обычной математикой на основе S-матрицы. Поэтому Стивен придумал ей на замену новую концепцию. У нового кода была дополнительная степень случайности, ведущая к стиранию исходной информации. Чтобы заменить S-матрицу, Стивен изобрел «He-S-матрицу». Он обозначил ее символом «\$», и ее стали называть *доллар-матрицей*.

Подобно S-матрице, доллар-матрица – это закон, связывающий то, что на входе, с тем, что на выходе. Но вместо сохранения различий, унаследованных от начальной точки, в случае черной дыры доллар-матрица, наоборот, размывает эти различия, пока не становится безразлично, что было на входе – Алиса, бейсбольный мяч или трехдневная пицца, – после обращения все равно получается одно и то же. Бросьте в черную дыру свой компьютер со всеми файлами. Назад выйдет совершенно однородное хокинговское излучение. Если обратить это действие, S-матрица соберет компьютер, однако из \$-матрицы будет вытекать все то же однородное хокинговское излучение. Согласно Хокингу, вся память о прошлом теряется в сердце временно возникшей черной дыры.

Это была весьма досадная патовая ситуация. Герард говорил: S-матрица, Стивен говорил: \$-матрица. Аргументы Стивена были ясными и убедительными, но вера Герарда в законы квантовой механики была непоколебимой.

Возможно, как говорят некоторые, мы с Герардом противостояли выводам Стивена, поскольку как физики занимались элементарными частицами, а не теорией относительности. Почти вся методология физики частиц вращается вокруг того принципа, что столкновения управляются обратимой S-матрицей. Но я не думаю, что мы отказывались отбросить этот закон из-за «элементарночастичного» шовинизма. Всю физику, не только теорию черных дыр, поглотила бы преисподняя, если бы дверь для потерь информации была открыта. Брошенный Стивеном вызов поджег фитиль целой пачки теоретического динамита.

Учитывая это, пришло, пожалуй, время объяснить, почему физики считают, что взрыв бомбы может быть обратимым. Это, конечно, невозможно опробовать в лаборатории. Но представим, что мы способны поймать все разлетающиеся атомы и фотоны и развернуть их назад. Если сделать это с бесконечной точностью, то законы физики приведут к воссозданию

бомбы. Но любая мельчайшая ошибка, возможно единственный потерянный фотон или даже крошечная погрешность в определении направления этого фотона, приведет к катастрофе. Малейшая неточность склонна разрастаться. Единственный сперматозоид, не достигший своей цели, мог изменить историю, если он принадлежал, скажем, отцу Чингисхана. В бильярде ничтожное изменение в первоначальной расстановке шаров или направлении первого удара растет с каждым столкновением, приводя к совершенно иному результату. Так же происходит и при взрыве бомбы, и при столкновении пары высокоэнергичных частиц: малейшая ошибка в обращении их движений – и результат не будет иметь ничего общего с первоначальной бомбой или исходными частицами.

Так почему же мы так уверены, что идеальное обращение всех фрагментов восстановит бомбу? Мы знаем об этом потому, что фундаментальные математические законы атомной физики обратимы. Эти законы были проверены с невероятной точностью в случаях намного более простых, чем бомбы. Бомба – это не более чем совокупность атомов. Конечно, слишком трудно проследить за Движениями  $10^{27}$  атомов в процессе взрыва, однако наше знание атомных законов очень надежно.

Но чем же заменяются атомы и законы атомной физики, когда взрывающаяся бомба заменяется испаряющейся черной дырой? Хотя у 'т Хоффа было много блестящих идей относительно природы горизонта, ясного ответа на этот вопрос он не дал. Нет, он, Конечно, знал, что заменой атомам должны быть микроскопические объекты, которые придают горизонту энтропию. Но что это такое и по каким именно законам они движутся, объединяются, разделяются и сочетаются? 'т Хоффт этого не знал. Хокинг и большинство релятивистов просто отбрасывали идею такого микроскопического обоснования, заявляя: «Второе начало термодинамики говорит нам, что физические процессы не могут быть обращены».

На самом деле второе начало утверждает не это. Оно говорит, что обратить физику невероятно трудно и малейшая ошибка похоронит все усилия. Более того, необходимо точно знать все детали – микроструктуру, – или неудача неминуема.

Сам я в те ранние годы противостояния считал, что верна S-матрица, а не \$-матрица. Но просто сказать «S на \$» было бы неубедительно. Лучшее, что можно было сделать, – это попытаться открыть загадочное микроскопическое происхождение энтропии черной дыры. И прежде всего это было нужно для понимания того, где кроется ошибка в рассуждениях Стивена.

## 12

### Чья забота?

Никто никогда не станет использовать хокингское излучение для лечения рака или совершенствования парового двигателя. Черные дыры никогда не станут использовать для хранения информации или поглощения вражеских боеголовок. Хуже того, в отличие от физики элементарных частиц или межгалактической астрономии – двух дисциплин, которые, видимо, тоже никогда не найдут практического применения, – квантовая теория испарения черных дыр, вероятно, никогда не будет даже проверена прямыми наблюдениями или экспериментами. Так зачем же тогда кто-то тратит на нее свое время?

Прежде чем ответить на этот вопрос, позвольте мне объяснить, почему хокингское излучение вряд ли когда-либо удастся пронаблюдать. Давайте перенесемся в будущее, когда можно будет достаточно близко подобраться к астрономической черной дыре, чтобы в подробностях ее рассмотреть. Но и тогда не будет шансов наблюдать ее испарение по одной простой причине: ни одна черная дыра сейчас не испаряется. Как раз наоборот, все они поглощают энергию и растут; даже самая одинокая черная дыра окружена теплом. Самые пустынные области межгалактического пространства, настолько холодные, насколько это возможно, все же теплее черной дыры звездной массы. Пространство заполнено чернотельным излучением (фотонами), оставшимися после Большого взрыва. Самые



холодные места во Вселенной раскалены до целых трех градусов выше абсолютного нуля, в то время как самая теплая черная дыра в сотни миллионов раз холоднее.

Самопроизвольно тепловая энергия всегда течет от теплого к холодному и никогда в обратном направлении, так что излучение более теплых частей космоса перетекает в холодные черные дыры. Вместо того чтобы испаряться и сжиматься, как было бы при температуре космоса, равной абсолютному нулю, реальные черные дыры постоянно поглощают энергию и растут.

Когда-то космос был гораздо горячее, чем сейчас, а в будущем расширение Вселенной сделает его намного холоднее. В конце концов, спустя сотни миллиардов лет, он остынет настолько, что станет холоднее звездных черных дыр. Когда это случится, черные дыры начнут испаряться. (Будет ли тогда кому это наблюдать? Кто знает, но будем оптимистами.) И все равно испарение будет чрезвычайно медленным – чтобы увидеть хоть малейшее изменение в массе и размерах черной дыры, понадобится как минимум  $10^{60}$  лет, – так что маловероятно, чтобы кто-нибудь сумел заметить уменьшение черной дыры. Наконец, даже если в нашем распоряжении будет все время Вселенной, нет никакой надежды расшифровать информацию, уносимую хокинговским излучением.

Вели попытки дешифровать сообщения, содержащиеся в хокинговском излучении, столь безнадежны, что нет никакого смысла их предпринимать, почему же эта проблема до сих пор так волнует физиков? Ответ звучит до некоторой степени эгоистично: мы занимаемся этим, чтобы удовлетворить свое любопытство относительно устройства мира и того, как взаимосвязаны законы физики.

На самом деле то же самое можно сказать про большую часть физики. Порой прагматичные вопросы приводят к глубоким научным исследованиям. Например, паровой инженер Сади Карно революционизировал физику, пытаясь построить улучшенный паровой двигатель. Но гораздо чаще к смене парадигм в физике приводило чистое любопытство. Любопытство – оно как зуд – все время тянет почесать. И у физика ничто не зудит сильнее, чем парадокс, несовместимость между разными вещами, о которых, как ему кажется, он все знает. Незнание того, как что-то работает, – тоже достаточно неприятно, но обнаружение противоречия между уже хорошо известными представлениями просто непереносимо, особенно когда сталкиваются самые фундаментальные принципы. Будет нелишним напомнить несколько таких столкновений и показать, как они приводили физику к весьма далеко идущим выводам.

Древнегреческие философы оставили парадоксальное наследие из двух несовместимых теорий, описывающих два совершенно отдельных мира явлений – небесных и земных. Мир *небесных* тел ныне относится к ведению астрономии. Считалось, что он лучше, чище, совершеннее – это прекрасный мир вечного и точного движения. Согласно Аристотелю, каждое небесное тело двигалось по одной из пятидесяти пяти идеальных концентрических кристаллических сфер.

Напротив, законы земных явлений считались испорченными. Движение по безобразной поверхности Земли всегда было делом тяжким. Нагруженная повозка, качаясь и скрипя, остановится, если ее перестанет тянуть лошадь. Куски материи буквально падают на землю и остаются там валяться. Эти основные законы управляют четырьмя элементами: огонь поднимается, воздух парит, вода падает, земля тонет, погружаясь до самой нижней точки.

Греки, похоже, были совершенно удовлетворены этими двумя совершенно разными наборами законов. Однако Галилей и в еще большей мере Ньютон посчитали такую дихотомию нетерпимой. Галилей просто придумал эксперимент, опровергающий представление о двух отдельных системах законов природы. Он представил, что стоит на вершине горы и бросает с нее камни: сначала так, чтобы камень упал в нескольких метрах от ног; затем сильнее, чтобы он пролетел несколько тысяч километров, прежде чем упасть; и, наконец, еще сильнее, так что камень облетит Землю по круговой орбите. Это создает новый парадокс: почему законы земных явлений столь сильно отличаются от законов небесных явлений, если земной камень может стать небесным телом?

Ньютон, родившийся в год смерти Галилея, разрешил эту загадку. Он понял, что один и то же закон гравитации заставляет яблоко падать с дерева и удерживает Луну на орбите вокруг Земли, а Землю на орбите вокруг Солнца. Ньютонские законы движения и тяготения были первой системой всеобщих физических законов. Знал ли Ньютон, насколько полезными они окажутся для будущих авиакосмических инженеров? Вряд ли его это заботило. Им двигало любопытство, а не прагматика.

В другой раз великий зуд возник в голове Людвиг Больцмана, и он стал ее усиленно чесать. И вновь было столкновение принципов: как может односторонний закон, всегда требующий возрастания энтропии, сосуществовать с обратимыми ньютоновскими законами движения? Если, как считал Лаплас, мир состоит из частиц, подчиняющихся законам Ньютона, то должна быть возможность запустить их в обратную сторону. В конце концов Больцман решил проблему, сначала поняв, что энтропия – это *скрытая микроскопическая информация*, а затем – что энтропия не *всегда* увеличивается. Время от времени происходят маловероятные события. Вы тасуете колоду, и чисто случайно карты складываются строго по возрастанию достоинства, причем черви идут за бубнами, которые следуют за трефами, а те – за пиками. Однако события, уменьшающие энтропию, – это очень редкие исключения. Больцман разрешил парадокс, сказав, что *энтропия почти всегда возрастает*. Сегодня статистический взгляд Больцмана на энтропию стал основанием для прикладной науки об информации, но для него самого загадка энтропии была лишь страшным зудом, который заставлял чесаться.

Интересно, что в случаях Галилея и Больцмана противоречия были выявлены не в результате нового экспериментального открытия. Ключом каждый раз оказывался правильный мысленный эксперимент. Галилеев эксперимент по бросанию камней и Больцманов – по обращению времени никогда не были осуществлены; достаточно было лишь размышлять о них. Но величайшим мастером мысленного эксперимента был Альберт Эйнштейн.

Два глубочайших противоречия не давали покоя в начале XX века. Первым был конфликт между принципами ньютоновской физики и максвелловской теории света. Принцип относительности, который мы привыкли ассоциировать с Эйнштейном, на самом деле восходит к Ньютону и даже к Галилею. Это простое утверждение о том, как выглядят законы физики из разных систем отсчета. Чтобы понять это, представим себе циркового артиста, жонглирующего шарами, который сел на поезд, чтобы отправиться в другой город. В дороге он захотел немного потренироваться. Но он никогда не жонглировал в движущемся поезде и задается вопросом: «Понадобится ли мне компенсировать движение поезда всякий раз, когда я подбрасываю шар в воздух и ловлю его? Надо прикинуть. Поезд движется на запад. Так что ловить брошенный шар я должен немного восточнее». Он пробует поступить так с одним шаром. Пока тот летит, ловящая рука движется на восток, и – бах! – шар падает на пол. Жонглер пробует снова, на этот раз уменьшая величину восточной компенсации. Опять неудача.

Надо сказать, что поезд попался очень высокого качества. Рельсы, по которым он идет, столь гладкие, а подвеска у вагонов такая замечательная, что движение совершенно неощутимо для пассажиров. Жонглер усмехается и говорит сам себе: «Понятно. Я просто не заметил, как поезд затормозил и остановился. Пока мы не поедем, я могу упражняться обычным образом. Вернусь-ка я обратно к старым добрым правилам жонглирования». И тут все получается замечательно.

Вообразите же удивление жонглера, когда, взглянув в окно, он видит местность, уносящуюся назад со скоростью добрых 150 км/ч. Глубоко озадаченный жонглер просит разъяснений у своего друга клоуна (на самом деле гарвардского профессора физики на каникулах). И вот что отвечает клоун: «Согласно принципам ньютоновской механики, законы движения одинаковы во всех системах отсчета, если они равномерно движутся друг относительно друга. Поэтому правила жонглирования совершенно одинаковы и в системе отсчета, покоящейся на земле, и в системе отсчета, движущейся вместе с плавно идущим

поездом. Невозможно обнаружить движение поезда с помощью какого-либо эксперимента, целиком выполняемого внутри железнодорожного вагона. Только взглянув в окно, можно сказать, что поезд движется по отношению к земле, и даже тогда вы не сможете сказать, что именно движется – поезд или земля. Все движения относительны». Пораженный жонглер берет свои шары и продолжает упражняться.

Все движения относительны. Движение железнодорожного вагона со скоростью 150 км/ч, движение Земли вокруг Солнца со скоростью 30 км/с и движение Солнечной системы вокруг галактики со скоростью 200 км/с – все это необнаружимо, пока протекает гладко.

Гладко? Что это значит? Рассмотрим жонглера в момент отправления поезда. Внезапно состав трогается. При этом не только пиры смещаются назад, но и сам жонглер может повалиться на Пол. Когда поезд останавливается, тоже происходит нечто подобное. Или, допустим, поезд проходит по резкому изгибу рельсов. Определенно во всех этих ситуациях правила жонглирования потребуют модификации. Что за новый ингредиент в них добавится? Ответ – *ускорение*.

Ускорение означает изменение скорости. Когда железнодорожный вагон начинает движение или когда он неожиданно останавливается, скорость меняется и возникает ускорение. А что в случае прохождения поворота? Это менее очевидно, но истина все же в том, что и тут скорость изменяется – не по величине, но по *направлению*. Для физика любое изменение скорости – как по величине, так и по направлению – это ускорение. Так что принцип относительности надо уточнить:

*Законы физики одинаковы во всех системах отсчета, которые равномерно (без ускорения) движутся друг по отношению к другу.* Принцип относительности был впервые сформулирован примерно за 250 лет до рождения Эйнштейна. И почему же тогда Эйнштейн так знаменит? Потому что он обнаружил очевидный конфликт между принципом относительности и другим принципом физики, который можно назвать принципом Максвелла. Как обсуждалось в главах 2 и 4, Джеймс Клерк Максвелл открыл современную теорию электромагнетизма – теорию всех электрических и магнитных сил в природе. Важнейшее достижение Максвелла состояло в раскрытии великой тайны света. Свет, доказал он, состоит из волн электрических и магнитных возмущений, движущихся сквозь пространство, подобно волнам по поверхности моря. Но для нас важнее всего то, что, как доказал Максвелл, свет в пустом пространстве всегда движется в точности с одной и той же скоростью – около 300 000 км/с<sup>87</sup>. Именно это я и называю принципом Максвелла:

*Независимо от того, как был порожден свет, он движется в пустом пространстве всегда с одной и той же скоростью.*

Но теперь у нас возникает проблема – серьезное противоречие между двумя принципами. Эйнштейн был не первым, кто обеспокоился противоречием между принципом относительности и принципом Максвелла, но он более четко увидел проблему. И пока другие разбирались с экспериментальными данными, Эйнштейн, мастер мысленного эксперимента, разбирался с экспериментом, поставленным исключительно внутри его головы. По собственным воспоминаниям Эйнштейна, в 1895 году, когда ему было 16 лет, он сформулировал следующий парадокс. Представив себя в железнодорожном вагоне, *движущемся со скоростью света*, он наблюдает световую волну, движущуюся рядом с ним в том же направлении. Увидит ли он световой луч, стоящий неподвижно?

Во времена Эйнштейна не было вертолетной техники, но мы можем вообразить его парящим над морем со скоростью, в точности равной скорости океанских волн. Волны будут казаться застывшими. Точно так же, рассуждал шестнадцатилетний юноша, пассажир вагона (напоминаю, движущегося со скоростью света) обнаружит совершенно неподвижную световую волну. Каким-то образом в молодом возрасте Эйнштейн уже знал об уравнениях максвелловской теории достаточно для понимания того, что нарисованная им картина невозможна: принцип Максвелла гласит, что свет всегда движется с одинаковой скоростью.

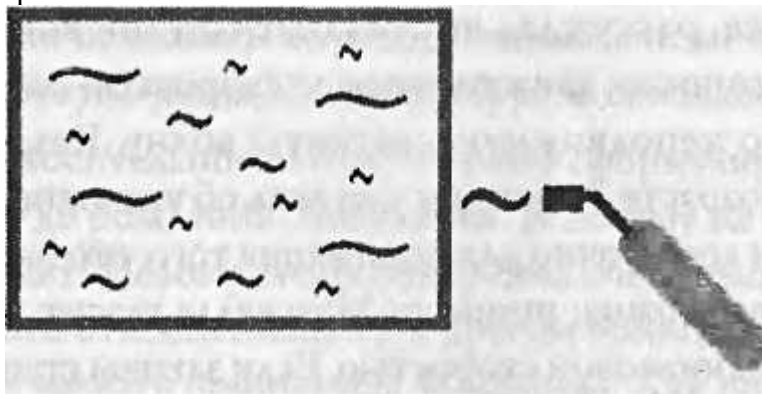
---

87 Когда свет идет сквозь воду или стекло, его скорость несколько снижается.

Если законы природы одинаковы во всех системах отсчета, тогда принцип Максвелла можно применить и к движущемуся поезду. Принцип Максвелла и принцип относительности Галилея шли лоб в лоб.

Эйнштейн расчесывал свой зуд десять лет, пока не нашел выхода из положения. В 1905 году он написал свою знаменитую статью «К электродинамике движущихся тел»<sup>88</sup>, в которой сформулировал совершенно новую концепцию пространства и времени – специальную теорию относительности. Она радикально изменила представления о расстоянии и длительности, а в особенности то, что мы подразумеваем под одновременностью двух событий.

В тот же период, когда Эйнштейн придумывал специальную теорию относительности, он был озадачен еще одним парадоксом. В начале XX века физики были в крайнем недоумении из-за чернотельного излучения. Вспомните главу 9, где я объяснял, что чернотельное излучение – это электромагнитная энергия, испускаемая святающимся горячим объектом. Представьте себе совершенно пустой закрытый контейнер при температуре абсолютного нуля. Внутри сосуда будет идеальный вакуум. Теперь давайте подогреем сосуд снаружи. Внешние стенки начинают *испускать* чернотельное излучение, то же происходит и с внутренними стенками. Их излучение попадает в закрытое пространство внутри сосуда, и оно заполняется чернотельным излучением. Электромагнитные волны разной длины мечутся по объему, отскакивая от внутренних стенок: красный свет, голубой, инфракрасный и все остальные цвета спектра.



Согласно классической физике, все длины волн – микроволны, инфракрасные, красные, оранжевые, желтые, зеленые, голубые и ультрафиолетовые волны – должны давать равный энергетический вклад. Но почему мы остановились в этом перечислении? Еще более короткие волны – рентген, гамма-лучи и еще более и более короткие волны – тоже должны давать равный вклад в энергию. Поскольку нет предела тому, сколь короткой может быть волна, классическая физика предсказывает, что в сосуде будет содержаться *бесконечное* количество энергии. Это признак абсурда – такая энергия немедленно испарила бы сосуд. Но где же именно ошибка?

Проблема эта была столь тяжела, что в конце XIX века ее стали называть *ультрафиолетовой катастрофой*. И вновь клинч возник в результате столкновения принципов, которые пользовались большим доверием, от обоих было очень трудно отказаться. С одной стороны, волновая теория невероятно успешно объясняла хорошо известные свойства света – дифракцию, преломление, отражение и самое впечатляющее – интерференцию. Никто не готов был отказываться от волновой теории, но, с другой стороны, на каждую длину волны должна приходиться равная энергия – это так называемая теорема о равномерном распределении, вытекающая из самых общих аспектов теории теплоты, в частности и того, что тепло – это беспорядочное движение.

В 1900 году Макс Планк выдвинул важные новые идеи, которые вплотную подвели к разрешению дилеммы. Но лишь Эйнштейн в 1905 году нашел правильный ответ. Без всяких

---

<sup>88</sup> Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел // Собрание научных трудов: В 4 т. Т. 1. М., 1965. С. 7. – Примеч. перев.

колебаний никому не известный патентный клерк сделал невероятно смелый ход. Свет, сказал он, – это не размытые пятна энергии, как считал Максвелл. Он состоит из неделимых частиц энергии, или квантов, которые позднее стали называть фотонами. Можно только изумляться самонадеянности молодого человека, который заявил величайшим ученым всего мира, что все их знания о свете ошибочны.

Гипотеза о том, что свет состоит из отдельных фотонов, энергия которых пропорциональна их частоте, решила проблему. Применив к этим фотонам статистическую механику Больцмана, Эйнштейн обнаружил, что на очень короткие волны (высокие частоты) приходится менее одного фотона. Меньше одного означает ни одного. Так что очень короткие волны не дают энергетического вклада, и мы избегаем ультрафиолетовой катастрофы. Дискуссия на этом не закончилась. Понадобилось почти тридцать лет, чтобы Вернер Гейзенберг, Эрвин Шрёдингер и Поль Дирак примирили эйнштейновские фотоны с максвелловскими волнами. Но именно эйнштейновский прорыв открыл этот путь.

Общая теория относительности, величайшее творение Эйнштейна, также родилась из простого мысленного эксперимента, связанного с конфликтом принципов. Сам мысленный эксперимент был так прост, что выполнить его мог бы даже ребенок. Все, что в нем было, – это повседневное наблюдение: когда поезд набирает скорость, пассажиров прижимает к сиденьям, как будто вагон задрал нос, и гравитация тянет их к хвосту поезда. Так как же, спрашивал Эйнштейн, мы можем определить, что система отсчета ускоряется? И относительно чего она ускоряется?

Ответ Эйнштейна, повторенный клоуном: *этого нельзя определить*. «Что? – спросил жонглер. – Конечно, это можно сделать. Не вы ли только что сказали мне, что вас прижимает к спинке кресла?» – «Да, – отвечает клоун, – точно также, как если бы кто-то приподнял нос вагона так, чтобы назад вас тянула гравитация». Эйнштейн ухватился за эту идею: невозможно отличить ускорение от воздействия силы тяжести. У пассажира нет способа узнать, действительно поезд начал движение или к спинке сиденья его прижимает гравитация. Из этого парадокса и противоречия родился принцип эквивалентности:

*Воздействие гравитации и ускорения неотличимы друг от друга.*

*Влияние гравитации на любую физическую систему в точности такое же, как и влияние ускорения.*

Вновь и вновь мы видим одну и ту же картину. Рискуя впасть в некоторое преувеличение, можно сказать: крупнейшие прорывы в физике свершились благодаря мысленным экспериментам, которые обнаруживали противоречия между самыми глубокими принципами. И в этом отношении сегодня ничего не изменилось по сравнению с прошлым.

## Столкновение

Вернемся к исходному вопросу, поставленному в начале этой главы: почему нас вообще должна волновать потеря информации при испарении черной дыры?

Шли дни и недели после встречи в мансарде Вернера Эрхарда, и до меня стало доходить, что Стивен Хокинг дотянулся до столкновения принципов, способного конкурировать с великими парадоксами прошлого. Что-то очень важное в наших фундаментальных представлениях о пространстве и времени серьезно не в порядке. Было очевидно – Хокинг сам это сказал, – что принцип эквивалентности и квантовая механика оказались на встречных курсах, ведущих к столкновению. Парадокс мог обрушить всю конструкцию, а мог примирить теории, принеся новое глубокое понимание обеих.

У меня это столкновение вызвало непереносимый зуд, но он оказался не слишком заразным. Стивен, казалось, был удовлетворен выводом о потере информации, и, похоже, мало кого еще тревожил этот парадокс. На протяжении десятилетия, с 1983 по 1993 год, эта успокоенность сильно меня раздражала. Я просто не мог понять, как все, и в первую очередь Стивен, могут не замечать, что примирение принципов квантовой механики и теории относительности – это величайшая задача нашего поколения и прекрасный шанс сравняться

в достижениях с Планком, Эйнштейном, Гейзенбергом и другими героями прошлого. Я чувствовал, что Стивен совершенно не понимает глубины своего собственного вопроса. Для меня стало чем-то вроде навязчивой идеи убедить Стивена и других (но особенно Стивена), что цель не в том, чтобы отвергнуть квантовую механику, а в том, чтобы согласовать ее с теорией черных дыр.

Мне казалось очевидным, – и я уверен, что Стивен, Герард 'тХоофт, Джон Уилер и почти любой знакомый релятивист, космолог или струнный теоретик с этим согласится, – что иметь две несовместимые теории природы интеллектуально нетерпимо и что общая теория относительности должна быть сделана совместимой с квантовой механикой. Однако физики-теоретики – это довольно вздорная компания<sup>89</sup>.

## 13

### Патовая ситуация

Будучи моложе, я не любил, когда люди, особенно на вечеринках и других социальных мероприятиях, интересовались, чем я зарабатываю на жизнь. Не то чтобы я стыдился или смущался. Просто это было слишком трудно объяснить. Чтобы избежать этой темы, я стал говорить: «Я – физик-ядерщик, но мне нельзя эту тему обсуждать». Это работало в шестидесятых и в семидесятых, но сегодня, когда холодная война закончилась, больше не действует.

Я до сих пор испытываю некоторые затруднения с этим вопросом, хотя и по другой причине: я сам не знаю, как правильно на него ответить. Очевидный ответ: «Я физик-теоретик» – обычно ведет к вопросу: «Каким разделом физики вы занимаетесь?» Вот в этом месте я и впадаю в ступор. Можно бы сказать, что занимаюсь элементарными частицами, но я также много работал с большими объектами, такими как черные дыры и вся Вселенная. Я мог бы сказать, что занимаюсь физикой высоких энергий, но иногда приходится работать с самыми низкими энергиями и даже со свойствами пустого пространства. Для того, чем занимаюсь я и большинство моих друзей, просто нет подходящего названия. Меня раздражает, когда меня называют струнным теоретиком; неприятно, что меня классифицируют так узко. Я был бы рад сказать, что работаю с фундаментальными законами природы, но это звучит слишком претенциозно. Так что обычно я отвечаю, что я физик-теоретик и работаю с множеством разных вещей.

На самом деле до начала 1980-х годов то, над чем я работал, можно было вполне корректно называть физикой элементарных частиц. Однако тогда эта область находилась в определенной стагнации. Стандартная модель элементарных частиц была готова, и наиболее интересные ее варианты уже проработаны. Было лишь вопросом времени – долгого времени – дожидаться, когда будут построены ускорители для проверки этих вариантов. Так что, по правде говоря, я немного скучал и решил посмотреть, что можно сделать в области квантовой гравитации. Через несколько месяцев работы я стал беспокоиться, что Фейнман был прав – до квантовой гравитации было очень далеко, и не просматривалось никакого пути, по которому можно было бы продвинуться. Мне даже было неясно, в чем, собственно, состоят проблемы. Джон Уилер в своей неподражаемой манере сказал: «Вопрос в том – в чем состоит вопрос?» – и я определенно не видел, как на это ответить. Я был на грани того, чтобы вернуться к привычной физике элементарных частиц, когда совершенно неожиданно

---

<sup>89</sup> Недавно я был сильно удивлен, обнаружив, что не все с этим согласны. В рецензии на книгу Брайана Грина «Ткань космоса» (русский перевод: Грин Брайан. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. – М.: Либроком, 2011.–Примеч. перев.) Фриман Дайсон сделал удивительное замечание: «Как консерватор, я не согласен с тем, что деление физики на отдельные теории для большого и малого неприемлемо. Я совершенно удовлетворен ситуацией, в которой мы прожили последние 80 лет с разными теориями для классического мира звезд и планет и квантового мира атомов и электронов». О чем это Дайсон думал? О том, что, подобно древним ученым, жившим до Галилея, мы должны принять две непреодолимо разделенные теории природы? Это консервативно? Или это реакционно? На мой вкус, это звучит попросту нелюбопытно.

Стивен бросил бомбу, которая дала ответ на запрос Уилера: вопрос в том, как нам спасти физику от анархии потерянной информации?

Если физика элементарных частиц переживала тогда стагнацию, то и с квантовой теорией черных дыр было то же самое, и так продолжалось около девяти лет. Даже Хокинг ничего не публиковал о черных дырах с 1983 по 1989 год. Я смог найти за весь тот период всего восемь журнальных статей, которые затрагивали бы вопрос о потере информации в черных дырах. Одну из них написал я сам, все остальные – 'т Хоофт, в основном выражая в них свою веру в S-матрицу, а не в S-матрицу Хокинга.

Причина, по которой я почти ничего не публиковал о черных дырах в течение девяти лет после 1983 года, была в том, что я попросту не мог найти никакого подхода к решению головоломки. Я обнаружил, что на протяжении всего этого времени снова и снова задавал себе вопросы и каждый раз сталкивался с непреодолимыми препятствиями. Логика Хокинга была совершенно ясна: горизонт – это просто точка невозврата, и что бы ее ни пересекло, оно не может вернуться обратно. Рассуждение было убедительным, но вывод – абсурдным.

Вот как я объяснил проблему на лекции для группы любителей физики и астрономии в Сан-Франциско где-то в 1988 году<sup>90</sup>.

### **Парадокс очень большой черной дыры: лекция, прочитанная в Сан-Франциско**

Я хотел бы привлечь ваше внимание к серьезному конфликту принципов, который впервые описан тринадцать лет назад Стивеном Хокингом. Причина, по которой я сейчас к этому конфликту возвращаюсь, состоит в том, что он указывает на очень серьезный кризис, который должен быть разрешен прежде, чем мы сможем понять самые глубокие вопросы физики и космологии. Эти вопросы включают, с одной стороны, гравитацию, а с другой – квантовую теорию.

Вы можете спросить: почему нам вообще надо смешивать эти две области? В конце концов, гравитация имеет дело с очень большим и очень тяжелым, тогда как квантовая механика управляет миром очень малого и легкого. Ничто не может быть тяжелым и легким в одно и то же время, так как же обе теории могут быть важны в одном и том же контексте?

Давайте начнем с элементарных частиц. Как вы все знаете, сила гравитации между электронами и атомным ядром невероятно мала по сравнению с электрическими силами, которые скрепляют атом. То же самое верно, но в еще большей степени, для ядерных сил, которые удерживают вместе кварки в протоне. Фактически сила гравитации примерно в миллион миллиардов миллиардов миллиардов миллиардов ( $10^{40}$ ) раз слабее обычных сил. Поэтому ясно, что она не играет существенной роли в атомной и ядерной физике, что уж говорить об элементарных частицах.

Обычно мы думаем об элементарных частицах, таких как электрон, как о бесконечно малых точках в пространстве. Но это не вся правда. Дело в том, что у элементарных частиц достаточно много свойств, которыми они различаются между собой. Некоторые из них имеют электрический заряд, а другие – нет. Кварки обладают, например, *барионным числом*, *изоспином* и свойством, которое ошибочно названо *цветом*. Частицы, подобно волчкам, вращаются вокруг своей оси. Нет оснований считать, что одна точка может обладать такой структурой и разнообразием свойств. Большинство физиков, занимающихся элементарными частицами, уверены, что если мы сможем исследовать частицы в невероятно малых масштабах, то увидим, как устроен их внутренний механизм.

Если и в самом деле правда, что электроны и их многочисленные родственники не бесконечно малы, то у них должны быть определенные размеры. Но все, что мы знаем из прямых наблюдений (при столкновениях частиц), так это то, что они не больше примерно

---

<sup>90</sup> Изложенное далее – это примерная реконструкция лекции, основанная на сохранившихся у меня заметках. Я допустил некоторые вольности, чтобы заменить формулы словами. Опус «Не забудьте принять антигравитационные пилюли» предназначался для научно-популярного журнала. Он так и не был доведен до конца, но его сокращенная версия легла в основу лекции, прочитанной в Сан-Франциско.

одной десятитысячной атомного ядра.

Происходят, однако, совершенно экстраординарные вещи. Последние несколько лет мы собрали косвенные свидетельства того, что механизм внутри элементарных частиц имеет ни больше ни меньше как планковские размеры. Теперь планковская длина приобрела невероятное значение для физиков-теоретиков. Мы привыкли думать, что гравитация гораздо слабее электрических и субъядерных сил, и поэтому она совершенно несущественна для описания поведения элементарных частиц. Однако это не так, когда частички материи сближаются друг с другом на планковскую длину. В этих условиях гравитация не только уравнивается с другими силами, но и превосходит их.

Все это означает, что в глубине нашего мира, на расстояниях столь малых, что на них даже электроны имеют сложную структуру, гравитация может быть самой важной силой, скрепляющей частицы. Как видите, в планковском масштабе гравитация и квантовая механика могут работать совместно и объяснять свойства электронов, кварков, фотонов и всей этой честной компании. Нам, физикам, изучающим элементарные частицы, очень нужно построить ясную теорию квантовой гравитации.

Космологи тоже могут избегать квантовой гравитации лишь до определенного момента. Отслеживая Вселенную назад во времени, мы узнаем, что она была гораздо плотнее напичкана частицами. Сегодня [1988] фотоны, образующие КМФ<sup>91</sup>, находятся почти на сантиметровом расстоянии друг от друга, но когда они только выпускались, расстояние между ними было в тысячу раз меньше. Ещё дальше в прошлом частицы были стиснуты, как сардины в банке, причем в еще меньшем объеме. Похоже, что во время Большого взрыва они могли находиться на расстоянии не больше планковской длины. В таком случае частицы были столь близки, что самой важной силой, действующей между ними, была гравитация. Иными словами, та же сила квантовой гравитации, которая является ключом к пониманию элементарных частиц, может также быть главной силой, ответственной за Большой взрыв.

Итак, поняв важность квантовой гравитации для нашего будущего (и нашего прошлого), попробуем разобраться, что же мы о ней знаем? Не многим более того, что квантовая теория и гравитация очень серьезно столкнулись, особенно в вопросе о черных дырах. Это на самом деле хорошо, поскольку означает, что у нас есть шанс понять важные вещи, разрешив эту коллизию. Сегодня я собираюсь рассказать короткую историю, которая иллюстрирует данную проблему – не ее решение, а только саму задачу.

### **Не забудьте принять антигравитационные пилюли**

*8 419 677 599-й год*

*Давным-давно Земля сошла с орбиты вокруг ныне уже мертвой звезды Сол. Бесчисленные поколения сменились за время странствия, пока мы не нашли свое место на орбите вокруг гигантской черной дыры где-то в сверхскоплении Кома. Планета находится под управлением одной и той же корпорации с конца двадцать первого века, когда в результате бескровного переворота вся власть оказалась в руках фармацевтической индустрии.*

– И что же теперь, граф Геритол? Вы же пообещали результат за пять лет. А теперь растрчиваете мое время на очередной отчет о «продвижении»?

– Ваше Королевское Высочество, ничтожный червь молит вас о королевском прощении за свою непростительную глупость, но на этот раз у меня поистине замечательные новости. Мы его поймали!

Его Королевское Высочество император Мерк LLXXXVI на мгновение нахмурился. Затем повернул свою невероятно лысую голову к графу, министру производства фальшивой информации и продвижения антирациональных наук, и пригвоздил его к стене своим буравящим взглядом:

---

<sup>91</sup> Космический микроволновый фон (КМФ) – излучение, которое было первоначально испущено при Большом взрыве.



– Дурак. Кого вы поймали? Еще одного попугая?

– Нет, Ваше Сиятельство. Это еретик, величайший из них. Мы поймали решающего уравнения потомка грязного физика, того, кто заражает наш народ злыми слухами о том, что антигравитационные пилюли – подделка. Прямо сейчас он в вашей приемной прикован цепями к стене. Привести? – Подхалимское лицо графа растянулось в угоднической улыбке. – Готов поспорить, он бы не отказался сейчас от валиума. Ха-ха.

Слабая улыбка промелькнула на лице Его Королевского Высочества:

– Тащите собаку сюда.

Пленника, изодранного, избитого, но нераскаившегося, грубо швырнули на пол к ногам Геритола.

– Как твое имя, собака, и кто твоя родня?

Поднявшись на ноги и дерзко отряхивая пыль со своей туники, пленник посмотрел в глаза своему гонителю и гордо ответил:

– Меня зовут Стив<sup>92</sup>. – После долгой демонстративной паузы, столь долгой, что граф почувствовал себя неудобно, он продолжил: – Я потомок древнего рода, который известен со времен Битвы при черной дыре. Моим предком был Стивен Смелый из Кембриджа.

Черты лица императора на мгновение смазались неуверенностью, но он быстро восстановил самообладание и улыбнулся:

– Прекрасно, доктор Стив, полагаю, вам подойдет этот титул. Теперь посмотрите, куда ваш древний род вас привел. Ваше существование меня раздражает. Единственный вопрос: как именно избавиться от вашего присутствия.

Позднее, когда искусственное солнце зашло на западе, Стиву принесли его последний ужин. Как будто в насмешку, император прислал отборные кушанья со своего собственного стола и к ним приложил сообщение о своей «симпатии». Мрачный охранник с низко посаженной головой (тюремщики, однако, хорошо относились к Стиву) зачитал послание. На взгляд охранника, это была худшая из возможных новостей. «Завтра в первом часу вас, вашу семью и всех ваших друзей-еретиков поместят на борт малой обитаемой планеты и сбросят в бездну – в гигантскую утробу темного огня и жара, окружающую черную дыру. Сначала вам будет становиться все горячее. Потом ваша плоть станет поджариваться, а кровь закипит. Все ваши биты будут перемешаны до полного испарения и необратимо рассеются в небесах». Без видимых причин лицо Стива успокоилось, и на нем проступила слабая улыбка. «Странная реакция на плохое известие», – подумал охранник.

Император и граф поднялись рано утром. Настроение у властелина было дружелюбным, почти веселым.

– Сегодня мы позабавимся. Не так ли, граф?

– О да, Ваше Превосходство. Я уже объявил о казни. Народ с удовольствием понаблюдает в свои телескопы за тем, как у еретиков закипает кровь.

Беспокоясь об императорском одобрении, граф предложил дополнительно проверить температуру черной дыры.

– Проверьте, министр. С этого расстояния горизонт выглядит холодным, но давайте опустим термометр ближе к поверхности на тросе и зафиксируем температуру у горизонта. Конечно, это делалось не раз, но я хочу порадоваться тому, как растет столбик ртути.

И вот уже небольшая ракета готова поднять над Землей термометр. Преодолев земное тяготение, градусник падает к горизонту, а за ним тянется кабель. Термометр опускается, пока кабель не натягивается.

– Тепло, но не горячо. Опустите пониже, граф, – приказывает император. Еще немного кабеля сматывается с барабана. В телескоп император наблюдает за подъемом ртути: выше точки кипения воды, выше точки кипения ртути, стекла – наконец, термометр испаряется.

---

92 К концу двадцатого века значительную часть величайших физиков мира звали Стивами. Среди многочисленных Стивов физики можно назвать Стива Вайнберга, Стива Хокинга, Стива Шейкера, Стива Гиддингса, Стива Чу. В конце двадцать первого века те, кто хотел стать родителями великих физиков, стали давать своим детям (и девочкам, и мальчикам) имя Стив.

– Достаточно ли горячо, Ваше Высочество? – спрашивает граф.

– Вы имеете в виду, достаточно ли горячо для Стива, граф? Да, я думаю, там отличный климат. Пора начинать казнь.

И вот уже вторая ракета, на этот раз достаточно большая, чтобы нести две сотни человек, готовится отправить несчастных научно-рациональных еретиков на небольшой, но гостеприимный спутник. Жена Стива, рыдая от безысходности, крепко вцепилась в его руку. Физик хотел бы объяснить ей правду, но еще слишком рано. Повсюду вокруг них императорская гвардия.

Спустя несколько часов граф собственноручно нажимает кнопку, которая запускает гигантскую ракету, сводящую небольшой зеленовато-голубой спутник с околоземной орбиты. Вместе с двумястами напуганными пассажирами (теперь гвардии с ними уже нет) колония начинает спускаться к темному огню.

– Я вижу их, граф, – сообщает император. – Тепло начинает на них воздействовать. Их движения становятся расслабленными и замедленными. О-о-очень замедленными.

Купол обсерватории весьма велик, и окуляр телескопа оказался в самом неудобном месте. Граф улыбается, достает антигравитационные пилюли и предлагает одну императору:

– Ради безопасности Вашего Высочества. Падение отсюда может быть весьма неприятным.

Император глотает пилюлю и вновь смотрит в окуляр:

– Я еще вижу их. Но смотрите, они начинают падать прямо к горизонту. Теперь мои лояльные подданные увидят, как разрывает моих врагов. Следите, их индивидуальные биты постепенно смешиваются в горячий плотный суп. И, один за другим, они уносятся фотонами. Подсчитаем их и убедимся, что враги полностью испарены.

Они следят, как фотоны регистрируются и анализируются гигантской батареей компьютеров телескопа.

– Что ж, – констатирует граф. – Все в полном соответствии с предсказаниями квантовой механики. Учен каждый бит информации, но они перемешаны до полной нераспознаваемости. Никто не сможет Шалтая-Болтая собрать.

Император кладет руку на плечо графа и говорит:

– Мои поздравления, граф. Очень хорошая утренняя работа. – Но неосторожный жест нарушает его равновесие. Шестьдесят метров до пола, и граф вдруг думает: а действительно ли слухи об антигравитационных пилюлях – полная неправда?

Стив напряженно изучает свой блокнот. Затем с улыбкой отрывается и обнимает жену:

– Дорогая, скоро мы совершенно безопасно пересечем горизонт.

Миссис Стив и остальные явно озадачены, и он продолжает:

– Наше спасение – принцип эквивалентности, – объясняет он. – На горизонте нет опасности. Это не более чем безобидная точка невозврата.

И добавляет:

– К счастью, мы находимся в состоянии свободного падения, и наше ускорение полностью погасит воздействие гравитации черной дыры. Пройдя через горизонт, мы ничего не почувствуем.

Его жена по-прежнему смотрит скептически:

– Пусть даже горизонт безвреден. Но я слышала ужасные рассказы о неизбежной сингулярности внутри черной дыры. Разве она не разорвет нас на биты?

– Да, это так, – отвечает он. – Но эта черная дыра так велика, что пройдет около миллиона лет, прежде чем наша планета приблизится к сингулярности.

И с этими словами они счастливо пересекли горизонт, по крайней мере, если вы верите в принцип эквивалентности.

*Конец*

В этой истории много огрехов, помимо литературных. В частности, если черная дыра столь велика, что Стив и его последователи могут прожить годы, прежде чем достигнут

сингулярности<sup>93</sup>, то и графскому термометру понадобится не меньше лет, чтобы добраться до места измерения. Еще хуже то, что время, в течение которого черная дыра испускает биты информации, изначально принадлежавшие Стиву и его последователям, должно быть невероятно долгим, гораздо большим, чем время жизни Вселенной. Но если игнорировать такие количественные детали, основная логика этой истории вполне осмысленна.

Или нет?

Стал ли Стив жертвой горизонта? Граф и император подсчитали каждый бит, и все они были в продуктах испарения «в полном соответствии с предсказаниями квантовой механики». Так что Стив был уничтожен, когда приблизился к горизонту. Но история также говорит, что Стив благополучно пересек горизонт без ущерба для себя и своей семьи – в полном соответствии с принципом эквивалентности.

Очевидно, мы имеем дело со столкновением принципов. Из квантовой механики вытекает, что все объекты над самым горизонтом встречают сверхгорячую область, где экстремальная температура превращает всю материю в разрозненные фотоны, которые потом уходят от черной дыры, подобно тому как свет уходит от Солнца. В итоге каждый бит информации, уносимый падающей материей, должен найти отражение в этих фотонах.

Но, похоже, принцип эквивалентности дает нам другую, противоположную версию этой истории.

### **Лекция прерывается**

Позвольте мне прервать пересказ лекции 1988 года, чтобы прояснить детали, которые были известны многим любителям физики, присутствовавшим в аудитории, но, возможно, не известны вам. Прежде всего, почему принцип эквивалентности дает изгнанникам уверенность в безопасности горизонта? Тут помогает мысленный эксперимент, который я упоминал в главе 2. Представьте себе жизнь в лифте, но в мире, где гравитация гораздо сильнее, чем на поверхности Земли. Если лифт неподвижен, пассажиры ощущают всю силу тяготения ступнями своих ног и всеми частями своих сдавленных тел. Допустим, лифт начинает подниматься. Направленное вверх ускорение делает ситуацию еще хуже. Согласно принципу эквивалентности, ускорение дает дополнительный вклад в испытываемую пассажирами силу тяжести.

Но что, если трос оборвется и лифт начнет ускоряться вниз? Тогда он вместе с пассажирами окажется в состоянии свободного падения. Воздействие гравитации и направленное вниз ускорение в точности компенсируют друг друга, и пассажиры не смогут сказать, что они находятся в мощном гравитационном поле, по крайней мере пока они не ударятся о землю и не испытают разрушительного действия направленного вверх ускорения.

Точно так же изгнанники на своей свободно падающей планете не должны чувствовать никакого влияния гравитации черной дыры вблизи горизонта. Они подобны свободно дрейфующим головастикам из главы 2, которые, не замечая того, проплывают мимо точки невозврата.

Второй момент – менее знакомый. Как я уже объяснял, хокингская температура черной дыры чрезвычайно мала. Тогда почему же граф с императором регистрировали такую высокую температуру вблизи горизонта, когда опускали туда свой термометр? Чтобы это понять, нам надо знать, что происходит с фотоном, когда он вырывается из мощного гравитационного поля. Но давайте начнем с чего-то более знакомого – камня, брошенного вертикально вверх с поверхности Земли. Если его начальная скорость невелика, он упадет обратно на поверхность. Но если придать ему достаточную кинетическую энергию, камень вырвется из земного тяготения.

Однако даже если камню это удастся, у него останется гораздо меньше кинетической энергии, чем было на старте. Иными словами, начиная движение, камень обладает гораздо большей кинетической энергией, чем к тому моменту, когда он наконец покинет Землю.

---

<sup>93</sup> Которую, будучи за горизонтом, император и граф никогда не увидят.

Все фотоны движутся со скоростью света, но это не значит, что все они имеют одинаковую кинетическую энергию. На самом деле они во многом похожи на камень. Поднимаясь в гравитационном поле, они теряют энергию; чем сильнее гравитация, которую они преодолевают, тем больше энергии теряется. По мере удаления от горизонта запасы энергии гамма-излучения настолько истощаются, что оно превращается в очень малозаэнергичную радиоволну. И наоборот, радиоволна, наблюдаемая вдали от черной дыры, должна была быть высокоэнергичным гамма-излучением, когда покидала горизонт.

Теперь рассмотрим графа и императора, находящихся высоко над черной дырой. Хокингская температура столь мала, что радиочастотные фотоны имеют очень низкую энергию. Но, немного подумав, граф и император могут понять, что те же фотоны были сверхвысокоэнергичными гамма-квантами, когда они испускались вблизи горизонта. Но это то же самое, что сказать: там внизу намного горячее. Гравитация у горизонта черной дыры столь сильна, что фотонам требуется колоссальная энергия для ухода из этой области. При наблюдении издалека черная дыра может быть очень холодной, но близко поднесенный термометр подвергается жестокой бомбардировке энергичными фотонами. Вот почему палачи были уверены, что их жертвы испарятся на горизонте.

### **Лекция продолжается**

Похоже на то, что мы пришли к противоречию. Один набор принципов – общая теория относительности и принцип эквивалентности – говорят, что информация в ненарушенном виде Попадает внутрь горизонта. Другой – квантовая механика – приводит нас к противоположному заключению: падающие биты, хотя и в страшно перепутанном виде, в конце концов возвращаются в форме фотонов и других частиц.

Тут вы может спросить: откуда мы знаем, что биты после падения сквозь горизонт, но до попадания в сингулярность не могут выйти обратно в виде хокингского излучения? Ответ очевиден: чтобы сделать это, им потребовалось бы превысить скорость света.

Я продемонстрировал вам серьезный парадокс – и утверждаю, что он может иметь огромное значение для будущего физики. Но я не дал вам никакого намека на возможные пути решения этой дилеммы. Это потому, что я сам не знаю ее решения. Но у меня есть по этому вопросу предубеждение, и позвольте я расскажу, в чем оно заключается.

Я не верю, что мы откажемся от принципов квантовой механики или от тех, на которых строится общая теория относительности. В частности, я, как и Герард 'т Хоофт, верю в то, что при испарении черных дыр не происходит потери информации. Каким-то образом мы упускаем нечто очень важное относительно информации и того, как она локализуется в пространстве.

Эта лекция в Сан-Франциско была первой в большом ряду подобных лекций, которые я читал на физических факультетах и конференциях по меньшей мере на пяти континентах. Я решил, что, даже если я не могу разрешить эту загадку, я должен проповедовать ее важность.

Одну из таких лекций я помню особенно хорошо. Она состоялась в Техасском университете на одном из лучших физических факультетов в Соединенных Штатах. В аудитории было множество выдающихся физиков, таких как Стивен Вайнберг, Уилли Фишлер, Джо Полчински, Брайс Девитт и Клаудио Тейтельбойм, – все они внесли большой вклад в теорию гравитации. Меня очень интересовали их взгляды, так что в конце лекции я провел опрос аудитории. Если мне не изменяет память, Фишлер, Девитт и Тейтельбойм остались в меньшинстве, считая, что информация не теряется. Полчински был убежден аргументами Хокинга и проголосовал вместе с большинством. Вайнберг воздержался. В целом итог голосования был примерно три к одному в пользу Хокинга, однако значительная часть аудитории не захотела связывать себя с определенной позицией.

В период этой патовой ситуации наши со Стивеном пути несколько раз пересекались. Самая важная из всех этих встреч состоялась в городе Аспене.

## Схватка в Аспене

До лета 1964 года я никогда не видел холмов выше горы Минневаска (которая почти достигает километровой отметки) в Катскильских горах. Когда, будучи двадцатичетырехлетним аспирантом, я впервые увидел Аспен в Колорадо, он показался мне странным и волшебным горным королевством. Окружающие город высокие, покрытые снегом пики вызывают ощущение чего-то сверхъестественного и далекого от цивилизации, особенно в глазах городского мальчишки вроде меня. Уже став популярным лыжным курортом, Аспен все еще сохранял дух того колоритного периода конца девятнадцатого века, когда здесь добывали серебра Улицы были немощеные, а туристов в июне было так мало, что можно было разбить лагерь почти в любом месте в окрестностях города. В этом месте было полно довольно странных типов. В любом баре вы могли оказаться между настоящим американским ковбоем и грубым небритым шахтером или между грязным рыбаком и польским пастухом. Вы также могли затеять беседу с одним из представителей элиты американского бизнеса, или с концертмейстером берклевского студенческого оркестра, или с физиком-теоретиком.

На западной окраине города, между Аспен-Маунтин с юга и Ред-Маунтин с севера, располагалась группа невысоких зданий, окруженных большой стриженной лужайкой. Летними днями можно заметить, как десятки физиков, сидя за садовыми столиками, о чем-то спорят, что-то доказывают или просто радуются замечательной Погоде. В главном здании Аспеновского института теоретической физики смотреть особенно не на что, но сразу за ним, на открытом воздухе стоит затененная навесом доска. Именно здесь и происходит все самое интересное, когда некоторые величайшие мировые физики-теоретики встречаются на семинарах, чтобы обсудить свои самые свежие идеи.

В 1964 году я был в этом центре единственным студентом, причем, вероятно, за всю двухлетнюю тогда историю этого института. Но, по правде сказать, я оказался там не благодаря каким-то особым талантам в физике. С проходящего неподалеку континентального водораздела через город бежит речка Роуринг-Форк. Течение в ней быстрое и бурное, вода очень холодная, и, что самое важное, она полна серебра. Не металлического, с серебряных рудников, а живого серебра дикой радужной форели. Мой научный руководитель Питер удил на муху и, узнав, что я тоже этим занимаюсь, позвал на лето с собой в Аспен.

Когда я был мальчишкой, отец учил меня ловить форель на спокойных восточных реках, легендарных Биверкил-Ривер и Эзопус-Крик в Катскилле. Заводы там были совсем тихими, и в них можно было заходить по грудь. Часто видно было не только муху, но и коричневую форель, которая ее клюет. Однако на Роуринг-Форк в июне здравомыслящий рыбак стоял на берегу и делал все возможное, чтобы уследить, где находится его муха. Хотя мне понадобилось некоторое время, чтобы освоиться с этой техникой, я выловил в то лето много форелей и почти ничего не узнал о физике.

Сегодня я уже не так люблю Аспен. Ковбоев сменила элитная публика, и, на мой взгляд, лучше от этого не стала. За прошедшие годы я несколько раз возвращался сюда ради физики, а не рыбалки. Однажды, около 1990 года, проезжая через город по пути в Боулдер, я остановился, чтобы прочитать лекцию.

К тому времени черные дыры и загадка о пропавшей информации вновь стали появляться на экранах радаров. Общее мнение склонялось в пользу того, что прав Хокинг, но некоторые (помимо меня и 'т Хоофта) ставили это под вопрос. Среди них был неподражаемый Сидни Коулмен.

Сидни был колоритным персонажем и героем целого поколения физиков. С усами, впалыми глазами и длинными нечесаными волосами, он всегда напоминал мне Эйнштейна. У него был невероятно быстрый ум, а способность сразу ухватывать суть дела, особенно при обсуждении сложных и тонких вопросов, стала легендой. Сидни был добрым человеком, но

он терпеть не мог дураков. Не один известный докладчик в Гарварде (где Сидни был заслуженным профессором) уходил, поджав хвост, после безжалостного допроса, устроенного Коулменом. В тот день в Аспене его присутствие означало, что докладчик должен держаться высочайших стандартов.

По чистой случайности в аудитории было еще одно знакомое лицо. Как только я вышел на семинарскую площадку во дворе и направился к доске, передо мной выкатилось знакомое высокотехнологичное кресло на колесах, и Стивен Хокинг занял место в первом ряду. Как все знали, моей целью было подорвать аргументы Стивена относительно утраты информации. Моя стратегия состояла в том, чтобы сначала обозначить природу проблемы, повторив умозаключения Стивена. На это планировалось потратить около половины выделенного мне часа. Затем я собирался объяснить, почему эти рассуждения не могут быть правильными. Но я также хотел кое-что добавить к рассуждениям Стивена, чтобы сделать его аргументы еще более убедительными. Ведь чем сильнее его позиция, тем вероятнее, что понадобится смена парадигмы, если в итоге доказать, что он ошибается.

В рассуждениях Стивена я хотел заполнить важный пробел, о котором, по-видимому, никто не задумывался. Вот в чем была идея. Представьте, что область над самым горизонтом заполнена множеством крошечных невидимых ксерокопировальных машин. Когда любая информация, письменный документ например, падает к горизонту, эти машины дублируют ее, порождая две совершенно идентичные копии. Одна из них продолжает без помех двигаться сквозь горизонт во внутренние области черной дыры и, в конце концов, уничтожается в сингулярности. Но судьба второй копии значительно сложнее. Для начала она тщательно перемешивается и перетасовывается вплоть до полной нераспознаваемости (без знания схемы перемешивания). А затем она испускается вовне в виде Хокинговского излучения.

Фотокопирование информации перед самым пересечением горизонта, казалось бы, решает проблему. Рассмотрим сначала наблюдателей, парящих в стороне от черной дыры. Они увидят, как хокинговское излучение возвращает каждый бит информации. И они придут к выводу, что нет надобности менять правила квантовой механики. Грубо говоря, они посчитают, что хокинговские идеи относительно разрушения информации ошибочны.

А что можно сказать о свободно падающем наблюдателе? Сразу после пересечения горизонта он оглянется по сторонам и увидит, что ничего не случилось. Все его биты при нем, составляют ту же личность и продолжают падать в окружении тех же предметов, что и раньше. Горизонт, с этой точки зрения, – это не более чем безобидная точка невозврата, так что эйнштейновский принцип эквивалентности полностью соблюдается.

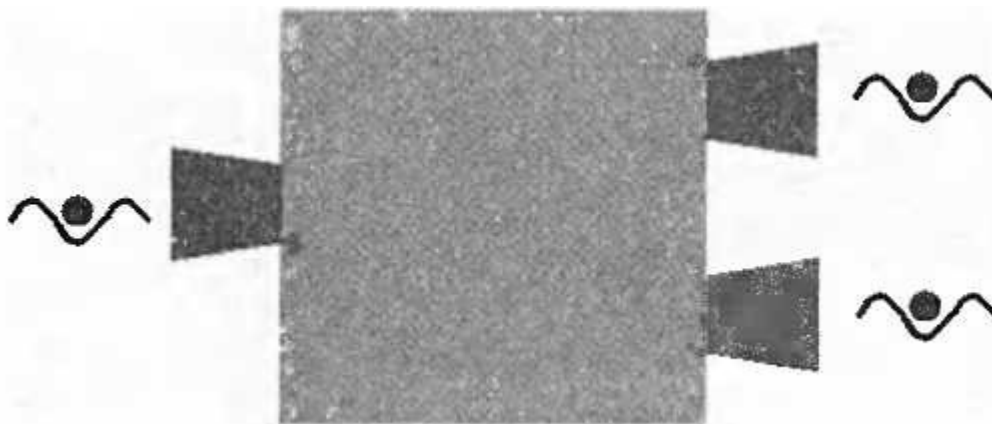
Может ли быть так, что горизонт черной дыры покрыт идеально надежными миниатюрными (возможно, планковских размеров) копировальными устройствами? Это кажется соблазнительной идеей. Если она верна, то может легко и логично объяснить парадокс Стивена: никакая информация в черной дыре не теряется, и будущие физики могут продолжать использовать принципы квантовой механики. Квантовые ксероксы на горизонте каждой черной дыры могли бы неожиданно положить конец Битве при черной дыре.

Сидни был впечатлен. Он повернулся на своем стуле лицом к аудитории и, в своей характерной манере, объяснил сказанное гораздо более ясно, чем излагал я сам. Стивен, однако, ничего не сказал. Скрючившись, он сидел на своем кресле с широкой улыбкой на лице. Было очевидно, что я знаю нечто, неизвестное Сидни. На самом деле и я и Стивен понимали, что мое объяснение было соломенным чучелом, которое создавалось лишь для того, чтобы его сжечь.

Мы со Стивеном знали, что идеальные устройства копирования квантовой информации противоречат принципам квантовой механики. В мире, управляемом математическими правилами, сформулированными Гейзенбергом и Дираком, идеальная копировальная машина невозможна. Я назвал это утверждение *принципом квантовой нексерокопируемости*. В новой области физики, называемой квантовой теорией информации, эта же идея называется *принципом неклонирования*.

Я торжествующе посмотрел на Коулмена и сказал: «Сидни, квантовый ксерокс невозможен», ожидая, что он немедленно меня поймет. Но в этот раз его огненно-быстрый мозг протормозил, и мне пришлось подробно все растолковывать. Объяснение, которое я дал Сидни и другим участникам семинара, заставило заполнить формулами всю доску и отняло почти все оставшееся время семинара. Вот его упрощенная версия.

Представьте себе машину с одним входом и двумя выходами. Во входной порт можно поместить любую систему в любом квантовом состоянии. Например, в копир можно загрузить электрон. Машина выполняет ввод и выдает два идентичных электрона. Причем объекты на выходах идентичны не только между собой, но и с тем, что первоначально был на входе.



На входе один электрон с определенной волновой функцией. На выходе два идентичных электрона

### ***Квантовый ксерокс***

Если бы такую машину можно было построить, она позволила бы обойти нерушимый принцип неопределенности Гейзенберга. Допустим, мы хотим узнать одновременно положение и скорость электрона. Все, что нам понадобится, – это скопировать его, а затем измерить положение одного клона и скорость другого. Но, конечно, такое невозможно в силу принципов квантовой механики.

К концу часа я успешно защитил парадокс Стивена и объяснил принцип нексерокопируемости, но у меня не осталось времени, чтобы изложить собственную точку зрения. И перед самым завершением семинара бестелесный механический голос Стивена провозгласил: «Так что теперь вы со мной согласны!» Его глаза озорно блестели.

Было очевидно, что я потерпел поражение. Я был повержен моим собственным дружественным огнем, недостатком времени и особенно быстрым остроумием Стивена. Покидая тем вечером Аспен, я задержался на Диффикалт-Крик и достал было свою нахлыстовую удочку. Однако моя любимая заводь оказалась полна шумных детей, плавающих на резиновой камере.

## **Часть III Контратака**

### **15**

### **Сражение в Санта-Барбаре**

К концу одного из пятничных рабочих дней в 1993 году все остальные сотрудники уже разошлись по домам. Только мы с Джоном и Ларусом еще сидели в моем стэнфордском офисе, трепались и пили сваренный Ларусом кофе. Исландцы варят самый крепкий кофе в мире. По словам Ларуса, это как-то связано с их традицией засиживаться за выпивкой до

глубокой ночи.

Ларус Торласиус, высокий исландский викинг (он говорит, что происходит не от норвежских воинов, а от ирландских рабов), был стэнфордским постдоком, только что защитившим диссертацию в Принстоне. Джон Углум, техасец и республиканец (но не религиозного толка, а либертарианец в духе Айн Рэнд<sup>94</sup>) был моим аспирантом. Несмотря на политические и культурные различия – сам я либеральный еврей из Южного Бронкса, – мы были приятелями с множеством чисто мужских развлечений: пить кофе (а иногда и что покрепче), спорить о политике, разговаривать о черных дырах. (Немного позже Аманда Пит, студентка из Новой Зеландии, расширит наше маленькое братство до трех братьев и сестры.)

К 1993 году черные дыры не только появились у физиков на экранах радаров, но и оказались в самом центре поля зрения. Отчасти причиной была провокационная статья, написанная примерно полутора годами ранее четырьмя известными американскими физиками-теоретиками. Курт Коллан, принстонский аристократ, ведущий ученый в области физики элементарных частиц, был с 1960-х годов влиятельным членом американского научного истеблишмента. (Он был научным руководителем диссертации Ларуса.) Энди Строминджер и Стив Гиддингс были более молодыми, напористыми профессорами Калифорнийского университета в Санта-Барбаре (UCSB). В то время я различал их по тому, что Гиддингс носил шорты, а Строминджер – подтяжки. Джефф Харви из Чикагского университета был (и остается) великим физиком, талантливым композитором (см. конец главы 24) и эстрадным комиком. Собирательно они были известны как CGHS (по инициалам), а описанную ими упрощенную версию черных дыр называли CGHS-дырами. Их совместная статья на короткое время стала сенсацией, отчасти потому авторы заявили, что наконец решили проблему потери информации при испарении черной дыры.

Что делало CGHS-теорию столь простой – оглядываясь назад, можно сказать обманчиво простой: она описывала вселенную, имеющую лишь одно измерение в пространстве. Их мир был даже проще Флэтландии, воображаемого двумерного мира Эдвина Эббота<sup>95</sup>. CGHS представили себе мир существ, которые живут на бесконечно тонкой линии. Эти создания были настолько простыми, насколько это возможно: не сложнее отдельных элементарных частиц. На одном конце этой одномерной вселенной находилась массивная черная дыра, достаточно тяжелая и плотная, чтобы захватывать все, что подходит к ней слишком близко.



94 Айн Рэнд (Алиса Зиновьевна Розенбаум, 1905–1982) – американская писательница и философ российского происхождения. Ею создано философское направление в рамках либертарианской философии, названное объективизмом, из которого вытекает предельный индивидуализм и стремление максимально ограничить функции государства – Примеч. перев.

95 Русский перевод: Эдвин Эббот. Флэтландия. Сферландия. – СПб.: Амфора, 2001. – Примеч. перев.



Написанная CGHS статья содержала исключительно элегантный математический анализ хокинговского излучения, но где-то в этом анализе они ошиблись и утверждали, что квантовая механика исключает сингулярность, а с ней и горизонт. Мы с Аарусом и еще одним коллегой, Йоргом Руссо, были среди нескольких человек, указавших на ошибку. Это сделало нас экспертами по CGHS-дырам. (Была даже особая версия CGHS-теории, названная RST-моделью по инициалам Руссо, Сасскинда и Торласиуса.)

Так вот, причиной, заставившей нас с Джоном и Аарусом задержаться в пятницу после работы, была надвигающаяся конференция, специально посвященная загадками и парадоксам черных дыр. Она начиналась через две недели в Санта-Барбаре, где находился Институт теоретической физики (ИТП)<sup>96</sup> при UCSB<sup>97</sup>. Как оценить ИТП в качестве научного учреждения? Если коротко, то очень высоко. К 1993 году он стал активным центром исследований по черным дырам.

Джеймс Хартл был самым уважаемым специалистом по черным дырам на физическом факультете UCSB. Джеймс был заслуженным мэтром, выполнившим совместно со Стивеном Хокингом прорывные работы по квантовой гравитации задолго до того, как она стала популярной. Но на факультете было четверо более молодых ученых, которым предстояло сыграть большую роль в Битве при черной дыре. Все они разменяли четвертый десяток и были на пике научной формы. Вы уже знаете Стива Гиддингса и Энди Строминджера (G и S в CGHS). Хотя оба они были моими друзьями, чьими работами я искренне восхищался, следующие два года показали, что они могут быть совершенно несносными противниками. Часто они доводили меня до отчаяния своей упертой приверженностью ошибочным идеям. Но в конце концов это более чем оправдалось.

Гэри Хоровиц, третий из молодежной сборной UCSB, был релятивистом, то есть специалистом по теории относительности. На ней он сделал себе имя и считался блестящим ученым. Он также работал с Хокингом и знал о черных дырах больше, чем кто-либо другой. Наконец, Джо Полчински недавно перевелся в Санта-Барбару из Техасского университета. Мы с Джо вместе работали над рядом исследовательских проектов, и я его хорошо знал. К тому же я всегда считал его очень приятным человеком с замечательным чувством юмора, а также был поражен мощностью, скоростью и блеском его интеллекта. С самого начала нашей дружбы – Джо тогда было около двадцати пяти, а мне сорок – у меня не было сомнений в том, что он станет величайшим физиком-теоретиком эпохи. И он меня не разочаровал.

Эти выдающиеся молодые физики тесно сотрудничали. Иногда они занимались черными дырами, иногда – теорией струн. Огромный талант этой маленькой сплоченной группы сделал ее очень влиятельной силой в теоретической физике. Он также превратил Санта-Барбару в одно из самых замечательных мест (если не *самое* замечательное), где мог бы оказаться физик-теоретик. Не было никаких сомнений, что конференция по черным дырам в Санта-Барбаре станет важным событием.

По-видимому, конференцию созывали для того, чтобы отметить эффект, произведенный статьей CGHS. Была надежда, что изобретенная CGHS математическая техника даст ключ к тому, что называлось тогда *информационным парадоксом*. Организаторы попросили меня сделать доклад о работе, которую мы с Аарусом и Йоргом выполнили в Стэнфорде, и вот под конец пятницы мы обсуждали, о чем мне рассказывать.

Возможно, всему виной повышенный уровень кофеина в кофе, или выброс тестостерона, или просто наше братство трех мушкетеров, но я сказал Джону и Ларусу: «Черт побери, я не хочу рассказывать о CGHS или RST. Это тупик<sup>98</sup>. Я хочу, чтобы мы сделали что-то потрясающее. Давайте подставимся и скажем что-нибудь очень смелое, такое, чтобы действительно привлечь внимание».

---

<sup>96</sup> Сегодня он называется KITP (Kavli Institute for Theoretical Physics) – Институт теоретической физики Кавли.

<sup>97</sup> Калифорнийский университет в Санта-Барбаре. – Примеч. перев.

<sup>98</sup> Оглядываясь назад, я считаю, что CGHS-теория очень многому нас научила. Большему, чем все, что было прежде. Она дала кристально ясную математическую формулировку обнаруженного Хокингом противоречия. И конечно, она очень сильно повлияла на ход моих собственных мыслей.

Уже некоторое время мы вдвоем искали, как обойти парадоксальный вывод Стивена, и идея начала выкристаллизовываться. Пока она была лишь смутным образом, у которого не было даже названия, но пришла пора действовать.

«Я считаю, что мы вдвоем должны собрать вместе разрозненные нити нашей полусырой идеи и, даже если мы не можем ее доказать, попытаться сделать ее более точной. Даже акт именования новой концепции может иногда добавить ясности. Предлагаю нам вместе написать статью о *дополнительности черных дыр*, а я представлю новую идею на конференции в Санта-Барбаре».

Рассказ «Не забудьте принять антигравитационные пилюли» (см. главу 13) – хорошее начало для объяснения того, что я задумал. Подобно фильму Акиры Куросавы «Ворота Расёмон», это история, увиденная глазами разных участников и приводящая к совершенно противоположным выводам. По одной из версий (императора и графа), Стив, преследуемый физик, аннигилировал в невероятно горячей среде, окружающей горизонт. Но, согласно Стиву, у истории был иной, куда более счастливый конец. Очевидно, что одна из версий ошибочна (а возможно, и обе); Стив не мог и выжить, и погибнуть у горизонта.

«Суть дополнительнойности черных дыр, – объяснял я коллегам, – в том, что, как бы безумно это ни звучало, *обе* истории в равной мере истинны».

Двое моих друзей были озадачены. Я уже не помню, что говорил им дальше, но это, вероятно было что-то в таком духе. Все, кто остаются вне черной дыры, – граф, император, его лояльные подданные – видят одно и то же<sup>99</sup>: Стив разогревается, испаряется и превращается в хокинговское излучение. Но что важно, все это происходит до того, как он достигнет горизонта.

Как придать этому смысл? Единственный способ, совместимый с законами физики, – допустить, что непосредственно над горизонтом существует некий чрезвычайно горячий слой, возможно, толщиной не больше планковской длины. Я признался Джону и Ларусу, что не представляю в точности, из чего этот слой может состоять, но объяснил, что наличие энтропии у черной дыры подразумевает, что этот слой должен состоять из крошечных объектов, скорее всего, не больше планковского размера. Горячий слой будет впитывать все, что падает на горизонт, подобно тому как капля чернил растворяется в воде. Я помню, что называл неизвестные крошечные объекты *атомами горизонта*, но, конечно, я не имел в виду обычные атомы. Я знаю об этих атомах горизонта не больше, чем физики девятнадцатого века знали об обычных атомах: только то, что они существуют.

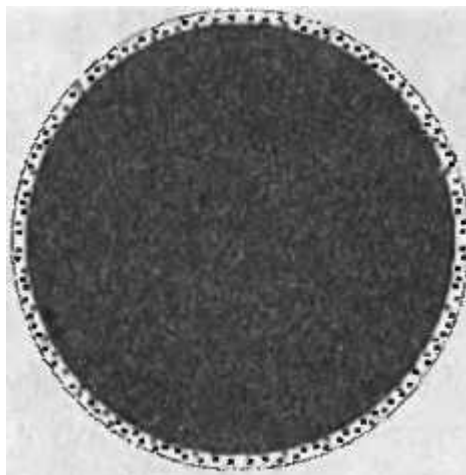
Этот горячий слой материи надо было как-то называть. Астрофизики уже предложили термин, на котором я в итоге остановился. Они использовали для анализа некоторых электрических свойств черных дыр идею воображаемой мембраны, окружающей черную дыру над самым горизонтом. Эту воображаемую поверхность они называли *растянутым горизонтом*, однако я предполагал, что на расстоянии планковской длины над горизонтом существует реальный слой материи, а не воображаемая поверхность. Более того, я утверждал, что любой эксперимент – например, опускание градусника для измерения температуры – подтвердит существование атомов горизонта<sup>100</sup>.

Мне понравился термин «растянутый горизонт», и я приспособил его для моих собственных нужд. Сегодня растянутый горизонт – стандартное понятие в физике черных дыр. Оно означает тонкий слой горячих микроскопических «степеней свободы», расположенных на расстоянии примерно одной планковской длины над горизонтом.

---

99 Я использую слово «видят» в несколько обобщенном смысле. Наблюдатель вне черной дыры может зарегистрировать энергию и даже индивидуальные биты информации, составлявшие тело Стива, в форме хокинговского излучения.

100 Физики еще с 1970-х годов знали, что если опустить термометр в окрестности горизонта, он покажет высокую температуру. Билл Унру, изобретатель глухих дыр, открыл этот факт, когда был студентом Джона Уилера.



Растянутый горизонт

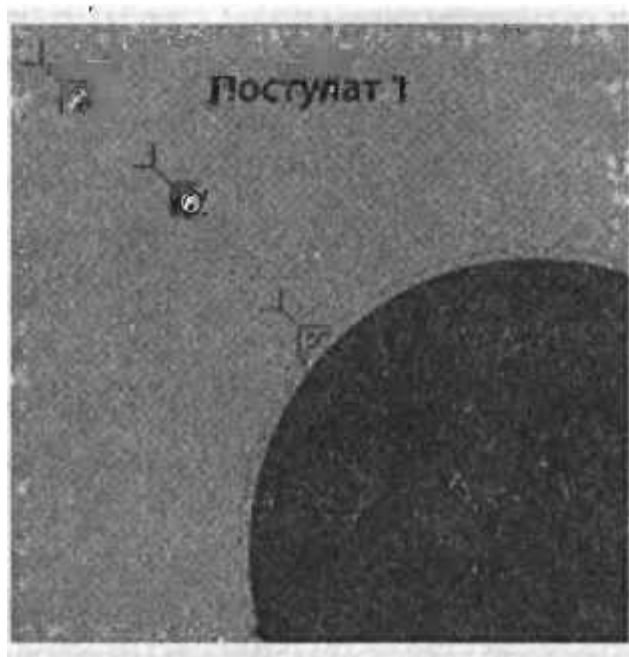
Растянутый горизонт помогает нам понять, как испаряются черные дыры. Время от времени один из энергичных атомов горизонта получает более сильный, чем обычно, толчок и выбрасывается с поверхности в космос. Можно представлять себе растянутый горизонт как тонкий горячий слой атмосферы. В этом случае испарение черной дыры будет очень похоже на то, как земная атмосфера постепенно рассеивается в открытом космосе. Но в дополнение к тому, раз черная дыра теряет массу при испарении, она также должна уменьшаться.

Но это лишь половина истории – видимая с наблюдательного пункта вне черной дыры. Саму по себе эту половину не назовешь особенно радикальной. Вещество падает в горячий суп. Суп испаряется. Биты информации уносятся вместе с паром. Все вполне обыденно. Если бы речь шла о чем угодно, кроме черной дыры, такое объяснение казалось бы ничем не примечательным.

Но что, если посмотреть изнутри или, если точнее, с точки зрения свободно падающего наблюдателя? Будем называть это версией Стива, и она будет выглядеть противоречащей наблюдениям снаружи (версии императора и графа).

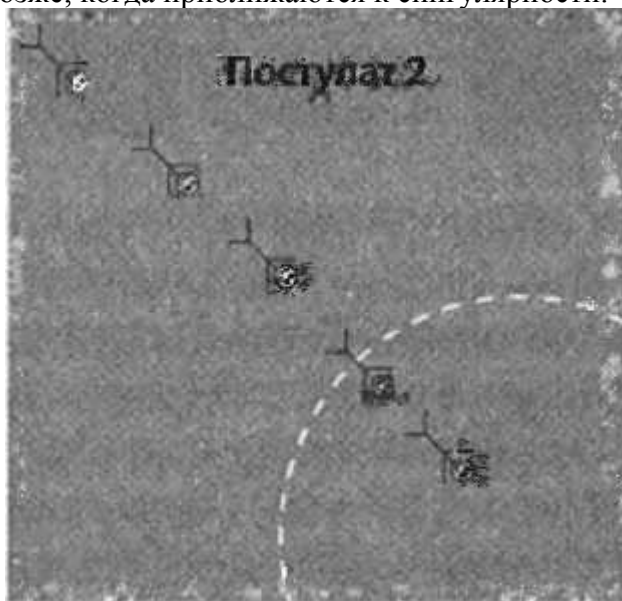
Я выдвигаю два постулата.

1. Для любого наблюдателя, остающегося вовне черной дыры, растянутый горизонт выглядит как горячий слой атомов горизонта, который поглощает, перемешивает и в конце концов испускает (в форме хокинговского излучения) каждый бит падающей в черную дыру информации.



2. Для свободно падающего наблюдателя горизонт выглядит абсолютно пустым

пространством. Такие свободно падающие наблюдатели не обнаруживают на горизонте ничего особенного, хотя он и является для них точкой невозврата. С разрушительными силами они встречаются позже, когда приближаются к сингулярности.

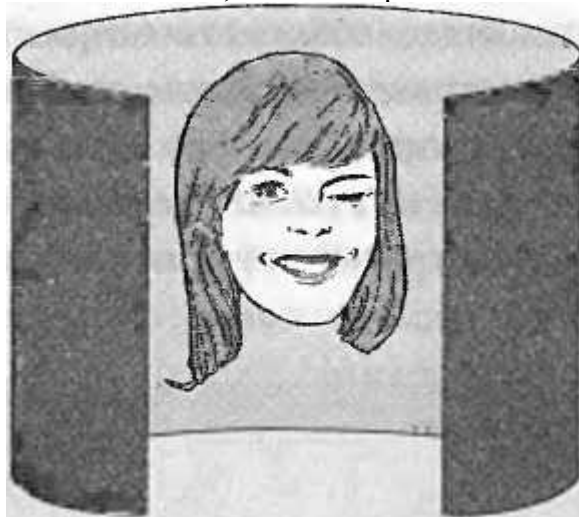


Добавлять сюда еще и третий постулат будет некоторым перебором, но я все же это сделаю.

3. Постулаты 1 и 2 оба истинны, а кажущееся противоречие не является реальным.

Ларус отнесся к этому скептически. Как это может быть, спрашивал он, чтобы две несовместимые друг с другом истории обе были правдивыми? Имеется внутреннее противоречие в утверждении, что падающий Стив погиб на горизонте и при этом прожил еще миллион лет. Элементарная логика говорит, что утверждение и его отрицание не могут вместе быть истинными. На самом деле я и сам задавался тем же вопросом.

На втором этаже физического факультета в Стэнфорде выставлена голограмма. Свет, отражающийся от двумерной пленки с беспорядочным узором темных и светлых пятнышек, фокусируется в пространстве и создает висящее в воздухе трехмерное изображение молодой симпатичной девушки, подмигивающей вам, когда вы проходите мимо.



Можно обойти вокруг иллюзорного образа и осмотреть его с разных сторон. Мы с Ларусом и Джоном время от времени задерживались возле голограммы. Теперь я в шутку сказал Аарусу, что поверхность черной дыры – горизонт – должна быть голограммой, двумерным снимком всей трехмерной материи внутри черной дыры. Ларус на это не купился. Я тоже, по крайней мере не в тот раз. На самом деле я не понял смысла своего собственного замечания.

Но я продолжал думать об этом какое-то время и нашел более серьезный ответ. Физика

– это экспериментальная и наблюдательная наука; если отбросить все умственные построения, то в остатке будет совокупность экспериментальных данных, а также математические уравнения, которые эти данные обобщают. Подлинное противоречие – это не расхождение между двумя умоглядными картинами. Такие картины больше связаны с ограничениями, наложенными нашим эволюционным прошлым, нежели с реальной действительностью, которую мы пытаемся понять. Подлинное противоречие обнаруживается лишь тогда, когда эксперименты приводят к противоречащим результатам. Например, если два одинаковых термометра, опущенных в сосуд с горячей водой, дадут разное значение температуры, мы вряд ли признаем такой результат; нам будет ясно, что с одним из термометров что-то не в порядке. Умоглядные представления важны для физики, но, если кажется, что они ведут к противоречию, когда в данных противоречия нет, значит, неверны именно представления.

Можем ли мы прийти к подлинному противоречию, если постулируем, что обе связанные с черной дырой истории – и Стива, и графа – истинны? Чтобы выявить противоречие, два наблюдателя должны встретиться после завершения эксперимента и сравнить свои записи. Но если одни наблюдения сделаны под горизонтом, а другой наблюдатель никогда его не пересекал, значит, по самому определению горизонта, они не могут встретиться, чтобы сравнить свои данные. Так что в реальности нет противоречия, есть только плохая умоглядная картина.

Джон спросил меня, что бы сказал на это Хокинг. Мой ответ оказался весьма точным: «О, Стивен бы улыбнулся».

### Дополнительность

Слово «дополнительность» ввел в физику легендарный отец-основатель квантовой механики Нильс Бор. Бор и Эйнштейн были друзьями, но они постоянно спорили о парадоксах и кажущихся противоречиях этой теории. Истинным отцом квантовой механики был Эйнштейн, но он ее терпеть не мог и приложил все свои беспримерные интеллектуальные силы к тому, чтобы пробить брешь в ее логических основаниях. Раз за разом Эйнштейн думал, что нашел противоречие, и раз за разом Бор отражал его атаки своим излюбленным оружием – дополнительностью.

*Я* не случайно использовал *дополнительность* для описания того, как можно разрешить парадоксы квантовых черных дыр. В 1920-х годах квантовая механика была полна кажущихся противоречий. Одним из них была нерешенная проблема света: является он волнами или частицами? Иногда кажется, что свет ведет себя одним способом, а иногда – другим. Утверждать, что свет является и тем и другим – и волнами, и частицами, – было бессмысленно. Как узнать, когда использовать уравнения для частиц, а когда волновые уравнения?

Другая загадка. Мы считаем, что частицы – это крошечные объекты, которые занимают определенное положение в пространстве. Но частицы могут передвигаться из одной точки в другую. Описывая их движение, мы указываем, как быстро и в каком направлении они движутся. Почти по определению, частица – это вещь, обладающая положением и скоростью. Но нет! Принцип Неопределенности Гейзенберга – закон, который, кажется, бросает вызов самой логике, – утверждает, что положение и скорость не могут быть определены совместно. Еще один абсурд.

Стало происходить что-то очень странное. Казалось, здравый смысл спускают в канализацию. Конечно, реальных противоречий в экспериментальных данных не было; каждый эксперимент давал определенный результат, показания на шкалах, числа. Но в умоглядной картине что-то было глубоко ошибочно. Модель реальности, прошитая в наших мозгах, не могла охватить истинную природу света и неопределенный характер движения частиц.

Мое отношение к парадоксам черных дыр было таким же, как отношение Бора к

парадоксам квантовой механики. В физике противоречие является противоречием, только если оно приводит к несовместимым экспериментальным результатам. Бор также всегда стремился к точному использованию слов. Если слова используются неточно, это иногда приводит к кажущимся противоречиям там, где их на самом деле нет.

Дополнительность касается неверного использования союза «и». «Свет – это волны, *и* свет – это частицы». «Частица имеет положение *и* скорость». Фактически Бор сказал: избавиться от «и», заменить его на «или»: «Свет – это волны, *или* свет – это частицы». «Частица имеет положение *или* скорость».

Бор имел в виду, что в одних экспериментах свет ведет себя как совокупность частиц, а в других – как волна. Нет такого эксперимента, где бы он вел себя как то и другое одновременно. Если измерять определенные волновые характеристики, скажем значение электрического поля вдоль волны, вы получите ответ. Если измерять свойство, характеризующее частицы, например положение фотонов в световом пучке очень низкой интенсивности, вы тоже получите ответ. Но не пытайтесь измерять волновые свойства одновременно с измерением свойств частиц. Одно встанет на пути у другого. Можно измерить волновые свойства *или* корпускулярные свойства. Бор говорил, что ни волны, ни частицы не являются полным описанием света, но они *дополняют* друг друга.

В точности то же самое верно и относительно положения и скорости. Некоторые эксперименты чувствительны к положению электрона: например, выявляющие точку, которую электрон подсветил, столкнувшись с телевизионным экраном. Другие эксперименты чувствительны к его скорости, например выявляющие, насколько сильно искривляется траектория электрона при прохождении вблизи магнита. Но ни один эксперимент не может дать точное положение *и* скорость электрона.

### Микроскоп Гейзенберга

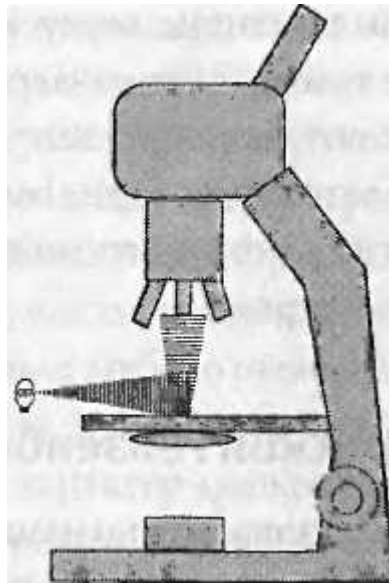
Но почему мы не можем одновременно измерить положение и скорость частицы? Измерение скорости объекта – это, в действительности, просто измерение его положения в два последовательных момента времени, чтобы выяснить, насколько значительно он переместился за это время. Если можно измерить положение частицы один раз, то, естественно, это можно сделать дважды. Мысль о том, что положение и скорость нельзя измерить одновременно, кажется противоречием. Похоже на то, что Гейзенберг говорит ерунду.

Стратегия Гейзенберга была ярким примером того образа мысли, который делает дополнительность столь убедительной. Как и Эйнштейн, он стал мысленным экспериментатором. Как, спрашивал он, можно было бы на практике попытаться измерить одновременно положение *и* скорость электрона?

Он начал с того, что надо измерить положение в два разных момента времени, чтобы из этих данных вывести скорость. Более того, надо измерить положение, не возмущая движение электрона, в противном случае возмущения могут исказить измерение первоначальной скорости.

Самый прямой способ измерить положение объекта – посмотреть на него. Другими словами, направить на него свет и по отраженному свету определить положение. В действительности наши глаза и мозг имеют специальную встроенную систему для определения положения объектов по их образам на сетчатке глаза. Это одна из «аппаратных» возможностей, которыми нас наделила эволюция.

Гейзенберг представил, что смотрит на электрон в микроскоп.



Идея была в том, чтобы очень аккуратно коснуться электрона световым лучом, так аккуратно, чтобы толчок не изменил его скорость, а затем сфокусировать луч и построить изображение. Но Гейзенберг обнаружил, что попался в ловушку свойств света. Прежде всего, рассеяние света одним электроном – это задача для корпускулярной теории электромагнитного излучения. Даже при самом аккуратном обращении с электроном Гейзенберг не мог попасть в него менее чем одним фотоном. Этот фотон должен быть очень слабым, то есть иметь очень низкую энергию. Столкновение с энергичным фотоном вызвало бы нежелательный сильный толчок.

Все изображения, созданные волнами, по своей природе размыты, и чем больше длина волны, тем менее резкой становится картинка. Радиоволны имеют наибольшую длину волны – от 30 сантиметров и более. Они дают замечательные изображения астрономических объектов, но если попробовать снять портрет в радиоволнах, он выйдет совсем нечетким.



Микроволны – следующие в направлении более коротких волн. Портрет, построенный сфокусированными 10-сантиметровыми микроволнами, по-прежнему был бы слишком размыт, чтобы различить на нем черты лица. Но когда длина волны уменьшается до пары сантиметров, становятся различимы нос, глаза, рот.



Простое правило: нельзя добиться фокусировки лучше, чем длина волны излучения, которое строит изображение. Размеры деталей лица – несколько сантиметров, и они становятся различимы лишь в более коротких волнах. Когда длина волны уменьшается до десятых долей сантиметра, лицо становится совершенно четким, хотя, возможно, мелкие прыщики на нем и не будут видны.



Допустим, Гейзенберг хочет получить достаточно четкое изображение электрона, чтобы увидеть его положение с точностью до микрона<sup>101</sup>. Для этого ему придется использовать свет с длиной волны меньше микрона.

И вот тут ловушка захлопывается. Помните, в главе 4 говорилось, что чем короче длина волны фотона, тем выше его энергия? Например, энергия одного радиоволнового фотона столь мала, что он не окажет на атом почти никакого влияния. Напротив, энергии одномикронного фотона будет достаточно, чтобы возбудить атом, забросив электрон вверх по энергетической лестнице квантовых орбит. Ультрафиолетовый фотон с длиной волны в десять раз меньше будет достаточно энергичен, чтобы вовсе вышибить электрон из атома. Так что Гейзенберг оказался в ловушке. Если он хочет определить положение электрона с высокой точностью, за это надо заплатить цену. Ему придется использовать очень энергичный фотон, который «толкнет» электрон и непредсказуемым образом изменит его движение. Если же использовать слабый фотон с небольшой энергией, то лучшее, что можно получить, это очень туманное представление о местоположении электрона. Настоящая уловка-22<sup>102</sup>.

Возможно, у вас возникнет вопрос: а можно ли вообще измерить скорость электрона?

---

<sup>101</sup> Микрон – это одна миллионная метра. Это примерно соответствует размеру очень маленькой бактерии.

<sup>102</sup> В романе «Уловка-22» американского писателя Джозефа Хеллера описана ситуация, когда военный пилот может быть освобожден от службы, если он сошел с ума, но он должен сам написать заявление об этом, которое официально (согласно бюрократической инструкции, известной как «уловка-22») рассматривается как доказательство его психического здоровья. В англоязычном мире выражение «уловка-22» стало нарицательным для обозначения абсурдной безвыходной ситуации. – Примеч. черев.



Ответ – можно. Для этого нужно измерить его положение дважды, но с очень низкой точностью. Например, можно использовать длинноволновый фотон, чтобы получить очень размытый образ, а затем повторить эту операцию спустя очень длительное время. Измеряя два размытых образа, можно точно определить скорость, но ценой потери точности определения положения.

Что бы ни придумывал Гейзенберг, ему никак не удавалось одновременно определить положение и скорость электрона. Я представляю себе, как он и, конечно, его наставник Бор стали задумываться, есть ли вообще какой-то смысл считать, что электрон обладает одновременно положением и скоростью. Согласно философии Бора, электрон можно описать как имеющий положение, которое можно точно измерить, используя очень коротковолновый фотон, *или* можно описать его как имеющий скорость, измеримую с помощью длинноволновых фотонов, но не как то и другое сразу. Измерение одной характеристики препятствует измерению другой. Бор выразил это, сказав, что два типа знания – положение и скорость – это взаимно дополнительные аспекты электрона. И конечно, в рассуждениях Гейзенберга нет ничего специфичного именно для электрона; они в той же мере приложимы к протону, атому или шару для боулинга.

История про графа, императора и Стива кажется внутренне противоречивой. Но наблюдение битов информации внутри черной дыры и наблюдение их вовне горизонта несовместимы точно так же, как несовместимы друг с другом измерения положения и скорости. Никто не может быть одновременно и вне, и внутри горизонта. По крайней мере, это было утверждение, которое я собирался сделать в Санта-Барбаре.

### Санта-Барбара

Черные дыры реальны. Вселенная полна ими, и они относятся к числу самых впечатляющих и неистовых космических объектов. Но в 1993 году на конференции в Санта-Барбаре большинство физиков не слишком интересовались астрономическими черными дырами. Их больше заботили не телескопические наблюдения, а мысленные эксперименты. И информационный парадокс наконец привлек к себе самое серьезное внимание.

Конференция была скромной – пожалуй, не большее сотни участников. Когда я вошел в аудиторию, то увидел множество знакомых лиц. С краю сидел Стивен в своем инвалидном кресле. Якоб Бекенштейн, с которым я никогда прежде не встречался, находился в центре аудитории. Местная команда – Стив Гиддингс, Джо Полчински, Энди Строминджер и Гэри Хоровиц – вся была на виду. Им предстояло сыграть большую роль в грядущей революции, но тогда они были противниками, одураченными пехотинцами армии информационных лузеров<sup>103</sup>. Справа в первом ряду сидел Герард т' Хоофт, готовый к битве.

### Лекция Хокинга

Вот что я запомнил из выступления Хокинга. Стивен сидел, неудобно развалившись в своем колесном кресле, голова его была слишком тяжела, чтобы держать ее прямо, все остальные замолкли в напряженном ожидании. Он находился на правой стороне сцены, откуда ему был виден большой проекционный экран, а сам он мог следить за аудиторией. К этому времени Стивен утратил возможность говорить собственным голосом. Его электронный голос вещал заранее записанный текст, а ассистент манипулировал со слайд-проектором, стоя позади него. Проектор был синхронизирован с записанным сообщением, и непонятно, что там вообще делал ассистент.

Несмотря на механический тембр, его голос был полон личного звучания. А улыбка Стивена демонстрировала полную уверенность и убежденность. В его выступлениях есть

---

103 Тут игра слов: *information losers* можно понимать и как «информационных неудачников», и как «теряющих информацию», то есть придерживающихся взглядов Хокинга. – *Примем, перев.*

загадка: как присутствие неподвижного хрупкого тела вдыхает столько жизни в мероприятия, которые в ином случае казались бы скучными? Едва заметная мимика Стивена несет такой магнетизм и харизму, какие мало у кого встречаются.

Сам доклад не был особо запоминающимся, по крайней мере если говорить о его содержании. Стивен рассказывал о том, о чем и собирался и о чем я говорить не хотел, – о CGHS-теории и о том, как CGHS ее развили (он великодушно упомянул RST за найденную ошибку). Его основное сообщение состояло в том, что если корректно проделать все выкладки в CGHS, то результаты подтверждают его собственную теорию о том, что информация не может высвечиваться из черной дыры. Для Стивена урок CGHS состоял в том, что математика этой теории просто доказывала его точку зрения. Для меня урок был в том, что не только умозрительная картина дефектна, но и математические основания квантовой гравитации, по крайней мере в том виде, в каком они вошли в CGHS, внутренне противоречивы.

Самым неожиданным в докладе Стивена стал последовавший за ним период вопросов и ответов. Один из организаторов конференции поднялся на сцену и предложил аудитории задавать вопросы. Обычно вопросы бывают техническими, и порой они оказываются довольно длинными, поскольку спрашивающий хочет показать, что он понимает суть дела. Но затем в аудитории повисает мертвая тишина. Сотня поклонников превращается в молчаливых монахов в странно затихшем соборе. Стивен сочиняет ответ. Метод, которым он коммуницирует с внешним миром, удивителен. Он не может говорить или поднять руку, чтобы подать знак. Его мускулы настолько атрофированы, что вряд ли могут произвести хоть какое-то усилие. У него не хватает ни сил, ни координации, чтобы печатать на клавиатуре. Если память мне не изменяет, в то время он подавал сигналы, слегка надавливая на джойстик.

На маленьком компьютерном экране, закрепленном на подлокотнике его кресла, более или менее непрерывно бегут последовательности слов и вспыхивают буквы. Стивен выдергивает их поодиночке и сохраняет в компьютере, формируя предложение или пару. Это может занять до десяти минут. Пока оракул составляет ответ, в комнате стоит тишина, как в склепе. На фоне нарастающего ожидания и беспокойства все разговоры прерываются. Наконец, появляется ответ: это может быть не более чем «да», или «нет», возможно, фраза или пара фраз.

*Я* видел, как это происходит в помещении с сотней физиков, а равно на небольшом стадионе с пятью тысячами зрителей, включая южноамериканского президента, министра обороны и нескольких высших генералов. Моя реакция на эту невероятную тишину варьировалась от удивления до серьезного раздражения (почему мое время растрачивается на этот фарс?). Мне всегда хотелось пошуметь, может быть, просто поговорить с соседом, но я никогда этого не делал.

Что же в Стивене вызывает такое восхищенное внимание, какого мог бы удостоиться святой, раскрывающий глубочайшие секреты Бога и Вселенной? Хокинг высокомерный человек, самовлюбленный и предельно эгоцентричный. Впрочем, это верно в отношении половины людей, которых я знаю, включая меня самого. *Я* думаю, что ответ на этот вопрос отчасти связан с магией и таинственностью бестелесного интеллекта, который перемещается по Вселенной в инвалидном кресле. Но отчасти дело в том, что теоретическая Физика – это небольшой мир, состоящий из людей, знающих друг друга много лет. Для большинства из нас это продолжение семьи, и Стивен – любимый и глубоко уважаемый член этого семейства, несмотря даже на то что порой он вызывает фрустрацию и раздражение. Нас всех очень тревожит, что он не может общаться иначе, как тем скучным и долгим способом, который он использует. Поскольку мы ценим его точку зрения, то сидим и тихо ждем. *Я* также думаю, что степень концентрации Стивена в процессе составления ответа, вероятно, столь высока, что он даже не замечает странной тишины вокруг.

Как я уже сказал, доклад был незапоминающимся. Стивен сделал свои обычные заявления: информация уходит в черную дыру и никогда не возвращается. К тому времени,

когда черная дыра испаряется, она полностью пропадает.

Сразу вслед за Хокингом выступал Герард т' Хоофт. Он тоже очень харизматичный человек, вызывающий всеобщее восхищение физического сообщества. Выступления Герарда производят колоссальный эффект и заслужили ему огромное уважение. Хотя его не всегда легко понять, с ним не связано такой «тайны оракула», как с Хокингом. Он довольно прямолинейный и вполне осязаемый датчанин.

Презентации Герарда всегда забавны. Он любит использовать свое тело, иллюстрируя разные моменты, и умеет готовить впечатляющую графику. Спустя много лет я помню видео, которое он подготовил для иллюстрации горизонта черной дыры. Сфера была случайным образом заполнена черными и белыми пикселями. По ходу видео пиксели начали мигать, переходя из черных в белые и обратно. Картинка выглядела как белый шум на неисправном телевизоре. Было совершенно очевидно, что идеи т' Хоофта похожи на мои собственные в том, что касается существования активного слоя быстро меняющихся атомов горизонта, порождающих энтропию черной дыры. (Я уже опасался, что он перехватит мои аплодисменты, предложив собственную версию дополненности черных дыр» но если он об этом и думал, то не сказал.)

т' Хоофт – чрезвычайно глубокий и оригинальный мыслитель, как и очень многие оригиналы, он часто остается недопонятым. После его доклада о черных дырах стало ясно, что он утратил контакт с аудиторией. Не то чтобы слушающим стало скучно – вовсе нет, – но они не понимали его логики. Напомню: горизонт черной дыры считался пустым пространством, а не дефектным телеэкраном.

В общем, я сомневаюсь, что хоть один человек изменил свое мнение относительно судьбы информации в черной дыре. Никто не опрашивал аудиторию, но я бы оценил, что к этому моменту счет был где-то 2:1 в пользу Хокинга.

Что показалось мне удивительным в течение всей остальной части конференции, так это упорный отказ рассматривать верное решение парадокса. Большинство докладчиков упоминали о трех возможных решениях.

1. Информация уходит с хокинговским излучением.
2. Информация пропадает.
3. Информация в итоге удерживается в особом крошечном остатке черной дыры, который сохраняется после испарения. (Обычно остаток был не больше планковского размера и не тяжелее планковской массы.)

Один за другим докладчики повторяли эти три возможности и сразу отбрасывали первую из них. Среди выступающих сложился консенсус: информация или теряется, как настаивал Хокинг, или скрывается в некоем крошечном остатке, способном поглотить неограниченное количество информации. Возможно, были и отдельные защитники теории дочерних вселенных, но я этого не помню. Почти никто, за исключением т' Хоофта и еще пары человек, не выражал уверенности в обычных законах информации и энтропии.

Дон Пейдж ближе всех подошел к выражению такой уверенности. Пейдж – дружелюбный человек-медведь с Аляски, обладающий колоссальным аппетитом. Очень подвижный, шумный, поклонник всякого экстрима, Дон – это ходячее противоречие, по крайней мере на мой вкус. Он выдающийся физик и глубокий мыслитель. У него очень впечатляющий уровень понимания квантовой теории, теории вероятности, информации, черных дыр и общих основ Научного метода познания. Он также евангельский христианин. Однажды он потратил больше часа, объясняя мне с применением тематических выкладок, почему вероятность того, что Иисус – Сын Божий, превышает 96 процентов. Но его физика и математика не идеологизированы и блестящи. Его работы оказали глубокое влияние не только на мои представления о черных дырах, но и на всю эту область знания.

В своем выступлении Дон повторил мантру о трех возможностях, но он, похоже, куда менее других был склонен отбрасывать первый вариант. Мне казалось, он действительно верил, что черные дыры должны уважать обычные законы природы, требующие, чтобы информация утекала при испарении. Но он тоже не видел, как примирить это с принципом

эквивалентности. Просто поразительно, насколько невосприимчивы были тогда физики к возможности утечки информации с хокинговским излучением наподобие того, как она улетучивается с выкипающей из чайника водой.

### Дополнительность черных дыр

Битва при черной дыре достигла мертвой точки. Ни одна из сторон, похоже, не могла повлиять на другую. На самом деле, дым над полем битвы стоял такой плотный, что трудно было различить сражающиеся стороны. Если не считать Хокинга и 'т Хоофта, остальные, по сложившемуся у меня впечатлению, представляли собой множество шатающихся контуженых солдат, пребывающих в полной дезориентации.

Мой доклад был назначен на следующий день. Я чувствовал себя во многом как Шерлок Холмс, говорящий Ватсону: «Когда вы исключили все невозможное, то, что осталось, даже самое невероятное, и есть истина». Поднимаясь для выступления, я чувствовал, что все исключено, кроме одной возможности – возможности, которая, похоже, звучит столь невероятно, что кажется нелепостью. Тем не менее, несмотря на всю абсурдность дополнительной черных дыр, эта идея верна. Все альтернативы относятся к разряду невозможного.

«Меня не беспокоит, согласитесь ли вы с тем, что я скажу. Я только хочу, чтобы вы запомнили сказанное», – этими двумя фразами я начал выступление; четырнадцать лет спустя<sup>104</sup> я все еще их помню.

Тогда, используя физическую терминологию, я обрисовал два несовместимых исхода, содержащихся в истории про Стива. «Очевидно, что по крайней мере один из финалов должен быть ошибочным, поскольку в них утверждаются противоположные вещи», – в зале согласно закивали. Но дальше я произнес: «Тем не менее я пришел сказать вам невозможное: ни одна из историй не ложная. Они обе истинные – дополнительным образом».

Объяснив, каким образом Бор использовал термин *дополнительность*, я показал, что в случае черной дыры экспериментатор стоит перед выбором: остаться вне черной дыры и регистрировать данные на безопасном расстоянии от горизонта или прыгнуть в черную дыру и наблюдать все изнутри. «Вы не можете сделать то и другое», – подчеркнул я<sup>105</sup>.

Представьте, что к вашему дому доставили пакет. Ваша подруга, проходя мимо, видит, что почтальон не смог его вручить и отнес обратно в машину. В это же время вы, находясь дома, открываете дверь и забираете пакет из рук почтальона. Я думаю, все согласятся, что оба этих наблюдения не могут быть истинными. Кто-то ошибается.

Почему с черными дырами должно быть иначе? Я предложил проследить историю с пакетом немного дальше. В переводе с технического жаргона и математических символов эта история продолжается примерно так. Вечером в тот же день вы покидаете дом и встречаетесь со своей подругой в кафе. Она говорит: «Я шла днем мимо твоего дома и видела, что почтальон пытался доставить пакет. Но никто ему не открыл, так что он отнес пакет обратно в машину». – «Нет, ты ошибаешься», – отвечаете вы. – «Он доставил пакет. Это было новое платье, которое я заказал по каталогу». Очевидно, что противоречие стало явным. Оба наблюдателя знают, что имеет место несовместимость. На самом деле вам даже не обязательно выходить из дома, чтобы обнаружить противоречие. Разбор по телефону тоже его выявил бы.

Но горизонт черной дыры принципиально отличается от входа в ваш дом. Образно говоря, это однонаправленная дверь: можно войти, но нельзя выйти. По самому определению горизонта, никакое сообщение не может вырваться изнутри горизонта наружу. Наблюдатель вне горизонта навсегда отрезан от всего и всех внутри, причем не толстыми стенами, а

---

104 Книга впервые опубликована на английском языке в 2008 году. – Примеч. перев.

105 Язык, который я использовал, был обычной математикой, применяемой физиками-теоретиками при общении, но я атаковал умозрительную картину, созданную прежним опытом, а не математические формулы. С тем же Успехом можно было использовать картинки.

фундаментальными законами физики. Самое последнее звено в цепочке, приводящей к противоречию, – сведение двух якобы несовместимых версий в единое наблюдение – физически неосуществимо.

Я бы хотел добавить к этому кое-какие философские ремарки о том, как эволюция привела нас к той умозрительной картине, которая руководит нашими действиями, когда мы входим в пещеры, палатки, дома и двери, но вводит в заблуждение, когда применяется к черным дырам и горизонтам. Однако такие ремарки были бы проигнорированы. Физики хотят фактов, уравнений и данных, а не философии и научно-популярной эволюционной психологии.

Стивен улыбался по ходу моего сообщения, но я сильно сомневался, что он со мной согласен.

Затем я использовал аналогию с каплей чернил, падающей в сосуд с водой, чтобы проиллюстрировать, как растянутый горизонт может поглотить информацию, затем перемешать ее и, наконец, подобно тому как вода испаряется из сосуда, информация может быть унесена хокинговским излучением. Для всякого, кто находится вне черной дыры, это все довольно обыденно – черные дыры и ванны не так уж сильно различаются, сказал я.

Аудитория была в беспокойстве; несколько рук неуверенно поднялись для протеста. Все знали, как информация испаряется из ванны, но что-то было упущено: что будет с тем, кто падает в черную дыру? Промокнет ли он внезапно, достигнув растянутого горизонта? Нет ли тут нарушения принципа эквивалентности?

Так что я перешел к другой части истории: «Для всякого, кто падает в черную дыру, горизонт выглядит совершенно обычным пространством. Нет растянутого горизонта, нет невероятно горячих микроскопических объектов, нет кипящего варева – ничего необычного: просто пустое пространство». Далее я объяснил, почему никогда не будет зарегистрировано никакого противоречия.

Я не знаю, продолжал Стивен улыбаться или нет. И, как я узнал позже, большинство релятивистов в аудитории подумало, что у меня не все дома.

Даже во время доклада было видно, что я ухватил внимание публики. Герард с его колючим характером сидел в первом ряду, покачивая головой и хмурясь. Я знал, что из всех присутствующих он лучше всех понимает, о чем я говорю. Я также знал, что он согласен со мной. Но ему бы хотелось, чтобы все это было подано его способом.

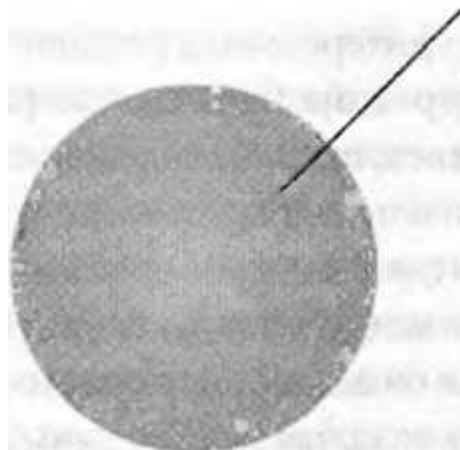
Больше всего меня интересовала реакция людей из Санта-Барбары – Гиддингса, Хоровица, Строминджера и особенно Полчински. Я не смог ее уловить, пока был на сцене, но позднее выяснил, что мои аргументы ни в малейшей степени на них не повлияли.

Но нашлось и двое симпатизировавших мне слушателей. В кафетерии, на ланче после моего выступления Джон Прескилл и Дон Пейдж подошли и сели со мной. Гиперактивный Дон принес поднос с огромной горой еды, включая три огромных десерта. (Было ясно, откуда берется вся его энергия.) Дон может говорить громко и фанатично, но он также очень хороший слушатель, и тогда он находился именно в этом режиме. Я уже знал, что ему понравилась моя идея о том, что черные дыры – более или менее обычные объекты, когда дело доходит до информации. Он открыто говорил об этом в своем собственном энергичном выступлении.

Рядом с ним Джон Прескилл выглядел более сдержанным, хотя ни в коем случае не отстраненным. Худощавый человек с ироничным чувством юмора, Джон был примерно в том же возрасте, что и Джо Полчински, и занимал тогда место профессора в Калифорнийском технологическом институте. Калтех был домом двух величайших физиков столетия – Мюррея Гелл-Манна и Дика Фейнмана. Сам Джон был хорошо известным физиком с репутацией исключительно точного стрелка. Подобно Сиднею Коулмену, Джон – один из тех людей, чья ясность мысли наделяет их особым моральным авторитетом. Для меня беседы с Джоном всегда были очень полезны. Разговор, который состоялся в тот день, стал буквально откровением. Но прежде, чем перейти к объяснению, я должен немного подробнее рассказать о дополнительности черных дыр.

## Глядя на горизонт в микроскоп Гейзенберга

Одинокий атом водорода падает в черную дыру. Первая наивная картина: крошечный атом следует по траектории, пересекающей горизонт, совершенно без помех. В классической физике атом пересечет горизонт в строго определенном месте – в точке, размером не больше самого атома. Это кажется верным, поскольку, согласно принципу эквивалентности, в момент, когда частица водорода пересекает точку невозврата, не должно случиться ничего катастрофического.

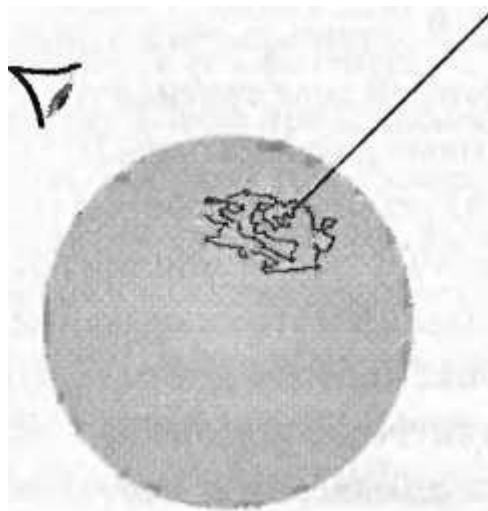


Но это слишком наивно. Согласно дополнительности черных дыр, наблюдатель, следящий за процессом извне, увидит, как атом входит в очень горячий слой (растянутый горизонт), подобно частице, влетающей в сосуд с горячей водой. Упав в слой горячего вещества, атом со всех сторон бомбардируется неистовыми энергетическими степенями свободы. Сначала он получает удар слева, потом сверху, потом снова слева, затем справа. Атом шатается, как пьяный матрос. Броуновское движение очень метко называют *случайным блужданием*.



*Броуновское движение*

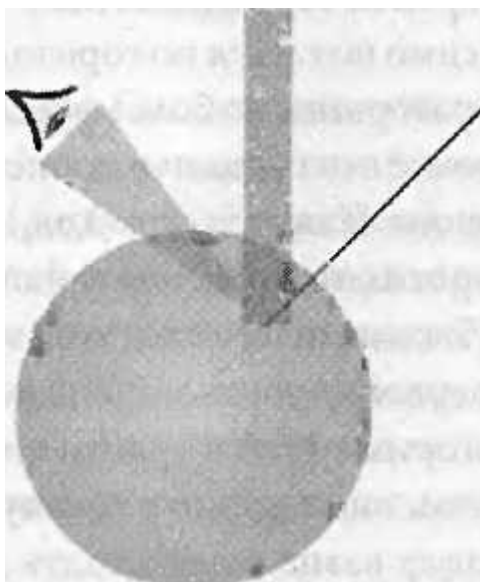
Можно ожидать, что с атомом произойдет то же самое, когда он упадет в слой горячих степеней свободы, из которых состоит растянутый горизонт, – он станет шататься по всему горизонту.



Но даже эти – слишком упрощенная картина. Растянутый горизонт столь горяч, что атом будет разорван на части – *ионизирован*, если пользоваться научной терминологией, – и электрон с протоном станут независимо шататься по горизонту. Даже электроны и кварки могут быть разорваны на более фундаментальные составляющие. Заметьте, что всё это считается происходящим *до того*, как атом пересечет горизонт. Кажется, это Дон, приканчивая третий десерт, язвительно спросил: не представляет ли это затруднений для дополнительности? Похоже, что у атома должно быть два описания даже *до того*, как он пересечет горизонт. В одном атом ионизирован и шатается по всему горизонту. А в другом атом попадает в совершенно невозмущенном виде прямо в нужную точку горизонта. Почему кто-то не может извне понаблюдать за атомом и увидеть, что ничего катастрофического с ним не происходит? Это раз и навсегда опровергло бы дополнительность черных дыр.

Когда я начал объяснять, вскоре стало ясно, что Джон Прескилл обдумал этот вопрос и пришел к тому же выводу, что и я. Мы оба начали с того, что атом не может быть ионизирован, пока не достигнет точки, где температура вблизи горизонта поднимается примерно до 100 000 градусов. Это случается очень близко к горизонту, примерно в миллионной доле сантиметра от него. Именно там мы должны наблюдать электрон. Это не выглядит большой проблемой; миллионная доля сантиметра – не такая ужасно малая величина.

Что бы тут сделал Гейзенберг? Ответ, конечно, состоит в том, что он достал бы свой микроскоп и подсветил бы атом светом подходящей длины волны. В данном случае, чтобы увидеть атом, когда он находится в миллионной доле сантиметра от горизонта, он должен использовать фотоны с длиной волны  $10^{-6}$  сантиметра. А теперь мы попадаем в привычную ловушку: фотон со столь малой длиной волны несет большую энергию; в действительности у него такая энергия, что при попадании в атом последний *будет ионизирован*. Другими словами, любая попытка доказать, что атом *не* был ионизирован горячим растянутым горизонтом, сама обернется ионизацией атома. Пойдя еще дальше, мы обнаружим, что любая попытка увидеть, действительно ли электрон и протон совершают случайное блуждание по горизонту, приведет к выбросу частиц, которые будут разбросаны по всему горизонту.



Я не очень хорошо помню эту дискуссию, но припоминаю, что Дон очень оживился и произнес своим самым уверенным тоном, что я не шутил, когда называл это дополнительностью. Это в точности та самая вещь, о которой говорили Бор и Гейзенберг. На самом деле попытки экспериментально опровергнуть дополнительность черных дыр очень похожи на попытки опровержения принципа неопределенности – сам эксперимент порождает ту неопределенность, которую призван устранить.

Мы обсудили, что случится, когда атом еще более приблизится к горизонту. Гейзенберговский микроскоп должен будет использовать еще более энергичные кванты. В конце концов, чтобы следить за атомом на расстоянии планковской длины от горизонта, нам понадобится обстреливать его фотонами с энергией даже больше планковской. О том, что собой представляют такие столкновения, никто ничего не знает. Ни один ускоритель в мире никогда не разгонял частицы до энергии сколько-нибудь близкой к планковской. Джон Уилер сформулировал эту идею как принцип:

*Любое теоретическое доказательство того, что дополнительность черных дыр ведет к наблюдаемым противоречиям, непременно строится на произвольных допущениях о «физике за пределами планковского масштаба», или, иными словами, на допущениях о природе вещей, лежащих далеко за пределами нашего опыта.*

Тогда Прескилл поднял вопрос, который меня взволновал. Допустим, в черную дыру сбросили бит информации. Согласно моей точке зрения, некто снаружи может собрать хоккингское излучение и в конце концов восстановить этот бит. Но, предположим, что, получив этот бит, он сам прыгнет в черную дыру, неся бит с собой. Окажется ли внутри две копии этого бита? Это как если бы после получения пакета от почтальона вы остались дома, а ваша подруга пришла к вам. Не возникнет ли противоречия, когда наблюдатели встретятся и сравнят свои записи внутри черной дыры?

Вопрос Джона меня потряс. Я не задумывался о такой возможности. Если кто-то внутри обнаружит две копии одного и того же бита, это будет нарушением принципа квантовой нескорокопируемости. Это был наиболее серьезный вызов дополнительности черных дыр, с которым мне пришлось столкнуться. Ответ, хотя я несколько недель этого не понимал, был отчасти дан самим Прескиллом. Он предположил, что две копии, возможно, не сумеют встретиться прежде, чем столкнутся с сингулярностью. Физика окрестностей сингулярности – это глубоко загадочная терра инкогнита квантовой гравитации. Это позволило бы нам уйти от проблемы. Если так, то идеи Дона Пейджда играли бы центральную роль в обезвреживании первоначальной бомбы Прескилла.

*Что происходит с информацией, упавшей в черную дыру?*

*a) Она пропадает*

*b) Она выходит с хоккингским излучением*

*c) Она остается (доступна) в остатках черных дыр (включая остатки, которые*



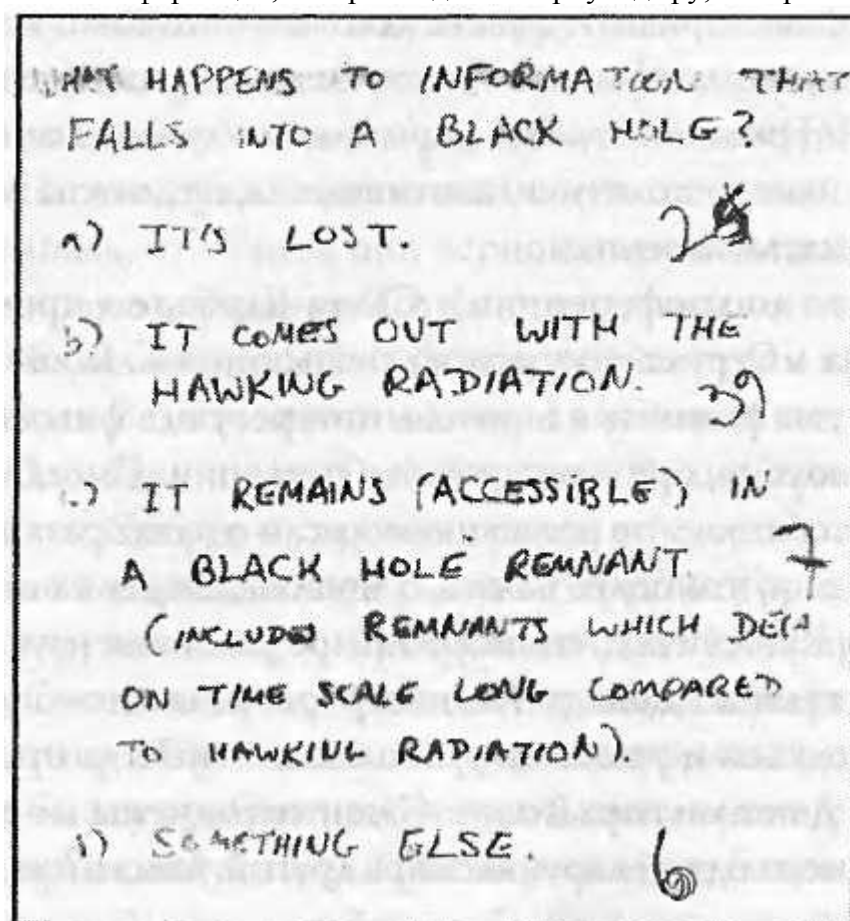
распадаются в масштабах времени больших сравнительно с хокинговским излучением)

d) Нечто иное

Наша дискуссия неожиданно оборвалась, когда кто-то объявил, что вот-вот начнется следующий доклад. Думаю, это могла быть последняя лекция на конференции, и я не знал, о чем она и кто ее читает. Я был слишком обеспокоен вопросом Джона, чтобы сконцентрироваться. Но прежде чем конференция окончательно завершилась, один из организаторов прервал мои размышления. Джо Полчински поднялся и сказал, что хотел бы провести опрос: «Считаете ли вы, что информация теряется, когда черные дыры испаряются, как полагает Хокинг, или вы думаете, что она возвращается обратно, как утверждают 'т Хоофт и Сасскинд?» Я думал, что перед началом конференции голоса распределились бы со значительным перевесом в пользу Хокинга. Мне было крайне интересно узнать, склонны ли люди на конференции хотя бы колебаться по этому вопросу.

Участников попросили проголосовать за один из трех привычных вариантов плюс еще один. Вот описание предложенных вариантов.

1. Версия Хокинга: информация, которая падает в черную дыру, необратимо теряется.



2. Версия 'т Хоофта и Сасскинда: информация утекает назад вместе с фотонами и другими частицами хокинговского излучения.

3. Информация оказывается захваченной в крошечных остатках планковских размеров.

4. Нечто иное.

После каждого варианта Джо подсчитывал поднятые руки и записывал результаты на белой доске у входа в аудиторию. Кто-то потом сфотографировал эту доску. И благодаря Джо эти итоги сохранились.

Окончательные результаты:

- ◆ 25 голосов за потерю информации;
- ◆ 39 голосов за информацию, уходящую с хокинговским излучением;
- ◆ 7 голосов за остатки;
- ◆ 6 голосов за нечто иное.

Победа с минимальным перевесом – 39 голосов за то, что, по сути, было принципом дополнительности черных дыр, против 38 за все остальные варианты вместе взятые – это было не столь радостно, как может показаться. Что считать настоящей победой? 45 к 32? 60 к 17? Имеет ли вообще значение, что думает большинство? Наука, в отличие от политики, как считается, не должна подчиняться общепринятым мнениям.

Незадолго до конференции в Санта-Барбаре я прочел книгу Томаса Куна «Структура научных революций»<sup>106</sup>. Вообще-то, как и большинство физиков, я не очень интересуюсь философией, но идеи Куна, похоже, пришлись точно в цель; они помогли сфокусировать мои собственные рассеянные мысли о путях развития физики в прошлом и, что более важно, о моих надеждах на ее развитие в 1993 году. Кун считал, что нормальное развитие науки – сбор экспериментальных данных и их интерпретация с помощью теоретических моделей и решения уравнений – иногда прерывается крупными сдвигами парадигмы. Сдвиг парадигмы – это не что иное, как замена одной картины мира другой. Место прежней концептуальной схемы занимает новый целостный способ думать о возникающих задачах. Дарвиновский принцип естественного отбора был сдвигом парадигмы; переход от пространства и времени к пространству-времени и далее к гибкому, эластичному пространству-времени – тоже; и, конечно, замена классического детерминизма логикой квантовой механики.

Научные сдвиги парадигм отличаются от тех, что бывают в искусстве и политике, где смена мнения, по сути, и есть лишь смена мнения. В противоположность этому никогда не случится поворота от законов движения Ньютона к механике Аристотеля. Я очень сильно сомневаюсь, что мы можем перестать признавать преимущество общей теории относительности над ньютоновской теорией гравитации, при том что первая дает точные предсказания движений в Солнечной системе. Прогресс – последовательная смена парадигм – это реальное развитие науки.

Конечно, наука – это человеческое предприятие, и в ходе мучительной борьбы за новые парадигмы мнения и эмоции могут быть столь же изменчивыми, как и в любом другом занятии. Но каким-то образом, когда все радикальные мнения отфильтрованы научным методом, остаются небольшие зерна истины. Они могут совершенствоваться, но, как правило, отката назад уже не бывает.

Я чувствовал, что Битва при черной дыре была классической борьбой за новую парадигму. Тот факт, что дополнительность черных дыр победила в опросе, не был доказательством какой-то реальной победы. Ведь те люди, на которых я больше всего хотел повлиять, – Джо Полчински, Гэри Хоровиц, Энди Строминджер и, самое главное, Стивен – проголосовали на стороне оппозиции.

В течение следующих недель мы с Ларусом Торласиусом совместно придумали и сформулировали ответ на вопрос Джона Прескилла. Это заняло у нас некоторое время, но я уверен, что, если бы мой разговор с Прескиллом и Пейджем продлился еще полчаса, мы решили бы эту проблему еще тогда. Я считаю, что Джон фактически сам дал половину ответа. Просто учтите, что биту информации требуется некоторое время на то, чтобы быть излученным из черной дыры. Джон предположил, что к тому времени, когда внешний наблюдатель восстановит этот бит и прыгнет в черную дыру, исходный бит уже давно будет в сингулярности. Единственный вопрос, который оставался: сколько времени понадобится, чтобы восстановить бит по испаряющемуся хокинговскому излучению.

Забавно, что ответ уже был дан в выдающейся статье, которая вышла за месяц до конференции в Санта-Барбаре. Из статьи вытекало, хотя это и не говорилось явно, что для восстановления одного бита информации нужно подождать, пока будет излучена половина хокинговских фотонов. При известном очень низком темпе испускания фотонов черными дырами на это понадобилось бы в случае Черной дыры звездной массы около  $10^{68}$  лет – время, неизмеримо большее возраста Вселенной. Но достаточно лишь доли секунды. Для того, чтобы исходный бит был уничтожен в сингулярности. Очевидно, что нет никакой возможности извлечь бит из хокинговского излучения, затем прыгнуть с ним в черную дыру

---

106 Русский перевод: Кун Т. Структура научных революций. – М.: АСХ 2009. – Примеч. перев.

и там сравнить его с первым битом. Дополнительность черных дыр была спасена. Кто был автором блестящей статьи? Дон Пейдж.

## 16

### Постойте! Верните старую прошивку

Однажды в 1960-х годах я пошел на спектакль небольшого авангардного театра в Гринвич-Виллидж. Важным элементом представления – грубоватым юмором, как оказалось, – было то, что публику между актами вовлекали в работу по замене декораций вместо технического персонала.

Одной женщине предложили передвинуть кресло в глубь сцены, но только она к нему притронулась, оно превратилось в груды щепок. Кто-то схватил за ручку чемодан, но тот не сдвинулся с места. Мне поручили поднять и подать кому-то на невысоком балконе двухметровый валун. Ради сохранения общего настроения я обхватил его руками и сделал вид, что поднимаю на пределе своих сил. Мгновение настоящего когнитивного диссонанса наступило, когда камень легко взлетел в воздух, как будто он почти ничего не весил. Это была пустая оболочка из окрашенной балзы.

Заложенная в наших головах связь между размером объекта и его весом должна быть одним из жестко прошитых инстинктов – частью нашего автоматического чувства физики. Соответственно, неправильная его работа должна бы означать серьезное повреждение мозга – если только человек не является квантовым физиком.

Одна из величайших работ по перепрошивке наших понятий, последовавшая за эйнштейновскими открытиями 1905 года, требовала отказа от инстинкта «большое – тяжелое, маленькое – легкое» и замены его прямо противоположным: «большое – легкое, маленькое – тяжелое». Как и во многих других случаях, Эйнштейн первым заподозрил эту зазеркальную инверсию логики. Что он тогда курил? Скорее всего, только свою трубку. Как всегда, далеко идущие выводы Эйнштейна вытекали из простейшего воображаемого эксперимента, который он поставил у себя в голове.

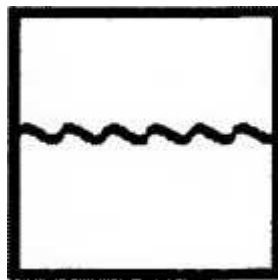
### Невероятное сжатие коробки с фотонами

Данный мысленный эксперимент начинается с регулируемой коробки – пустой, за исключением нескольких фотонов, – которую можно по желанию делать больше или меньше. Ее внутренние стенки сделаны из идеально отражающих зеркал, так что фотоны, пойманные в коробку, носятся вперед-назад между зеркальными поверхностями и не могут выйти наружу.

Волна, заключенная в замкнутой области пространства, не может иметь длину больше размеров этой области. Попробуйте изобразить десятиметровую волну внутри метровой коробки.



Получается бессмыслица. Однако сантиметровая волна легко поместится в коробку.

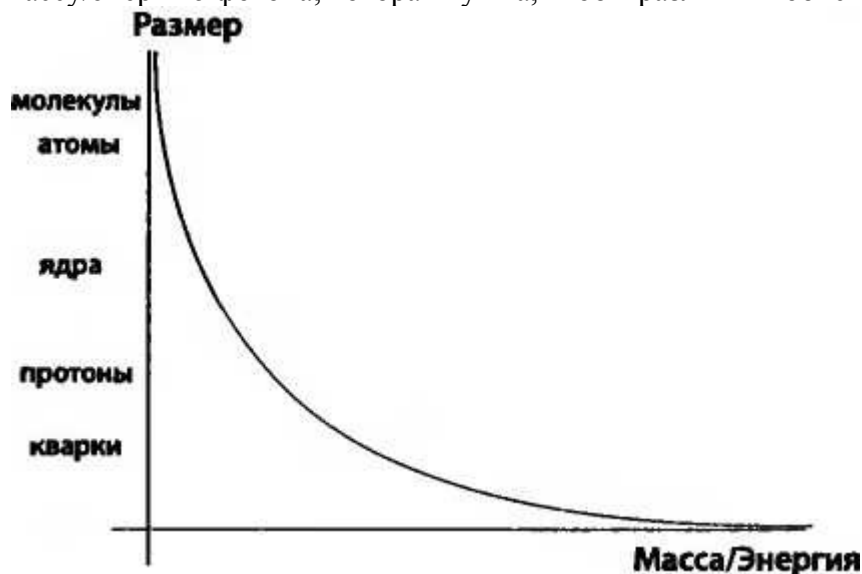


Эйнштейн представил, что коробка делается все меньше и меньше, а фотоны при этом остаются внутри нее. При сжатии коробки фотоны не могут сохраняться неизменными. Единственная возможность состоит в том, что длина волны каждого фотона должна сокращаться вместе с коробкой. В конце концов окажется, что микроскопическая коробка заполнена очень высокоэнергичными фотонами – высокая энергия соответствует их очень малой длине волны. Дальнейшее сжатие коробки еще более повысит их энергию.

Но вспомним самую знаменитую формулу Эйнштейна  $E = mc^2$ . Если энергия внутри коробки растет, значит, увеличивается и ее масса. Так что чем *меньше* она становится, тем *больше возрастет* ее масса. Опять все происходит вопреки наивной интуиции. Физикам приходится переучиваться: малое – тяжелое, большое – легкое.

Связь между размером и массой проявляется и иным образом. Природа, похоже, построена иерархически, и на каждом следующем уровне она состоит из объектов все меньшего размера. Так, молекулы состоят из атомов; атомы – из электронов, протонов и нейтронов; протоны и нейтроны – из кварков. Эти уровни строения материи открыты учеными, которые сталкивали атомы-мишени с частицами и смотрели, что получится. Принципиально это не так уж сильно отличается от обычных наблюдений, когда свет (фотоны) отражается от объектов и затем фокусируется на фотопленке или на сетчатке глаза. Но, как мы видели, чтобы исследовать очень малые размеры, нам нужны очень энергичные фотоны (или другие частицы). Очевидно, что в момент, когда атом подвергается воздействию очень энергичного фотона, большая масса (по крайней мере, по меркам физики элементарных частиц) должна быть сконцентрирована в небольшом объеме.

Нарисуем график, показывающий соотношение между размером и массой/энергией. По вертикальной оси отложим величину того масштаба, которые пытаемся исследовать. По горизонтальной – массу/энергию фотона, которая нужна, чтобы различить объект.



Принцип ясен: чем меньше объект, тем большая масса/энергия нужна, чтобы его увидеть. На протяжении большей части XX века каждому студенту-физику приходилось прошивать у себя в голове эту обратную зависимость между размером и массой/энергией.

Эйнштейновская коробка с фотонами не была аномалией. Представление о том, что меньшее означает более массивное, пронизывает всю современную физику элементарных

частиц. Но, по иронии судьбы, XXI век обещает отменить эту прошивку.

Чтобы понять почему, представьте, что мы хотим определить, что происходит (если происходит) в масштабе, в миллион раз меньшем планковской длины. Возможно, иерархическая структура природы продолжается и на такой глубине. Стандартной стратегией XX века было бы нащупать какой-нибудь объект фотоном с энергией в миллион раз больше планковской. Но эта стратегия дала бы обратный эффект.

Что я хочу этим сказать? Хотя мы, вероятно, никогда не сможем разогнать частицы до планковской энергии, нам известно, что бы случилось, окажись одна из них в миллион раз энергичнее. Когда столь большая масса сосредоточена в таком маленьком объеме, там образуется черная дыра. Мы будем разочарованы, поскольку внутри горизонта этой черной дыры скроется все, что мы собирались разглядеть. По мере того как мы заглядываем во все меньшие и меньшие масштабы, наращивая энергию фотонов, горизонт будет становиться все шире и шире, скрывая все больше и больше, – еще одна уловка-22.

Так что же получится в результате столкновения? Хокинговское излучение, и больше ничего. Но по мере увеличения размеров черной дыры длина волны хокинговских фотонов будет расти. Вместо четкого изображения крошечного субпланковского объекта будет получаться все более размытое изображение, сформированное длинноволновыми фотонами. Поэтому максимум, на что можно рассчитывать при увеличении энергии столкновений, – это переоткрытие свойств природы в больших Масштабах. Таким образом, истинный вид графика «размеры – энергия» примерно такой.



Нижний предел размеров достигается на планковском масштабе, ничего меньше обнаружить невозможно, а дальше новая прошивка совпадает с доиндустриальной: большое = тяжелое. Таким образом, победный марш редукционизма – идеи о том, что все вещи сделаны из меньших вещей, – должен закончиться на планковском масштабе.

Термины *ультрафиолетовый (УФ)* и *инфракрасный (ИК)* стали использоваться в физике расширительно, по отношению к своему исходному значению коротко- и длинноволнового света. Ввиду характерной для XX века связи между размерами и энергией физики часто используют эти слова для обозначения высоких (УФ) и низких (ИК) энергий. Однако новая прошивка все перемешала: за пределами планковской массы высокая энергия означает большие размеры, а низкая – меньшие. Эта путаница нашла отражение в терминологии: новый тренд, состоящий в том, чтобы приравнивать большие размеры и большие энергии, стали бестолково называть *инфракрасно-ультрафиолетовым соединением*<sup>107</sup>.

Отчасти это было от недостатка понимания инфракрасно-ультрафиолетового

<sup>107</sup> Этот ужасный термин – мое упущение. Выражение инфракрасно-ультрафиолетовое соединение я впервые употребил в 1998 году в статье, написанной совместно с Эдвардом Виттенем. (В русскоязычную литературу данный термин, по-видимому, не проник. – Примеч. перев.)

соединения, которое дезориентировало физиков относительно природы падения информации на горизонт. В главе 15 мы воображали применение микроскопа Гейзенберга для наблюдения за атомом, падающим в направлении черной дыры. По мере приближения атома к горизонту для того, чтобы его различить, требуются фотоны все большей энергии. В конце концов эта энергия станет настолько большой, что столкновение фотона с атомом приведет к образованию большой черной дыры. Тогда изображение можно будет сформировать, собрав длинноволновое хокинговское излучение. В итоге, вместо того чтобы стать более четким, изображение атома будет все сильнее размываться вплоть до того, что атом будет казаться размазанным по всему горизонту. Извне это будет выглядеть, как будто – используем уже знакомую аналогию – капля чернил растворяется в ванне с горячей водой.

Идея дополнительности черных дыр, даже если она и выглядит возмутительной, по-видимому, внутренне непротиворечива. К 1994 году я захотел пошатнуть уверенность Хокинга и сказать ему: «Смотри, Стивен, похоже, вся твоя работа лишается основания!» Я вскоре попытался это сделать, но безуспешно. В продлившейся месяц осаде хватало юмора и пафоса. Отвлечемся ненадолго от физики, и я расскажу о моем тогдашнем разочаровании.

## 17

### Ахав в Кембридже



Крошечная белая точка разрослась настолько, что заслонила мне весь мир. Но в отличие от наваждения Ахава мое не было стотонным китом; это был стофунтовый физик-теоретик в кресле с моторчиком. Мои мысли редко удалялись от Стивена Хокинга с его ошибочными идеями о разрушении информации внутри черных дыр. Для моего разума больше не существовало сомнений относительно истины, но я был поглощен необходимостью заставить Стивена это увидеть. У меня не было желания загарпунить или даже унижить его; я хотел только, чтобы он увидел факты так, как видел их я. Хотелось, чтобы он узрел глубокие следствия, вытекающие из его собственного парадокса.

Больше всего меня беспокоило то, что многие эксперты – в сущности, все или почти все релятивисты – принимали выводы Стивена. Мне было непонятно! как он и все остальные могут быть настолько самодовольными. Утверждение Стивена о наличии парадокса и о том, что он может предвещать революцию, были верны. Но почему тогда он и все остальные просто проходят мимо?

Хуже того, я чувствовал, что Хокинг и релятивисты беспечно отбрасывали одну из опор науки, ничего не предлагая взамен. Стивен сделал попытку со своей доллар-матрицей, но потерпел неудачу – ее последовательное применение вело к катастрофическому нарушению закона сохранения энергии, – а все остальные его последователи удовлетворенно

говорили: «Ну да, информация пропадает при испарении черных дыр» и оставляли все как есть. Меня раздражало то, что казалось интеллектуальной ленью и отречением от научного любопытства.

Единственным облегчением в моей одержимости были занятия бегом, иногда я пробегал километров двадцать пять или больше по холмам за Пало-Альто. Часто очистить сознание позволяла мне концентрация на том, кто бежал в нескольких метрах впереди, пока я его не обгонял. Тогда передо мной вновь появлялся Стивен.

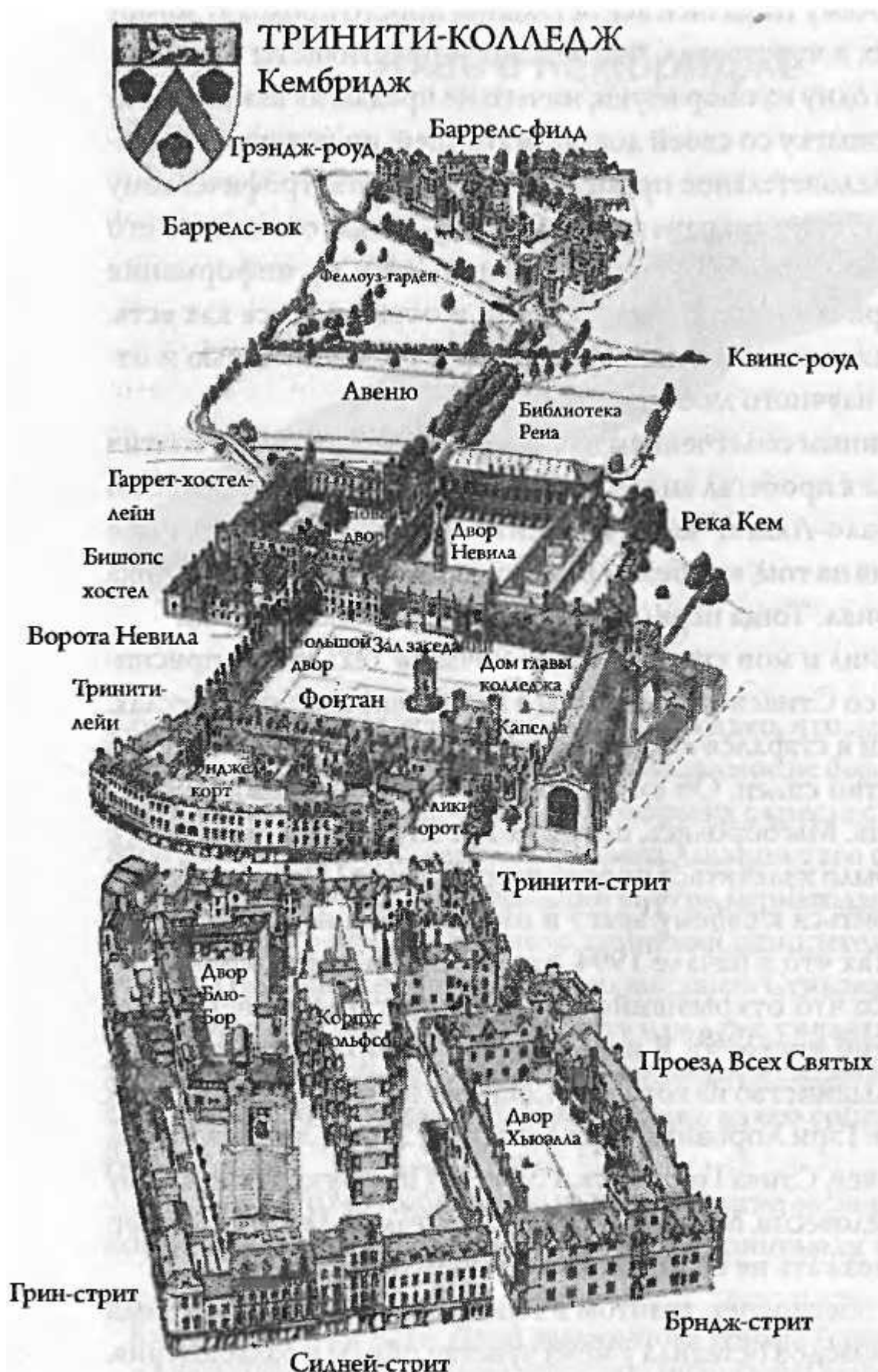
Он заполнил и мои сны. Однажды ночью в Техасе мне приснилось, что мы со Стивеном оба сидим в механизированных креслах. Всеми силами я старался выбить его из седла. Но Стивен Могучий был невероятно силен. Он схватил меня за горло и держал, не позволяя дышать. Мы боролись, пока я не проснулся в холодном поту.

Как мне было излечиться от этой одержимости? Подобно Ахаву, я мог отправиться к своему врагу и охотиться на него там, где он скрывался. Так что в начале 1994 года я принял приглашение посетить только что открывшийся в Кембриджском университете Ньютоновский институт. В июне Стивен собирал у себя группу физиков, большинство из которых я знал, но не числил среди своих сторонников: Гэри Хоровица, Гэри Гиббонса, Энди Строминджера, Джеффа Харвея, Стива Гиддингса, Роджера Пенроуза, Шинтана Яу и других тяжеловесов. Моим союзником был только Герард <sup>108</sup>Т Хоофт, который приезжать не собирался.

Я не был обеспокоен визитом в Кембридж. Двадцать три года назад пара эпизодов оставила у меня чувство обиды и раздражения. Я тогда был молодым, никому не известным и еще не ощущал себя в безопасности, будучи ученым рабочего происхождения. Приглашение к *профессорскому столу* на обеде в кембриджском Тринити-колледже не слишком помогло заглушить эти переживания.

---

108 Капитан-китобой Ахав, герой знаменитого романа Германа Меллвила «Моби Дик», одержим идеей отомстить гигантскому белому киту Моби Дику, который в прошлом плавании откусил Ахаву ногу. – Примеч. перев.



Я до сих пор не очень понимаю смысл приглашения к профессорскому столу. Не знаю, была ли это честь, и если да, то кого или что чествовали. Или это просто было место для ланча? Как бы то ни было, принимавший меня профессор Джон Полкингорн провел меня в средневековый зал, увешанный портретами Исаака Ньютона и других гигантов. Студенты



сидели на самом нижнем уровне. Преподавательский состав прошествовал к профессорскому столу, стоящему на приподнятой сцене в конце зала. Еду подавали официанты, одетые гораздо лучше, чем я, а с обеих сторон от меня сидели ученые джентльмены, которые что-то бормотали на языке, который я с трудом разбирал. Слева сидел престарелый член совета колледжа, который вскоре захрапел над своим супом. Справа заслуженный преподаватель рассказывал историю об американском госте, который когда-то здесь побывал. Кажется, этот американец оказался по кембриджским меркам недостаточно утонченным, сделав до смешного неуместный выбор вина.

Как ценитель вина, я более или менее уверен, что даже с закрытыми глазами смогу отличить красное от белого. Еще более надежно я отличу вино от пива. Но вот дальше вкус меня подведет. Меня не очень радовало оказаться в роли персонажа рассказанной истории. Остальной разговор касался сугубо кембриджских вопросов и прошел мимо меня. Так что оставалось лишь наслаждаться безвкусной пищей (вареной рыбой, покрытой белым клейстером), будучи совершенно отрезанным от дискуссии.

В другой раз Полкингхорн взял меня на прогулку вокруг Тринити-колледжа. Обширный, прекрасно ухоженный газон занимал почетное место перед главным входом в одно из зданий. Но никто не шел по траве. Дорожка вокруг лужайки была единственным дозволенным маршрутом. Поэтому я удивился, когда профессор Полкингхорн взял меня за руку и повел напрямик – по диагонали. Что бы это значило? Вторглись ли мы на священную землю? Ответ оказался прост: профессора, которых в британских университетах значительно меньше, чем в американских, издавна пользуются привилегией ходить по траве. Никому больше или, по крайней мере, никому ниже рангом это не позволено.

На следующий день я шел из колледжа в отель без сопровождения. В 31 год я был молод для профессора, но я был им. Естественно, я предположил, что это дает мне право пройти по лужайке. Но когда я достиг середины пути, из соседнего здания появился невысокий коренастый джентльмен, одетый во что-то вроде смокинга и котелка, и потребовал немедленно сойти с газона. Я возразил, сказав, что я американский профессор. Однако это не возымело действия.

Спустя двадцать три года, отпустив бороду, постарев и, возможно, приобретя немного более грозный вид, я попробовал повторить этот подвиг. На этот раз никаких проблем не возникло. Кембридж изменился? Я не знаю. Я изменился? Да. Вещи, которые пару десятилетий назад тревожили мой классовый снобизм, – профессорский стол, особые газонные привилегии, – теперь казались не более чем приятной гостеприимностью и, возможно, отчасти проявлением британской эксцентричности. Кое-что при возвращении в Кембридж меня удивило. Помимо того что моя неприязнь к местным университетским особенностям сменилась чем-то вроде удовольствия, печально знаменитая британская еда значительно улучшилась. Я обнаружил, что мне определенно нравится Кембридж.

В первый день я проснулся очень рано и решил побродить по городку, постепенно выйдя к цели – Ньютоновскому институту. Оставив жену Энн в апартаментах на Честертон-роуд, я пошел на реку Кем, потом мимо эллингов с лодками для соревнований по гребле и далее через парк Джезус-Грин. (В свой первый визит я был озадачен и даже раздражен, что столь многое в кембриджской культуре имеет религиозные корни.)

Я шел про Бридж-стрит и пересек реку Кем. Кем? Бридж? Кембридж?<sup>109</sup> Находился ли я на месте первоначального моста, по которому назван великий университет? Вероятно, нет, но было забавно об этом поразмышлять.

На парковой скамейке сидел пожилой, но элегантный джентльмен «ученого» вида с длинными, закрученными вверх усами. Бог мой! Этот человек так походил на Резерфорда, первооткрывателя атомного ядра. Я подсел к нему и начал разговор. Ясно, что это не был Резерфорд, если только он не восстал из могилы, где покоился уже почти шестьдесят лет. Но, может быть, это сын Резерфорда?

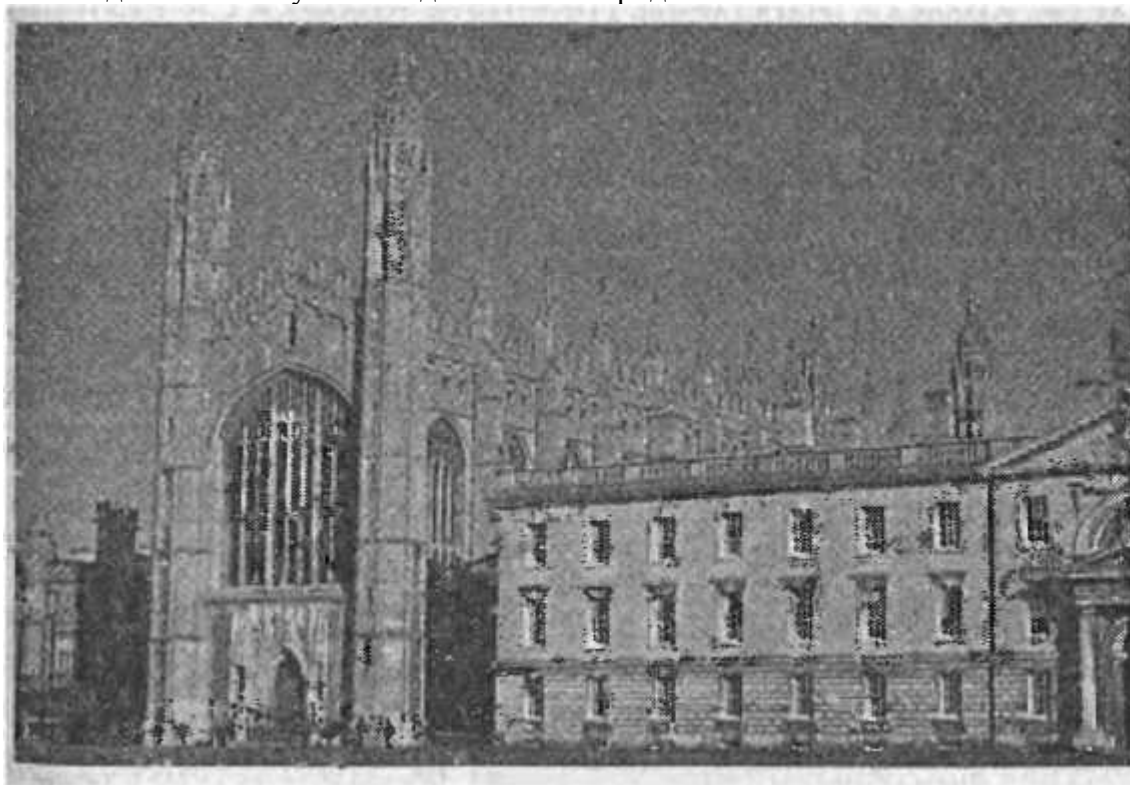
---

<sup>109</sup> Название Кембридж происходит от названия реки Кем и английского слова bridge – мост. – Примеч. перев.

Как оказалось, мой сосед по скамейке знал имя Эрнеста Резерфорда и то, что этот новозеландец открыл ядерную энергию. Но, несмотря на сильное внешнее сходство, он не был Резерфордом. Скорее он мог бы быть моим родственником – он оказался отставным еврейским почтальоном с любительским интересом к науке. Его фамилия была Гудфренд и, вероятно, еще в прошлом поколении звучала как Гутефройнд<sup>110</sup>.

Ранняя прогулка вывела меня на Силвер-стрит, где в старинном здании когда-то размещался факультет прикладной математики и теоретической физики. В этом здании меня принимал Джон Полкинхорн. Но даже в Кембридже все меняется. Математические науки («maths» – в британской научной терминологии) теперь переехали на новое место рядом с Ньютоновским институтом.

Затем я увидел вдали возвышающиеся башни. Они нависали. Они парили. Они возносились. Капелла Королевского колледжа – кембриджская обитель Бога. Она возвышается над многими научными зданиями Кембриджа.



Сколько поколений студентов, осваивающих науку, молились или хотя бы делали вид, что молятся в этом соборе? Из любопытства я вошел в священное место. В этой обстановке даже я, ученый без единой капли религиозности, ощутил некоторую сомнительность моей веры в то, что не существует ничего, кроме электронов, протонов и нейтронов, что эволюция жизни – не более чем соревнование, как в компьютерной игре, между эгоистичными генами. «Кафедральность» вызывает трепет за счет искусного сочетания каменных колонн и цветных витражей: я к этому почти невосприимчив, но все же не совсем.

Все это напоминает о странной смеси религиозной и научной традиций, которая долго озадачивала меня в британской академической среде. Основанные в двенадцатом столетии духовными лицами, Кембридж и Оксфорд равно тесно связаны с сообществами, которые мы в Соединенных Штатах условно называем религиозным и реалистичным<sup>111</sup>. Еще более

---

110 Оба варианта означают «хороший друг» – по-английски и по-немецки. – Примеч. перев.

111 В оригинале: «the faith-based and the reality-based communities». Оба термина являются американскими неологизмами. Понятие «faith-based communities» характеризует организации и движения, основанные на религиозной вере или иной идеологии. Термин «reality-based community» еще более молодой – впервые он употреблен в прессе в 2004 году американским журналистом Роном Саскиндом и означает людей, которые считают, что «решения возникают из трезвого изучения очевидной реальности». – Примеч. перев.

странно, что при этом проявляется загадочная для меня уникальная интеллектуальная толерантность. Взять, к примеру, названия девяти самых знаменитых Кембриджских колледжей: Колледж Иисуса, Колледж Христа, Корпус-Кристи-Колледж, Колледж Магдалены, Петерхауз, Колледж Св. Екатерины, Колледж Св. Эдмунда, Колледж Св. Иоанна и Тринити-колледж (Колледж Св. Троицы). Но в то же время есть Колледж Вальфсона, названный в честь Исаака Вальфсона, светского еврея. Еще более сильный пример – Колледж Дарвина, названный в честь того самого Дарвина, который мастерски изгнал Бога из сферы наук о живом.

История [этого сосуществования] долгая и красочная. Исаак Ньютон сделал для избавления от верований в сверхъестественное больше, чем кто-либо другой до него. Инерция (масса), ускорение и закон всемирного тяготения пришли на смену божественной деснице, которой больше не требовалось направлять движение планет. Однако историки, изучающие науку семнадцатого столетия, никогда не устают напоминать, что Ньютон был христианином и, более того, истово верующим. Он потратил больше времени, энергии и чернил на христианскую теологию, чем на физику.

Для Ньютона и его коллег существование разумного Создателя было интеллектуальной необходимостью: как еще объяснить существование человека? Ничто в мировоззрении Ньютона не могло объяснить создание из безжизненной материи столь сложных объектов, как наделенные чувствами человеческие существа. У Ньютона было более чем достаточно причин верить в божественное творение.

Но там, где не преуспел Ньютон, двумя столетиями позднее окончательный подрыв устоев совершил (сам того не желая) Чарлз Дарвин (тоже кембриджский человек). Дарвиновская идея естественного отбора в сочетании с двойной спиралью Уотсона и Крика (открыта в Кембридже) заменила магическое творение законами вероятности и химии.

Был ли Дарвин врагом религии? Вовсе нет. Хотя он утратил веру в христианские догматы и считал себя агностиком, он активно поддерживал свою местную приходскую церковь, а также своего близкого друга викария – его преподобие Джона Иннеса.

Конечно, не всегда все шло вполне полюбовно. В истории дебатов (об эволюции) Томаса Гекели с епископом Сэмюэлем Уилберфорсом («Мыльным Сэмом») были весьма грубые повороты. Епископ спрашивал: кто именно был обезьяной – бабушка или дедушка Гекели? Гекели возвращал комплимент, говоря, что Уилберфорс протитует истину. И все же никого не убили, не ранили, даже не ударили. Все делалось в рамках цивилизованных традиций британского академического взаимодействия.

А как теперь? Даже сегодня сохраняется благородное сосуществование науки и религии. Джон Полкинхорн, который вел меня через лужайку, уже не является профессором физики. В 1979 году он подал в отставку с профессорской должности, чтобы учиться на англиканского священника. Полкинхорн – один из главных поборников популярной идеи о том, что наука и религия входят в период замечательной конвергенции и что божественный план выражен в изумительном дизайне *законов природы*. Эти законы не только совершенно невероятны, но также в точности таковы, чтобы гарантировать существование разумной жизни – жизни, которая, к слову сказать, может по достоинству оценить Бога и его законы<sup>112</sup>. Сегодня Полкинхорн – один из самых знаменитых церковных деятелей в Великобритании. Однако я не знаю, позволяют ли ему по-прежнему ходить по газонам.

Между тем прославленный оксфордский эволюционист Ричард Докинз возглавляет атаку на воображаемую конвергенцию науки и религии. Согласно Докинзу, жизнь, любовь и мораль играют важную роль в смертельной конкуренции не между людьми, но между эгоистичными генами. Британское интеллектуальное сообщество, похоже, достаточно обширно, чтобы вмещать и Докинза, и Полкинхорна.

Но вернемся к капелле Королевского колледжа. Трудно мыслить в чисто оптических категориях об утреннем свете, когда он фильтруется через цветное стекло. Так что с легким

---

<sup>112</sup> Свои взгляды по этому вопросу я изложил в книге «Космический ландшафт: теория струн и иллюзия разумного замысла», 2005.

чувством «кафедральности» я присел на скамью, оглядывая впечатляющий интерьер.



Мое сознание обратилось к черным дырам: не к техническим вопросам, а к тонкости законов природы, приводящих к парадоксам, обсуждать которые я приехал в Кембридж.

Вскоре ко мне присоединился серьезного вида человек – высокий, крупный, но не толстый, вид которого показался мне отчетливо не британским. Его рубашка из грубого белого хлопка была вроде тех, что я носил в юности в качестве рабочей одежды. Коричневые вельветовые штаны держались на паре широких подтяжек, придавая ему сходство с обитателями американского Запада девятнадцатого века. В итоге я оказался недалеко от истины. Его акцент принадлежал западной Монтане, а не Восточной Англии.

Когда мы выяснили наше общее американское происхождение, разговор повернул к религии. Нет, объясняли, сюда я пришел не для молитвы. На самом деле я не христианин, а потомок Авраама, восхищенный архитектурой. Он оказался строительным подрядчиком и зашел в капеллу Королевского колледжа посмотреть каменную кладку. Причем, будучи человеком глубоких религиозных убеждений, он сомневался, уместно ли молиться в этой церкви. Сам он принадлежал к Церкви Христа святых последних дней. Англиканская церковь вызывала у него подозрение. Что до меня, то я не видел причин смущать его моим глубоким скептицизмом – полным отвержением религиозности, которую я понимаю как глубокую веру в сверхъестественные силы.

Я почти ничего не знал о мормонах. Единственным моим соприкосновением с этой религией было то, что однажды я жил по соседству с очень приятным мормонским семейством. Мне лишь было известно, что у мормонов очень строгие правила, запрещающие пить кофе, чай и кока-колу. Я предполагал, что мормонская вера была типичным ответвлением северноевропейского протестантизма. Так что я был удивлен, когда мой знакомый сказал, что у мормонов много общего с евреями. Не имея земли, которую могли бы назвать своим домом, они следовали за своим Моисеем через пустыню, смело встречая все мыслимые опасности и лишения, пока наконец не нашли свою страну с молочными

реками и кисельными берегами в районе Большого Соленого озера в Юте.

Мой знакомый сидел склонившись, положив руки на расставленные колени и свесив свои большие ладони между ними. То, что он рассказывал, было не туманной древностью, а историей из американской жизни, начавшейся где-то в 1820-х годах. Я полагал, что должен был ее знать, но это оказалось не так. Вот приблизительный пересказ того, что я услышал, дополненный историческими данными, которые я разыскал позже.

Джозеф Смит родился в 1805 году у матери, страдавшей эпилепсией и яркими религиозными видениями. Однажды ангел Мороний явился ему и прошептал секрет спрятанных древних пластин из чистого золота, на которых начертаны слова Бога. Эти слова предназначались только для Смита, но была одна уловка: письмена были на языке, который никто из живущих не мог расшифровать.

Но Мороний велел Джозефу не беспокоиться. Он снабдит Джозефа парой магических прозрачных камней – сверхъестественными очками. Камни назывались Урим и Туммим. Мороний наказал Джозефу закрепить Урим и Туммим на шляпе, и тогда с ее помощью он мог видеть содержание надписей на чистом английском языке.

Слушая эту историю, я сидел тихо, словно бы глубоко задумавшись. Я полагал, что человек может быть либо верующим, либо нет, и если нет, то история с золотыми пластинами, рассматриваемыми через магические очки, закрепленные на шляпе, должна казаться ему очень забавной. Но, смешная она или нет, несколько тысяч верующих последовали за Джозефом Смитом, а потом, когда он погиб насильственной смертью в возрасте тридцати восьми лет, они прошли вслед за его преемником Бригамом Янгом через душераздирающие опасности и мучения. Сегодня религиозные последователи этих уверовавших исчисляются десятками миллионов.

Вы можете спросить, что случилось с золотыми пластинами, которые Джозеф расшифровал с помощью Урима и Туммима? Ответ: после перевода на английский он их потерял.

Джозеф Смит был крайне харизматичным человеком, весьма любвеобильным и привлекательным для противоположного пола. Это должно было входить в божественный план. Бог приказал Джозефу жениться на как можно большем числе молодых девушек и оплодотворить их. Он также велел собрать множество последователей и вести к первой версии земли обетованной – месту под названием Наву в Иллинойсе. Когда Джозеф прибыл туда со своими последователями, то вскоре объявил, что будет бороться за пост американского президента. Однако славные люди в Наву были добрыми христианами, обычными христианами, и им не нравились идеи Смита о полигамии. Так что они его застрелили.

Подобно тому как мантия Моисея досталась Иисусу Навину, власть Смита перешла к Бригаму Янгу, другому человеку с множеством жен и детей. Исход мормонов начался с очень быстрого покидания Наву. А в итоге, после долгого и опасного путешествия по пустыне, Янг привел их в Юту.

Я был восхищен и продолжаю восхищаться этой историей. Уверен, что в то время она повлияла – несомненно, совершенно безосновательно – на мои чувства в отношении Стивена и его мощного харизматического влияния на многих физиков. Поглощенный своей собственной фрустрацией, я представлял его Крысоловом, увлекающим в ложный крестовый поход против квантовой механики.

Но в то утро меня не занимали ни Стивен, ни черные дыры. Капелла Королевского колледжа преподнесла новый захвативший меня научный парадокс. Он не имел никакого отношения к физике, разве что самое косвенное. Это был парадокс, связанный с дарвиновской эволюцией. Как это возможно, чтобы у человеческих существ развился столь мощный стимул к созданию иррациональных систем верований и крепкая приверженность им? Может показаться, что дарвиновский отбор должен усиливать склонность к рациональности и отбраковывать любые генетические предрасположенности к суевериям и системам, основанным на вере. В конце концов, иррациональные верования могут довести и

до смерти, как это случилось с Джозефом Смитом. Несомненно, что они погубили миллиарды людей. Казалось бы, эволюция должна избавлять от склонности на религиозной почве следовать за безрассудными лидерами. Но похоже, что все обстоит прямо противоположным образом. Этот Научный парадокс впервые возбудил мое любопытство в Кембридже. С тех пор он так увлек меня, что я потратил массу времени на то, чтобы в нем разобраться.

За несколько недель, проведенных в Кембридже, я, казалось, очень сильно уклонился от темы, которая меня туда привела, – квантового поведения черных дыр. Но это не совсем так. Где-то на задворках сознания меня продолжал донимать вопрос о том, могут ли такие ученые, как Хокинг, 'т Хоофт, я сам и все остальные участники Битвы при черной дыре, быть жертвами собственных, основанных на вере, иллюзий.

Те недели в Кембридже были тревожными и полными мелодраматических размышлений. История Ахава и кита весьма неоднозначна: бешеный ли кит увлек на дно моря Ахава или свихнувшийся Ахав утянул за собой в ад слабого Старбака?<sup>113</sup> Если ближе к делу, то я ли, подобно Ахаву, следую за дурацким наваждением или Стивен соблазняет остальных ложной идеей?

Сегодня я должен признаться, что представлять себе Стивена Крысолова, или Стивена Пустынника (в честь французского крестоносца Петра Пустынника<sup>114</sup>), ведущего своих очарованных поклонников к интеллектуальному разрушению, было очень весело. Очевидно, одержимость – очень сильный галлюциноген.

Я бы не хотел, чтобы у вас создалось впечатление, что я бесцельно потратил несколько недель, слоняясь по улицам Кембриджа и пребывая в плену собственных темных мыслей. Мне предстояло сделать в Ньютоновском институте несколько докладов по дополнительности черных дыр. Я потратил много времени в институте, готовясь к этим выступлениям и доказывая различные тезисы своим скептически настроенным коллегам.

### **Ньютоновский институт**

Было уже около 10 утра, когда я покинул капеллу Королевского колледжа и вышел на улицу, залитую июньским солнцем. Дарвиновская загадка иррациональной веры проникла в мое сознание, но в данный момент более насущная техническая проблема требовала немедленного решения: мне предстояло найти Ньютоновский институт.

Моя неплохо зарекомендовавшая себя карта указывала место вне центра старого Кембриджа в жилом районе современного вида. Это шло вразрез с моей романтической сентиментальностью, и я надеялся, что тут какая-то ошибка. Увидев знак «Уилберфорс-роуд», я подумал: не тот ли это Уилберфорс, которого прозвали Мыльным Сэмом и который интересовался у Гекели, кто из его бабушек и дедушек был обезьяной? Возможно, романтика истории еще не полностью утрачена.

Правда, однако, оказалась еще лучше. Уилберфорс-роуд названа в честь родного отца Сэмюэля, преподобного Уильяма Уилберфорса. Уильям сыграл удивительную роль в британской истории, будучи одним из лидеров аболиционистского движения за искоренение рабства в Британской империи.

Наконец, я свернул с Уилберфорс-роуд на Кларскон-роуд. Первое впечатление от увиденного Ньютоновского института вновь было разочаровывающим. Это современное строение – не уродливое, но построенное на нынешний манер из стекла, кирпича и стали.

---

<sup>113</sup> Старбак – старпом на шхуне «Пекод», на которой Ахав охотился за Моби Диком. – Примеч. перев.

<sup>114</sup> Петр Пустынник – один из главных вдохновителей Первого крестового похода 1096 – 1099 годов. – Примеч. перев.



Растерянность, однако, сменилась изумлением, как только я вошел в здание. Архитектура оказалась идеальной для его назначения: обмена идеями – старыми, новыми и непроверенными – и их активного обсуждения, зарубания ошибочных теорий и, как я надеялся, встреч с идейными противниками и нанесения им поражений. Здесь было большое, очень хорошо освещенное пространство с множеством комфортных кресел и письменных столов и с досками на большинстве стен. Несколько групп расположилось вокруг кофейных столиков, заваленных листками, на которых физики вечно что-то прикидывают.

Я собирался присоединиться к Гэри Хоровицу, Джеффу Харвею и еще паре друзей за столиком, но прежде, чем я успел это сделать, кое-что иное привлекло мое внимание. Я услышал разговор другого рода и не смог устоять перед искушением подслушать его. В углу зала король собрал поклонников: Стивен сидел в центре, слегка приподнятый на своем механическом троне, и услаждал британских журналистов. Интервью, очевидно, касалось не физики, а самого Стивена. Когда я подошел, он рассказывал о своей личной истории и изнурительном заболевании. Рассказ должен был быть записан заранее, но, как всегда, некий невыразимый аромат, характерный для его личности, перекрывал монотонность роботизированного голоса.

Журналисты были заморожены – каждый следил за малейшими движениями лица Стивена, пока тот рассказывал о своих ранних годах, до того, как ему диагностировали болезнь Лу Герига. Согласно его показаниям, в те ранние годы у него преобладало чувство скуки – скуки молодого человека, который, похоже, сам не знает, чем бы заняться. В двадцать четыре года он был обычным выпускником-физиком, не добившимся каких-то особых результатов, – слегка ленивым и без особых амбиций. А потом, как бой часов в полночь, последовал страшный диагноз, неотвратимый смертный приговор. Все мы, живые, приговорены к смерти, но в случае Стивена сроки, казалось, были сочтены – год, быть может, два. Недостаточно даже для подготовки диссертации.

Поначалу Стивен испугался и впал в депрессию. По некоторым сведениям, он начал пить больше, чем следует. Его мучили кошмары, в которых его казнили. Но затем случилось

нечто непредвиденное. Каким-то образом мысль о неизбежной смерти была вытеснена перспективами нескольких лет отсрочки. Результатом стало появление неожиданно мощной жажды жизни. Скуку сменило неистовое желание оставить свой след в физике, жениться, иметь детей и узнать мир – и все это за то время, которое ему осталось. Стивен сказал репортерам нечто столь удивительное и незабываемое, что я бы отверг это как бред собачий, исходи оно от кого-нибудь другого. Он сказал, что именно заболевание – парализующее заболевание – было лучшим, что могло с ним случиться.

Я не склонен героизировать людей. Я преклоняюсь перед некоторыми учеными и литераторами за ясность и глубину их идей, но не называю их героическими личностями. До того дня единственным гигантом в моем пантеоне героев был великий Нельсон Мандела. Но, подслушивая в Ньютоновском институте, я неожиданно увидел, что Стивен – поистине героическая фигура: человек, достойный сидеть за одним столом с Моби Диком (если киты сидят за столами).

Но я также видел – или думал, что видел, – насколько легко для человека, подобного Стивену, стать Крысоловом. Вспомните о потрясающей, как в соборе, тишине, которая наполняет большие лекционные залы, пока Стивен сочиняет ответ на вопрос.

Такое отношение Стивен вызывал далеко не только в научных кругах. Однажды я ужинал со Стивеном, его женой Элейн и одним из его чрезвычайно успешных прошлых учеников Рафаэлем Буссо. Дело было в центральном Техасе, в обычном придорожном ресторане, каких множество по всей Америке. Мы уже приступили к трапезе, – я беседовал с Элейн и Рафаэлем, Стивен в основном слушал, – когда его узнал официант, оказавшийся его большим поклонником. Он приблизился с трепетом, почтением, страхом и смущением, словно набожный католик, неожиданно встретивший за ужином папу римского. Он едва не бросился в ноги Стивену, Умоляя о благословении, и говорил о глубокой духовной близости, которую он всегда ощущал с великим физиком.

Стивену, конечно, нравится быть суперзнаменитым; для него это одна из немногих возможностей поддерживать связь с миром.

Но нравится ли ему это почти религиозное преклонение, поощряет ли он его? Нелегко сказать, что он думает, но я провел с ним достаточно времени, чтобы в какой-то мере научиться читать выражение его лица. Слабый сигнал, появившийся в техасском ресторане, указывал скорее на раздражение, а не на удовольствие.

Вернемся теперь к первоначальной цели моей поездки в Англию: попытке убедить Стивена в том, что его вера в потерю информации ошибочна. К сожалению, прямая дискуссия со Стивеном для меня почти невозможна. Мне не хватает спокойствия, чтобы несколько минут ждать ответа всего из нескольких слов. Но были другие люди, такие как Дон Пейдж, Гэри Хоровиц и Энди Строминджер, которые тратили на взаимодействие и сотрудничество со Стивеном массу времени. Они научились общаться с ним гораздо эффективнее меня.

В основе моей стратегии было два козыря. Во-первых, то, что физики любят поговорить, а я очень хорошо умею поддерживать разговор. Настолько хорошо на самом деле, что физики, даже когда они не согласны со мной, собираются толпой на начатые мной дискуссии. Когда бы я ни появился на любом физическом-факультете, даже в самом тихом месте вдруг возникают мини-семинары. Поэтому я знал, что будет нетрудно собрать нескольких наших со Стивеном взаимных друзей (они были друзьями, несмотря на то что я видел в них противников по Битве при черной дыре) и затеять спор. Я также был уверен, что Стивен будет втянут в дискуссию: для него держаться в стороне от физической полемики не легче – чем коту проигнорировать кошачью мятку, так что вскоре мы сойдемся с ним в энергичной схватке, пока один из нас не признает поражение.

Также моя стратегия опиралась на силу моих аргументов и слабость тех, что были у другой стороны. У меня не было сомнений в конечной победе.

Все это блестяще сработало, за исключением одной детали: Стивен так и не присоединился. Это оказался период, когда он чувствовал себя особенно плохо, и мы его



почти не видели. В результате бои были точно такими же, как и те, что я уже несколько лет вел в Соединенных Штатах. Кит ускользнул, не дав мне выстрелить в него.

За день или два до моего отъезда из Кембриджа я должен был провести для всего института семинар, посвященный дополнительности черных дыр. Это был последний шанс для столкновения со Стивеном. Лекционный зал был заполнен. Стивен прибыл, чуть запоздав к началу, и сидел сзади. Обычно он сидит впереди рядом с доской, но в этот раз он был не один, а с медсестрой и еще одним ассистентом на случай, если ему понадобится медицинская помощь. Видимо, проблемы действительно возникли, поскольку в середине семинара он покинул помещение. Так-то вот. Ахав упустил свой шанс.

Семинар закончился около пяти часов, и к тому времени я уже был сыт по горло Ньютоновским институтом. Мне хотелось выбраться из Кембриджа. Энн отправилась к приятельнице и оставила мне арендованный автомобиль. Вместо того чтобы вернуться в наши апартаменты, я поехал в соседнюю деревушку Милтон и засел в пабе. Я не большой выпивоха, и пить в одиночку определенно не в моих привычках, но в этот раз я действительно хотел просто посидеть и попить пива. Я хотел не одиночества, а просто чтобы не было физиков.

Это был типичный деревенский паб, с барменшей средних лет и несколькими местными посетителями за стойкой. Один из клиентов лет восьмидесяти, одетый в коричневый костюм с галстуком-бабочкой, опирался на трость. Не думаю, что он был ирландцем, но он сильно напоминал актера Барри Фитцджеральда, который играл с Бингом Кросби в фильме «Иди своим путем». (Герой Фитцджеральда там – раздражительный, но добросердечный ирландский священник.) Посетитель о чем-то добродушно спорил с барменшей, которая называла его Лу.

Будучи совершенно уверен, что он не физик, я подошел к стойке рядом с ним и заказал себе пива. Не помню точно, как начался наш разговор, но он рассказал, что у него была короткая военная карьера, прервавшаяся после потери ноги на войне, как я понял, на Второй мировой. Но отсутствие ноги, похоже, не мешало ему стоять возле стойки.

Разговор неминуемо повернул к вопросу, кто я такой и что делаю в Милтоне. Я был не в настроении рассказывать о физике, но не хотел обманывать старого джентльмена и ответил, что был в Кембридже на конференции по черным дырам. Он сразу сказал, что является большим экспертом по этому вопросу и может рассказать мне много такого, чего я не знаю. Разговор стал приобретать странный поворот. Он заявил, что, согласно семейной легенде, один из его предков побывал в черной дыре, но в последний момент сумел выбраться.

О какой черной дыре он говорил? Чудаки, помешанные на черных дырах, идут по дюжине за пятак и, как правило, очень скучны, но этот человек не был похож на обычного психа. Сделав глоток пива, он стал рассказывать о том, что Черная дыра Калькутты – это ужасное, проклятое, совершенно отвратительное место.

Черная дыра Калькутты! Очевидно, он подумал, что я был в Кембридже на какой-то конференции по англо-индийской истории. Я слышал о Черной дыре Калькутты, но понятия не имел, что это такое. По моим очень туманным представлениям, это был бордель, где грабили и убивали беспечных британских солдат.

Я решил не прояснять ситуацию, а вместо этого побольше узнать о настоящей Черной дыре. История сомнительная, но, похоже, это был подвал или даже подземелье в британском форте, захваченном вражескими силами в 1756 году. Большое число британских солдат оказалось заперто в подвале на ночь, и, возможно по недоразумению, они задохнулись. По семейной легенде, которая передавалась семь поколений, одному из предков Лу едва удалось ускользнуть и не оказаться в числе мертвецов.

Так я обнаружил случай выхода информации из черной дыры. Если бы только Стивен был тогда рядом, чтобы это услышать.

*Опрокиньте доминирующую парадигму.  
Надпись замеченная на бампере*

Покидая Кембридж, я уже понимал, что проблема связана не со Стивеном или релятивистами. Часы, проведенные в дискуссиях, особенно с Гэри Хоровицем (Н из CGHS), ярко выраженным релятивистом, убедили меня в обратном. Будучи настоящим волшебником в области уравнений общей теории относительности, Гэри еще и глубокий мыслитель, который любит во всем дойти до самой сути. Потратив немало часов на обдумывание парадокса Стивена, он ясно понимал опасность потери информации, но все же заключил, что Стивен прав, – он не видел, как избежать вывода о том, что информация должна пропадать при испарении черной дыры. Когда я объяснил Гэри дополнительную черных дыр (не в первый раз), он очень хорошо понял суть дела, но счел этот шаг слишком радикальным. Ему казалось неестественным утверждение о том, что квантово-механическая неопределенность может сказываться на таких больших масштабах, как огромная черная дыра. Это определенно *не было* связано с интеллектуальной ленью. Все сводилось к одному вопросу: каким принципам вы доверяете?

В самолете по пути из Кембриджа я понял, что настоящей проблемой было отсутствие у дополнительной черных дыр надежного математического фундамента. Даже Эйнштейн долго не мог Убедить большинство других физиков в том, что его теория света корректна. Прошло около двадцати лет, был поставлен решающий эксперимент и созданы абстрактные математические теории Гейзенберга и Дирака, прежде чем вопрос был закрыт. Очевидно, предположил я, поставить эксперимент для проверки дополнительной черных дыр никогда не удастся. (Тут я ошибался.) Но, вероятно, более строгую теоретическую базу создать можно.

По дороге из Англии я еще не знал, что менее чем через пять лет математическая физика взлелеет одну из самых тревожных философских идей всех времен: в некотором смысле, основательный трехмерный мир нашего опыта – не более чем иллюзия. И я не представлял, как этот радикальный прорыв изменит ход Битвы при черной дыре.

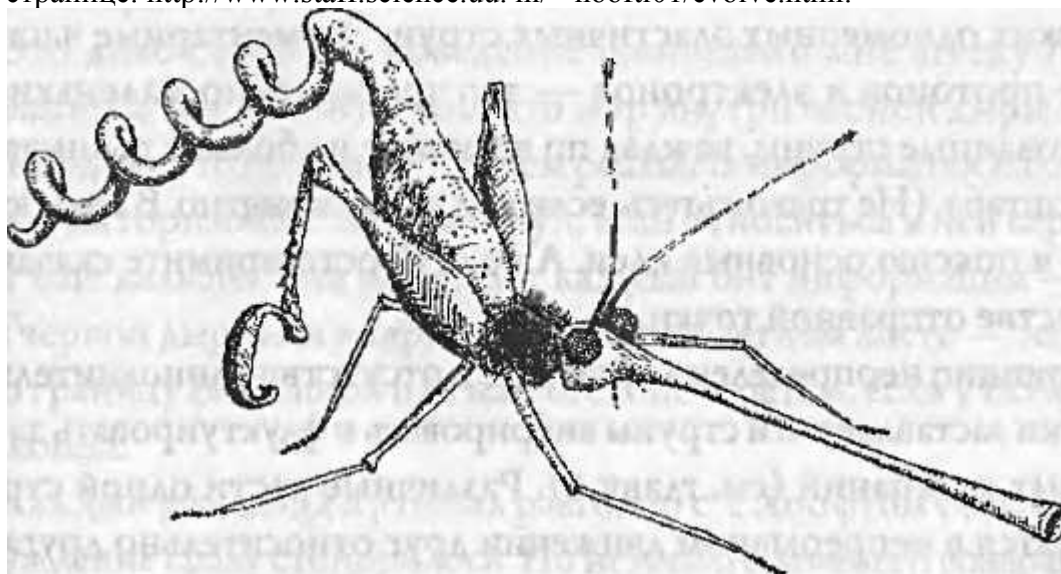
### Голландия

До свидания, старая добрая Англия. Привет, ветряные мельницы и высоченные голландцы. Я пересек Северное море, чтобы навестить своего друга Герарда 'т Хоофта. После короткого перелета в Амстердам мы с Энн поехали в Утрехт, еще один город с каналами и узкими домиками, где Герард был профессором физики (или Профессором физики, как подчеркивают некоторые). В 1994 году он еще не получил Нобелевскую премию, но никто не сомневался, что она не за горами.

Среди физиков имя 'т Хоофта – синоним научного величия, а в Голландии, стране, где число великих физиков в расчете на душу населения больше, чем где бы то ни было, он является национальным достоянием. Так что, прибыв в Утрехтский университет, я был удивлен скромным кабинетом, который занимал Герард. В то лето Европа походила на влажную теплицу, и Голландия, несмотря на свою репутацию прохладного сырого места, была непереносима. Тесный кабинет 'т Хоофта был таким же, как и у других, – даже без кондиционера. Как я помню, он находился на солнечной стороне здания, и я удивлялся, каким чудом в этой смертельной жаре выживают его большие зеленые экзотические растения. Как гостя, меня усадили за углом в тенистом офисе, но и здесь было слишком жарко, чтобы работать или даже просто обсуждать нашу общую страсть – черные дыры.

В выходные мы с Энн и Герардом отправились на его машине в поездку по небольшим городкам в окрестностях Утрехта, где воздух был чуть прохладнее. Как и многим великим ученым, 'т Хоофту присуще громадное любопытство в отношении окружающего мира – по части не только физики, но и всей природы. Его интерес к вопросу о том, как животные

могут измениться в мире, полном городских загрязнений, привел к появлению целого бестиария футуристичных созданий. Вот одно из его творений. Другие можно найти на его домашней странице: <http://www.staff.science.uu.nl/~hoof101/evolve.html>.



Het Wijndiefje (винный вор) *Bacchus dellriosus*. Этого паразита можно встретить вблизи пабов. Он полностью приспособлен для открывания бутылок и банок всех типов. Будет очень неприятно, если он проникнет в ваш винный погреб.

’т Хоофт еще и живописец-любитель, и музыкант. Энн тоже пишет картины и играет на фортепьяно, так что в машине и за ланчем в местной деревушке – голландские оладьи, холодная минералка и огромное количество мороженого – мы разговаривали обо всем: от формы морских раковин и будущей эволюции жизни на загрязненной планете до голландских живописцев и фортепьянной техники. Но только не о черных дырах.

В течение рабочей недели мы мало говорили о физике. Герард – противник, который любит поспорить, и наши диалоги часто протекали примерно так: «Герард, – начинал я, – я совершенно согласен с тобой». – «Да, – отвечал он, – но я с тобой совершенно не согласен».

Был один конкретный вопрос, который я хотел обсудить. Эта вещь, о которой я размышлял почти двадцать пять лет, относилась к теории струн. Но Герард не любил теорию струн, и убедить его в ней копаться было непростым делом. Вопрос, который я хотел обсудить, касался местоположения отдельных битов информации. В 1969 году я впервые обнаружил в теории струн нечто потрясающее и в то же время столь сумасбродное, что струнные теоретики не хотят даже думать об этом.

Теория струн утверждает, что все в мире состоит из микроскопических одномерных эластичных струн. Элементарные частицы вроде протонов и электронов – это чрезвычайно маленькие закольцованные струны, каждая по величине не больше планковского масштаба. (Не тревожьтесь, если вам не все понятно. В следующей части я поясню основные идеи. А пока просто примите сказанное в качестве отправной точки.)

Принцип неопределенности даже в отсутствие дополнительной энергии заставляет эти струны вибрировать и флуктуировать за счет нулевых колебаний (см. главу 4). Различные части одной струны находятся в непрерывном движении друг относительно друга, отчего их крошечные части растягиваются и раздвигаются на некоторое расстояние. Само по себе это раздвижение не представляет проблемы; электроны в атомах распределены по значительно большему объему, чем ядро, и причина этого тоже в нулевых колебаниях. Все физики принимают как данность то, что элементарные частицы – это не бесконечно малые точки в пространстве. Все мы ожидаем, что электроны, протоны и другие элементарные частицы по крайней мере не меньше планковского размера, а возможно, и крупнее. Проблема в том, что математика теории струн приводит к абсурдно сильной квантовой дрожи, при которой

флуктуации столь свирепы, что кусочки электрона разнесло бы на самые края Вселенной. Большинству физиков, включая струнных теоретиков, это кажется сумасшедшим до немыслимости.

Как это возможно, чтобы электрон был столь велик, как Вселенная, а мы этого не замечали? Вы можете спросить, что удерживает струны вашего тела от столкновений и запутывания со струнами моего тела, даже если мы разделены сотнями миль. Ответ не так прост. Во-первых, эти флуктуации невероятно быстры даже в сравнении с неизмеримо малым планковским временем. Но вдобавок они еще и так тонко настроены, что флуктуации одной струны в точности соответствуют флуктуациям другой и как раз так, что все нехорошие эффекты гасятся. Тем не менее если бы удалось пронаблюдать самые быстрые внутренние нулевые колебания элементарной частицы, то можно было бы обнаружить, что ее части колеблются от края до края Вселенной. Так, по крайней мере, говорит теория струн.

Это дико странное поведение напомнило мне шутку Ааруса Торласиуса (см. с. 238) о том, что мир внутри черной дыры может быть подобен голограмме, причем реальная информация находится далеко на горизонте. Теория струн, если относиться к ней серьезно, идет еще дальше. Она помещает каждый бит информации – будь он в черной дыре или в черной краске на газетном листе – на внешнюю границу Вселенной или на «бесконечность», если у Вселенной нет конца.

Каждый раз, когда я затевал разговор с 'т Хоофтом об этой идее, обсуждение сразу стопорилось. Но незадолго до моего возвращения из Утрехта домой Герард сообщил мне нечто поразительное. А именно, что если рассмотреть в планковском масштабе стены его офиса, то, в принципе, они бы содержали все биты информации о том, что находится внутри комнаты. Я не упоминал при нем слово «голограмма», но он, очевидно, думал о том же, о чем и я: каким-то непонятным образом каждый бит информации в мире записан очень далеко на самых отдаленных границах космоса. Фактически он меня опередил: он сослался на свою статью, вышедшую несколькими месяцами ранее, в которой рассуждал об этой идее.

На этом замечании наш диалог прервался, и в оставшиеся два Аня моего пребывания в Голландии мы больше не говорили о черных дырах. Но, вернувшись в тот вечер в отель, я подробно проработал Доказательство следующего утверждения: максимальное количество Информации, которое может содержаться в любой области пространства, не превышает того, что можно записать на границе области, сохраняя не более четверти бита в одной планковской площади.

Позвольте теперь мне дать пояснение относительно вездесущей, постоянно повторяющейся *одной четверти*. Почему *четверть бита на планковскую площадь, а не один бит на планковскую площадь*? Ответ тривиален. Исторически планковская-единица была плохо определена. На самом деле физикам следовало бы вернуться и переопределить планковскую единицу так, чтобы четыре планковские площади стали одной. И я возглавляю это движение; отныне закон будет звучать так:

*Максимальная энтропия в области пространства составляет один бит на планковскую площадь.*

Вернемся к Птолемею, с которым мы встретились в главе 7. Там мы предположили, что он так боялся заговора, что разрешил хранить в библиотеке лишь ту информацию, которая видна снаружи. Поэтому она была записана только на внешних стенах. При плотности записи один бит на планковскую площадь Птолемей мог бы хранить максимум  $10^{74}$  битов. Это колоссальное количество информации, много больше, чем может вмещать любая реальная библиотека, но тем не менее оно меньше  $10^{109}$  битов планковского размера, которые можно затолкать внутрь библиотеки. О чем догадывался 'т Хоофт и что я доказал, сидя в номере отеля, – это то, что воображаемый закон Птолемея соответствует истинному физическому ограничению на количество информации, которое может содержаться в области пространства.

Современной цифровой камере не нужна пленка. У нее есть двумерная «сетчатка», заполненная микроскопическими светочувствительными клетками-ячейками, которые называются *пикселями*. Все изображения, сделаны ли они современным цифровым фотографом или древним живописцем на холсте, – это иллюзии; они вводят нас в заблуждение, заставляя видеть то, чего нет, – порождают трехмерные образы, хотя сами содержат лишь двумерную информацию. На картине «Урок анатомии» Рембрандт обманывает нас, заставляя видеть тело, разрезы и глубину, хотя в действительности есть лишь тонкий слой краски на двумерном холсте.



Почему эта хитрость срабатывает? Все происходит в мозгу, где специальные цепи создают иллюзию, основываясь на прежнем опыте: вы видите то, что ваш мозг натренирован видеть. В действительности ли на холсте недостаточно информации для того, чтобы определить, действительно ноги мертвеца находятся ближе к вам или они просто слишком велики по отношению к остальному телу. Укорочено ли его тело перспективой или оно в самом деле очень короткое? Органы, кровь и кишки под его кожей – все это в вашей голове. Возможно, этот человек – вовсе не человек, а гипсовый манекен или даже двумерная картина. Хотите увидеть, что написано на свитке за головой самого высокого врача? Попробуйте обойти вокруг картины, чтобы найти более удобный ракурс. Увы, этой информации здесь просто нет. Изображение на пиксельном экране вашей камеры тоже не сохраняет реальную трехмерную информацию; оно тоже является иллюзией.

Можно ли построить электронную систему для сохранения истинно трехмерной информации? Конечно, можно. Вместо того чтобы заполнять поверхность двумерными пикселями, представьте себе заполнение пространства микроскопическими трехмерными Клеточками, или, как их иногда называют, *вокселями*<sup>115</sup>. Поскольку массив вокселей истинно трехмерен, нетрудно понять, что закодированная информация может точно воспроизводить определенный кусок трехмерного мира. Так и подмывает выдвинуть гипотезу: двумерная информация может сохраняться в двумерных массивах пикселей, а трехмерная информация – только в трехмерных массивах вокселей. Дадим этой гипотезе какое-нибудь условное название, например *инвариантность размерности*.

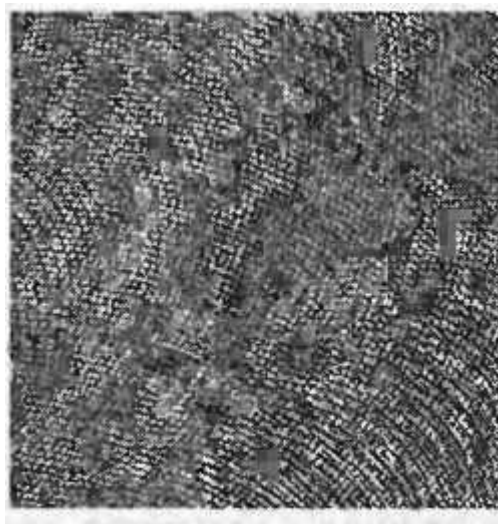
Кажущаяся правильность этой гипотезы как раз и делает голограммы такими удивительными. Голограмма – это двумерный лист пленки или двумерный массив пикселей, способный сохранить все детали трехмерной сцены. Это не иллюзия, созданная мозгом.

---

115 Английский неологизм *voxel* образован из слов *volumetric* (объемный) и *pixel* (пиксел). – Примеч. перев.

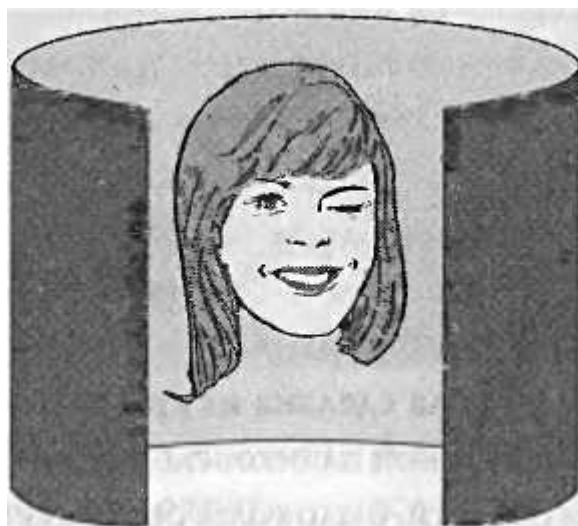
Информация действительно присутствует на пленке.

Принцип обычной голограммы первым открыл в 1947 году венгерский физик Деннис Габор. Голограммы – это необычные фотографии, состоящие из беспорядочно пересекающихся полосатых интерференционных узоров, подобных тому, что создает свет, когда проходит через две щели. В голограмме узор создается не щелями, а светом, рассеивающимся от разных частей снимаемых объектов. Фотографическая пленка заполнена информацией в виде микроскопических темных и светлых пятнышек. Внешне они не имеют ничего общего с реальным трехмерным объектом; под микроскопом вы увидите лишь беспорядочный оптический шум<sup>116</sup> примерно такого вида.



Трехмерные объекты разнимаются и складываются во внешне безнадежно перемешанное двумерное изображение. И только за счет такого перемешивания частей трехмерный мир можно точно представить на двумерной поверхности.

Это перемешивание можно обратить, но только если знать как. Информация находится на пленке, и она может быть воспроизведена. Свет, падающий на этот перемешанный узор, рассеиваясь, будет восстанавливать плывущее в воздухе реалистичное трехмерное изображение.



Голографическое изображение, при всей его призрачной реальности, можно рассматривать со всех сторон, и оно выглядит убедительно. Обладая подходящей технологией, Птолемей мог бы покрыть стены своей библиотеки пикселями, содержащими перемешанное голографическое изображение тысяч свитков. И тогда, при правильном

---

<sup>116</sup> Термин шум в этом контексте не связан со звуком. Он означает беспорядочную неструктурированную информацию вроде белого шума на экране испорченного телевизора.

освещении, эти свитки появлялись бы как трехмерные изображения внутри библиотеки.

Возможно, вы заметили, что я завел вас на довольно странную территорию, но все это часть того процесса интеллектуальной перепрошивки, который в очередной раз происходит с физикой. Вот заключение, к которому мы с 'т Хоофтом пришли: трехмерный мир нашего обыденного опыта – Вселенная, заполненная галактиками, звездами, планетами, домами, камнями и людьми, – это голограмма, образ реальности, закодированной на далекой двумерной поверхности. Этот новый закон физики, называемый *голографическим принципом*, утверждает, что всё находящееся внутри некоторой области пространства можно описать посредством битов информации, расположенных на ее границе.

Рассмотрим для определенности кабинет, в котором я работаю. Я в кресле, компьютер передо мной, беспорядочные горы статей, возвышающиеся на столе, которые я опасаясь выкинуть, – вся эта информация в деталях закодирована планковскими битами, слишком малыми, чтобы их увидеть, но плотно покрывающими стены комнаты. Или рассмотрим все, что находится в пределах миллиона световых лет от Солнца. У этой области есть граница – не физическая стена, а воображаемая математическая оболочка, – и она содержит все, что заключено внутри нее: межзвездный газ, звезды, планеты, людей и все остальное. Как и прежде, всё находящееся внутри такой гигантской оболочки – это образ, созданный микроскопическими битами, распределенными по оболочке. И к тому же битов потребуется не более чем по одному на каждую планковскую площадь. Все так, как если бы граница – стены офиса или математическая оболочка – была сделана из крошечных пикселей, занимающих по одной квадратной планковской длине каждый, и все, что происходит внутри области, было голографическим изображением, создаваемым этой пикселизированной границей. Но, как и в случае обычной голограммы, информация, закодированная на далекой границе, – это очень сильно перемешанное представление трехмерного оригинала.

Голографический принцип поразительно отличается от всего, что встречалось нам прежде. То, что информация распределена в *объеме* пространства, кажется столь интуитивным, что трудно поверить в ошибочность этого представления. Но мир не вокселизирован; он пикселизирован, и вся информация сохраняется на границе пространства. Но что такое граница и что такое пространство?

В главе 7 я поставил вопрос: где находится информация о том, что Грант похоронен в мавзолее Гранта? Отвергнув несколько ложных ответов, я пришел к выводу, что эта информация находится в мавзолее Гранта. Но действительно ли это так? Начнем с области пространства, ограниченной гробом Гранта. Согласно голографическому принципу, останки Гранта – это голографическая иллюзия, образ, восстановленный по информации, записанной на стенках его гроба. Кроме того, останки и сам гроб находятся в стенах огромного монумента, называемого мавзолеем Гранта.



Так что останки Гранта, его жены Джулии, их гробы и туристы, пришедшие на них посмотреть, – все это образы информации, записанной на стенах мавзолея.

Но почему надо на этом останавливаться? Представьте огромную сферу, заключающую в себе всю Солнечную систему. Грант, Джулия, гробы, туристы, мавзолей, Земля, Солнце и остальные восемь планет (Плутон все-таки планета!) – всё это закодировано информацией на огромной сфере. И так можно продолжать, пока мы не достигнем границ Вселенной или бесконечности.

Очевидно, что вопрос о том, где находится конкретный бит информации, не имеет однозначного ответа. Обычная квантовая механика вносит некоторую неопределенность в такие вопросы. Пока кто-то не посмотрит на частицу или, в нашем случае, на любой объект, имеет место квантовая неопределенность его положения. Но как только объект подвергся наблюдению, все придут к согласию о том, где он находится. Если объектом окажется атом тела Гранта, обычная квантовая механика делает его положение немного неопределенным, но она не поместит его за границами пространства или даже за стенками гроба. Однако если спрашивать о том, где находится бит информации, неправильно, то как надо ставить этот вопрос?

Пытаясь достичь все большей и большей точности, особенно при одновременном учете гравитации и квантовой механики, мы приходим к математическим представлениям, включающим узоры из пикселей, танцующих на далеком двумерном экране, и о секретном коде, преобразующем перемешанные узоры в целостные трехмерные образы. Но, конечно, не существует экрана, покрытого пикселями и окружающего все области пространства. Гроб Гранта – это часть мавзолея Гранта, который является частью Солнечной системы, содержащейся в галактической сфере, охватывающей Млечный Путь... и так, пока не будет охвачена вся Вселенная. На каждом уровне все, что мы охватили, может быть описано как голографический образ, но когда мы ищем саму голограмму, она всегда оказывается на следующем уровне<sup>117</sup>.

---

117 Голографический принцип приводит к странным вопросам вроде тех, что можно встретить в «Amazing Stories» (первый в мире научно-фантастический литературный журнал, издававшийся с 1926 по 2005 год. – *Примеч. перев.*) и других дешевых научно-фантастических журналах 1950-х годов. «Является ли наш мир трехмерной иллюзией, порожденной неким двумерным пиксельным миром, возможно, запрограммированным в



При всей своей странности – а он очень странный – голографический принцип уже стал частью общепринятой теоретической физики. Это больше не догадка из области квантовой гравитации; он стал повседневным рабочим инструментом, отвечающим на вопросы не только о квантовой гравитации, но и о таких прозаических вещах, как атомные ядра (см. главу 23).

Хотя голографический принцип радикально перестраивает законы физики, его доказательство не требует изощренной математики. Все начинается со сферической области пространства, которая выделена воображаемой математической границей. Эта область содержит всевозможные «вещи»: водород в виде газа, фотоны, сыр, вино – все что угодно, лишь бы оно не переливалось за границу. Я буду называть все это вещами.



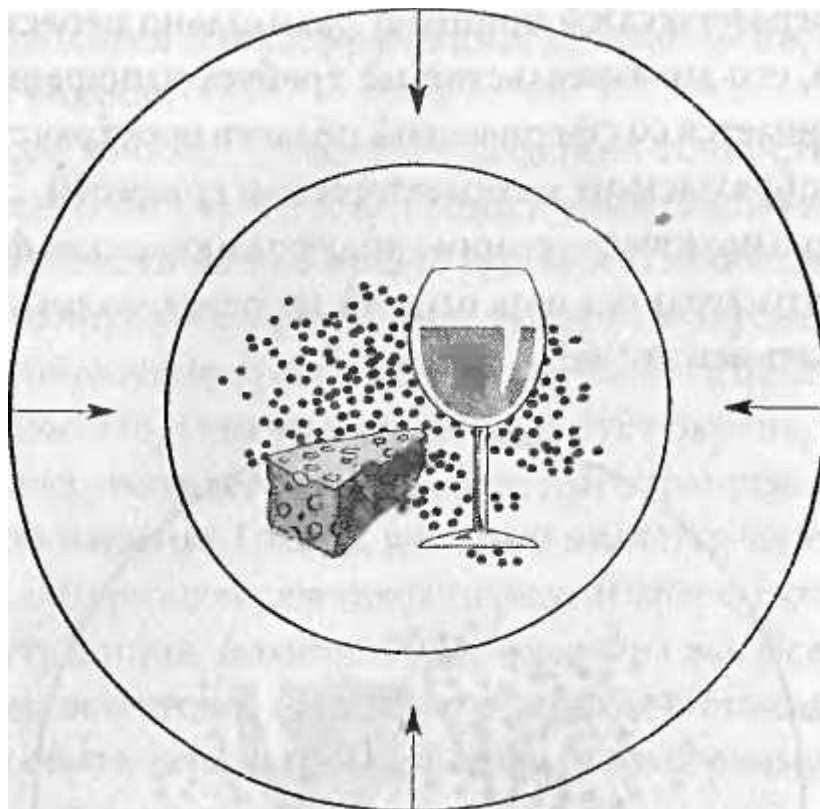
Самая массивная вещь, которую можно запихнуть в нашу область, – это черная дыра, горизонт которой совпадает с границей. Вещи не должны быть массивнее ее, в противном случае они не поместятся внутри границы, но существует ли какой-то предел, ограничивающий число битов информации в этих вещах? Нас интересует определение максимального числа битов, которое можно запихнуть внутрь сферы.

Теперь представьте себе материальную сферическую оболочку – Уже не воображаемую границу, а сделанную из настоящего вещества, – окружающую всю рассматриваемую систему. Эта оболочка, будучи сделанной из реальной материи, имеет собственную массу. Из чего бы она ни состояла, ее можно сжимать внешним давлением Или гравитационным притяжением находящегося внутри вещества, Пока она идеально не совпадет с границей области.

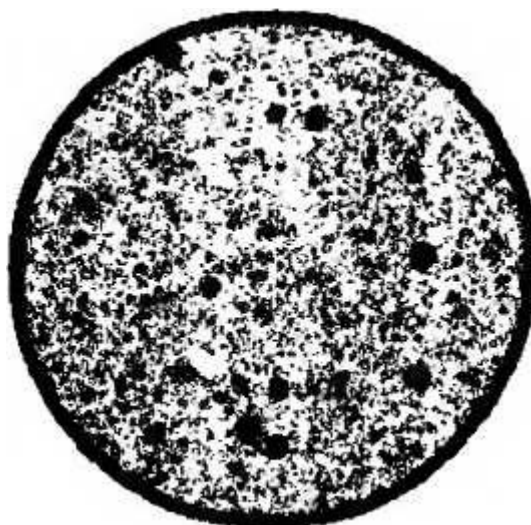
---

каком-то космическом квантовом компьютере?» Или еще более захватывающе: «Смогут ли будущие любители моделировать реальность на экране из квантовых пикселей стать создателями своих собственных Вселенных?» Ответ на оба эти вопроса – да, но...

Безусловно, мир может целиком находиться в некоем футуристическом квантовом компьютере, но я не знаю, что может добавить к этой идее голографический принцип, за исключением того, что число элементов в цепях такого компьютера может быть несколько меньше, чем кажется необходимым. Вместо  $10^{180}$  элементов, необходимых для заполнения Вселенной, будущие создатели миров могут обнаружить, что благодаря голографическому принципу им хватит всего  $10^{120}$  пикселей. (Для сравнения: в цифровых камерах пикселей несколько миллионов.)



*Подбирая массу оболочки, можно создать горизонт, который совпадет с границей области*



Исходные вещи, которые были у нас с самого начала, содержат некоторое количество энтропии – скрытой информации, – значение которой мы уточнять не будем. Однако нет сомнений в *том*, что *окончательная* энтропия – это энтропия черной дыры, то есть ее площадь, выраженная в планковских единицах.

Для завершения доказательства остается лишь напомнить, что второе начало термодинамики требует, чтобы энтропия всегда возрастала. Поэтому энтропия черной дыры должна быть больше, чем у любых исходных вещей. Сводя всё воедино, получаем доказательство удивительного факта: максимальное число битов информации, которое может при каких угодно условиях поместиться в области пространства, равно числу планковских пикселей, которые можно уместить на площади ее границы. Неявно это означает, что существует «граничное описание» всего, что происходит внутри области пространства; поверхность границы – это двумерная голограмма трехмерной внутренней области. Для меня это самый лучший тип доказательства: пара фундаментальных принципов, мысленный эксперимент и далеко идущие выводы.

Существует другой способ описания голографического принципа. Если граничная сфера очень велика, любая небольшая ее часть будет очень похожа на плоскость. В прошлом люди заблуждались, считая Землю плоской, из-за большого ее размера. Пусть наша сфера во много раз больше, скажем, миллиард световых лет в диаметре. При взгляде из точки, находящейся внутри такой сферы, но всего в нескольких световых годах от границы, сферическая поверхность будет казаться плоской. Это означает, что обо всем происходящем в пределах нескольких световых лет от границы можно думать как о голограмме плоского листа пикселей.



Конечно, не надо думать, будто я имею в виду обычную голограмму. Нечего и говорить о том, что зернистость обычного листа фотографической пленки намного больше, чем у листа из пикселей планковского размера. Более того, этот новый тип голограммы может с течением времени меняться; это голографическое кино.

Но самое большое отличие состоит в том, что эта голограмма квантово-механическая. Она мерцает и колеблется из-за неопределенности квантовых систем так, чтобы трехмерные образы испытывали квантовую дрожь. Мы все состоим из битов, включенных в сложные квантовые движения, но если приглядеться к этим битам поближе, то обнаруживается, что они находятся на самых дальних рубежах космоса. Я не знаю в мире ничего менее интуитивного, чем это. Добиться общего понимания голографического принципа – это, вероятно, самый большой вызов физикам со времен создания квантовой механики.

Каким-то образом статья 'т Хоофта, опередившая мою на несколько месяцев, прошла в основном незамеченной. Отчасти это связано с ее названием: «Размерная редукция в квантовой гравитации». Выражение «размерная редукция» оказалось узкоспециальным термином, которое физики применяют в совершенно ином смысле, нежели вкладывал в него 'т Хоофт. Я постарался, чтобы мою статью не постигла та же судьба, и назвал ее «Мир как голограмма».

По дороге из Голландии домой я начал все это записывать. Меня очень взбудоражил голографический принцип, но я также знал, что будет очень трудно убедить в нем кого-либо еще. Мир как голограмма? Я почти явственно слышал скептическую реакцию: «Он был хорошим физиком, но совершенно спятил».

Дополнительность черных дыр и голографический принцип могут относиться к той

категории идей вроде представления о существовании атомов, которые обосновываются физиками и философами на протяжении сотен лет. Создать и изучить черную дыру в лаборатории – дело для нас столь же трудное, как для древних греков – увидеть атомы. Но на деле понадобилось менее пяти лет, чтобы сформировался консенсус. Как случился этот сдвиг парадигмы? Оружием, которое привело к окончанию битвы, стала в основном строгая математика теории струн.

## **Часть IV**

### **Кольцо смыкается**

**19**

### **Оружие массового убеждения**

*В действительности я не готов, пожалуй, называть теорию струн «теорией», скорее, «моделью», или даже так: это просто догадка. В конце концов, теория должна сопровождаться указаниями о том, как действовать для выявления вещей, которые она описывает, в нашем случае – элементарных частиц, и, хотя бы в принципе, она должна позволять сформулировать правила для вычисления свойств этих частиц и получения относительно них новых предсказаний. Представьте, что я даю вам кресло, поясняя, что ножек у него пока нет, а сиденье, спинка и подлокотники, возможно, скоро будут доставлены; что бы я вам ни вручил, могу ли я называть это креслом?*

*– Герард 'т Хоофт*

Самого по себе голографического принципа было недостаточно для победы в Битве при черной дыре. Он был недостаточно строгим и не имел надежного математического основания. Реакцией на него был скептицизм: мир как голограмма? Похоже на научную фантастику. Выдуманный физик Стив в далеком будущем переходит в «иной мир», а император с графом в это же время наблюдают за его уничтожением. Напоминает спиритизм.

Почему маргинальная идея, годами лежащая без использования, неожиданно склоняет чашу весов в свою пользу? В физике подобное нередко случается безо всякого предупреждения. Важное и яркое событие неожиданно привлекает внимание критической массы физиков, и за короткое время странное, фантастическое, немыслимое становится обычным.

Иногда толчком становится экспериментальный результат. Эйнштейновская корпускулярная теория света медленно завоевывала признание, поскольку большинство физиков надеялось, что какой-то новый поворот событий спасет в итоге волновую теорию. Однако в 1923 году Артур Комптон изучил рассеяние рентгеновских лучей на атомах углерода и показал, что набор углов и энергий в точности соответствует столкновению частиц. Между исходным утверждением Эйнштейна и экспериментом Комптона прошло восемнадцать лет, но потом всего за несколько месяцев сопротивление корпускулярной теории света рассеялось.

Математический результат, особенно если он неожиданный, тоже может послужить таким катализатором. Базовые элементы Стандартной модели (физики элементарных частиц) датируются серединой 1960-х годов, но имелись доводы (некоторые из них были выдвинуты создателями теории) о том, что ее математические основания внутренне противоречивы. Затем в 1971 году молодой, никому не известный аспирант выполнил чрезвычайно сложные и тонкие вычисления и объявил, что эксперты ошибались. За очень короткое время Стандартная модель стала действительно стандартной, а неизвестный студент – Герард 'т

Хоофт – стал в мире физики самой яркой звездой.

Другой пример того, как математика может качнуть весы в пользу сумасбродной идеи, – это расчет Стивеном Хокингом температуры черной дыры. Первой реакцией на утверждение Бекенштейна о том, что черные дыры имеют энтропию, был скептицизм, доходящий до насмешек, в том числе со стороны Хокинга. В ретроспективе аргументы Бекенштейна выглядят блестящими, но в то время они были слишком туманны и приблизительны для признания, да еще и вели к абсурдному заключению: черные дыры испаряются. Именно технически сложные вычисления Хокинга сдвинули парадигму черных дыр от холодных мертвых звезд к объектам, высвечивающим свое собственное внутреннее тепло.

Описанные мной переломные события имеют ряд общих особенностей. Во-первых, они были неожиданными. Совершенно непредвиденный результат, будь он экспериментальным или математическим, – это мощный концентратор внимания. Во-вторых, в случае математического результата, чем он более технический, точный, неинтуитивный и трудный, тем сильнее он толкает людей к признанию значения нового способа мышления. Отчасти причина в том, что в сложных вычислениях много мест, где может таиться ошибка. Трудно игнорировать случаи, когда этих опасностей удастся избежать. Это можно отнести и к вычислениям Хофта, и к вычислениям Хокинга.

В-третьих, парадигмы меняются, когда новые идеи создают другим исследователям обширное поле для более привычной работы. Физики всегда находятся в поисках новых идей, над которыми стоило бы поработать, и набрасываются на все, что открывает возможности для проведения собственных исследований.

Дополнительность черных дыр и голографический принцип, безусловно, были неожиданными, даже шокирующими, но сами по себе они не обладали двумя другими свойствами, по крайней мере *еще* не обладали. В 1994 году казалось, что вопрос об экспериментальном подтверждении голографического принципа не стоит даже обсуждать, равно как и возможность его убедительного математического обоснования. Но на деле и то и другое было ближе, чем кто-либо мог себе представить. Всего за два года начала обретать форму точная математическая теория, а спустя еще десятилетие стала открываться возможность восхитительного экспериментального подтверждения<sup>118</sup>. И все это благодаря теории струн.

Прежде чем перейти к более подробному рассказу о теории струн, позвольте мне обрисовать общую картину. Никто не знает наверняка, правильно ли теория струн описывает наш мир, и, возможно, мы еще много лет этого не узнаем. Но для наших целей это не самый важный вопрос. У нас есть впечатляющие подтверждения того, что теория струн является математически непротиворечивой теорией *некоего* мира. Она основывается на принципах квантовой механики; она описывает систему элементарных частиц, подобных тем, что имеются в нашем мире; и в ней в отличие от других теорий (в первую очередь имеется в виду квантовая теория поля) все материальные объекты взаимодействуют посредством гравитационных сил. А самое главное, в теории струн есть черные дыры.

Но как с помощью теории струн доказывать какие-либо свойства нашего мира, если мы не уверены, что она верна? Для некоторых задач это не имеет значения. Мы используем теорию струн в качестве модели некоторого мира, а затем вычисляем или математически доказываем, теряется ли информация в черных дырах этого мира.

Допустим, мы обнаружили, что информация в нашей модели не теряется. Убедившись в этом, можно внимательнее присмотреться и понять, в чем же был неправ Хокинг. Можно попытаться понять, имеют ли место дополнительность черных дыр и голографический принцип в теории струн. Если да, то это не доказывает, что теория струн верна, но доказывает, что Хокинг ошибался, поскольку он объявил доказанным, что черные дыры *должны* уничтожать информацию в любом *непротиворечивом* мире.

Свое объяснение теории струн я намерен ограничить минимально необходимыми

---

118 См. главу 23.

основами. Подробнее о ней можно узнать в целом ряде изданий, включая мою книгу «Космический ландшафт», а также книги Брайана Грина «Элегантная Вселенная» и Айзы Рэнделл «Закрученные пассажи»<sup>119</sup>. Теория струн была почти случайным открытием. Первоначально она не имела никакого отношения к черным дырам и далекому планковскому миру квантовой гравитации. Она касалась куда более обыденных вопросов, связанных с адронами. Хотя слово «адрон» не используется в повседневном обиходе, сами адроны входят в число самых распространенных и хорошо изученных элементарных частиц. К ним относятся протоны и нейтроны – частицы, из которых состоят атомные ядра, – а также их близкие родственники, называемые мезонами, и так называемые глюболы. В свое время адроны были передним краем физики элементарных частиц, но сегодня они часто воспринимаются как старомодная тема в ядерной физике. Тем не менее в главе 23 мы познакомимся с рядом идей, которые возвращают адронам их былую славу в физике.

### **Элементарно, мой дорогой Ватсон**

Есть старый анекдот о двух еврейских дамах, которые встретились на углу в Бруклине. Одна говорит другой: «Ты должна уже знать, что мой сын стал доктором. А между прочим, кем стал твой сын, у которого вечно были трудности с математикой?» Другая ей отвечает: «О, мой мальчик стал гарвардским профессором по физике элементарных частиц». Первая с сочувствием отвечает: «Да, дорогая, ужасно жаль, что он так и не дослужился до физики высших частиц».

Что в точности имеется в виду под элементарными частицами и какими они еще могут быть? Простейший ответ: частица элементарна, если она столь мала и проста, что ее нельзя разделить на меньшие части. Их противоположность – не высшие, а составные частицы – те, что состоят из более простых частей меньшего размера.

Редукционизм – это научная философия, которая приравнивает понимание к разбиранию вещей на части. До сих пор это очень хорошо работало. Молекулы объясняются как состоящие из атомов; в свою очередь атомы – это совокупности отрицательно заряженных электронов, обращающихся вокруг центрального положительно заряженного ядра; ядра оказались сгустками нуклонов; наконец, каждый нуклон состоит из трех кварков. Сегодня все физики согласны, что молекулы, атомы, ядра и нуклоны – составные объекты.

Однако некоторое время назад каждый из них считался элементарным. В действительности термин «атом» происходит от греческого слова, означающего «неделимый», которое было в ходу около 2500 лет. Лишь недавно Эрнест Резерфорд открыл атомное ядро. Оно казалось настолько маленьким, что могло считаться просто точкой. Как видите, то, что одно поколение называет элементарным, потомки могут счесть составным.

Все это поднимает вопрос о том, как мы решаем – по крайней мере в данный момент, – является некая частица элементарной или составной? Вот один из возможных ответов: столкните два таких объекта с достаточной силой и посмотрите, что разлетится. Если что-то вылетит, оно должно было находиться внутри одной из первоначальных частиц. В действительности, когда сталкиваются два очень быстрых электрона, во все стороны разлетается куча всевозможного мусора. Особенно много будет фотонов, электронов и позитронов<sup>120</sup>. Если столкновение очень сильное; то появятся также протоны, нейтроны и их античастицы<sup>121</sup>. И для полноты картины иногда может появиться целый атом. Означает ли

---

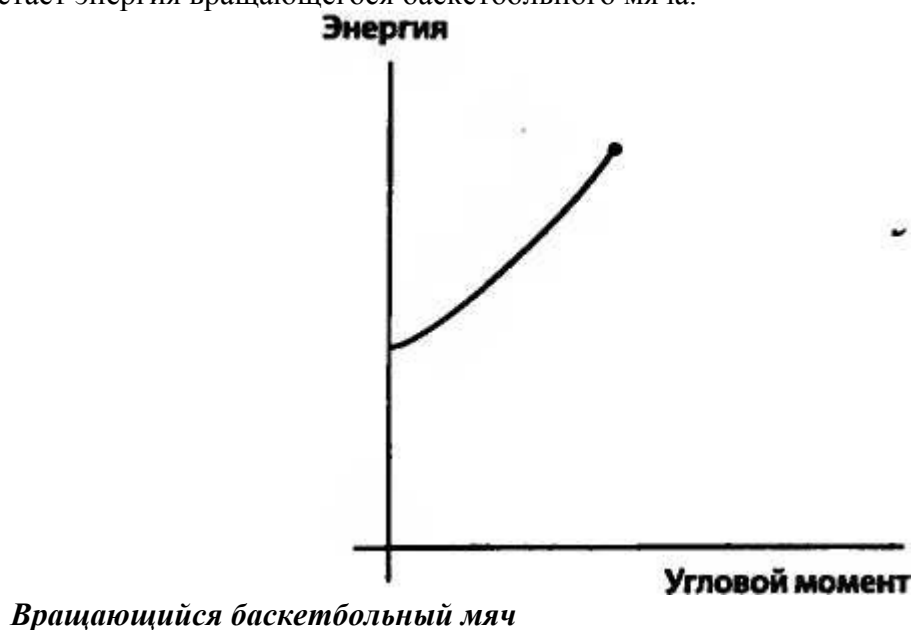
119 Русские переводы последних двух книг: Брайан Грин. Элегантная Вселенная: суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. – Editorial URSS, 2008. Лиза Рэнделл. Закрученные пассажи: проникая в тайны скрытых размерностей пространства. – Либроком, Editorial URSS, 2011. – Примеч, перев.

120 Позитроны – антиматериальные близнецы электронов. Они имеют в точности такую же массу, как и электроны, но противоположный электрический заряд. У электронов заряд отрицательный, а у позитронов – положительный.

121 Все частицы имеют антиматериальных двойников с противоположными значениями электрического заряда и других подобных свойств. Так что существуют антипротоны, антинейтроны и античастицы электронов, называемые позитронами. Кварки – не исключение. Античастица кварка называется антикварком.

это, что электроны состоят из атомов? Очевидно, нет. Столкновения с огромными энергиями помогают разобраться в свойствах частиц, но, оказывается, то, что при этом вылетает, не всегда позволяет судить, из чего эти частицы состоят.

Вот более удачный метод выяснения, состоит ли нечто из частей. Начнем с очевидно составного объекта – камня, баскетбольного мяча или куска теста для пиццы. С таким предметом можно много чего сделать – сжать его до меньшего объема, деформировать, придав ему новую форму, или закрутить его вокруг собственной оси. На сжатие, изгиб или закручивание требуется энергия. Например, вращающийся мяч обладает кинетической энергией; чем быстрее он крутится – тем больше энергия. А поскольку энергия – это масса, быстро вращающийся мяч становится массивнее. Мерой вращения служит *угловой момент*, который учитывает скорость вращения мяча, его размер и массу. Приобретая все больший и больший угловой момент, мяч накапливает энергию. На следующем графике показано, как нарастает энергия вращающегося баскетбольного мяча.



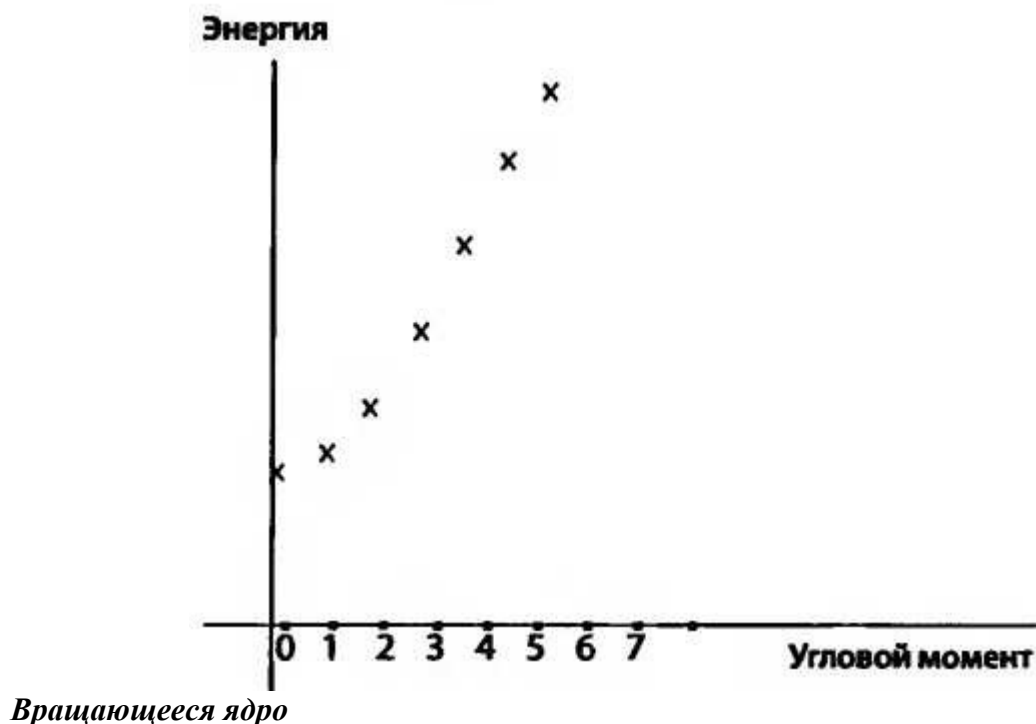
Но почему эта кривая неожиданно обрывается? Догадаться нетрудно. Материал, из которого сделан мяч (кожа или резина), не может выдержать слишком большого натяжения. В какой-то момент мяч будет разорван на части центробежными силами.

Теперь представьте себе частицу размером не больше точки в пространстве. Как заставить математическую точку вращаться вокруг своей оси? Или что бы могло означать изменение ее формы? Возможность придать объекту вращение или заставить его пульсировать – это признак того, что он состоит из меньших частей, частей, которые движутся друг относительно друга.

Молекулы, атомы и ядра тоже можно раскрутить, но в случае этих микроскопических шариков материи центральную роль играет квантовая механика. Как и во всех колебательных системах, энергия и угловой момент могут увеличиваться только дискретными шагами. Раскручивание ядра – это не процесс постепенного накачивания его энергией. Это больше похоже на подталкивание вверх по лестнице. Так что график энергии и углового момента представляет собой последовательность отдельных точек<sup>122</sup>.

---

122 Итальянский физик Туллио Редже первым исследовал свойства подобных графиков, и эта цепочка точек получила название траектории Редже.



Если не считать дискретности шагов, график выглядит в основном так же, как и для баскетбольного мяча, включая и внезапный обрыв. Как и мяч, ядро выдерживает лишь определенную центробежную силу, а потом разлетается на части.

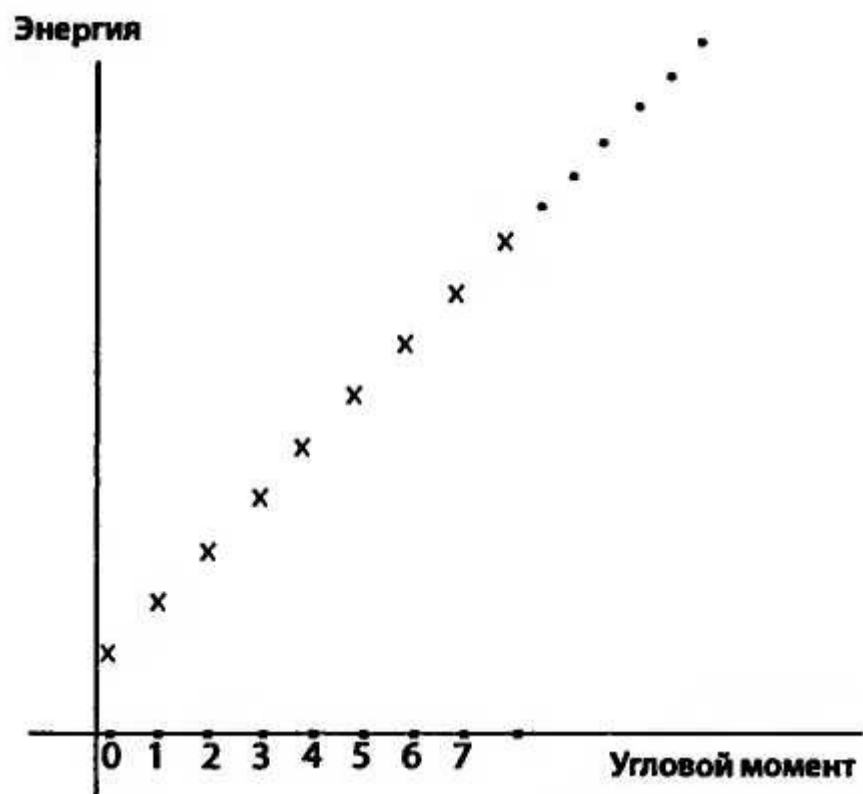
А что можно сказать об электронах? Можно ли их раскрутить? Несмотря на все усилия, а они на протяжении многих лет были довольно значительными, никому не удалось увеличить угловой момент электрона. Мы еще вернемся к электронам, но сначала давайте займемся адронами – протонами, нейтронами, мезонами и глюболами.

Протоны и нейтроны очень похожи. У них почти одинаковая масса, а силы, которые связывают их в ядра, практически идентичны. Единственное существенное различие состоит в том, что протон имеет небольшой электрический заряд, а нейтрон, как и указывает его название, электрически нейтрален. Как будто нейтрон – это протон, которому каким-то образом удалось скрыть свой заряд. Именно это сходство привело физиков к тому, чтобы терминологически объединить эти частицы в один объект – нуклон. Протон – это положительный нуклон, а нейтрон – нейтральный нуклон.

В эпоху зарождения ядерной физики нуклон, хотя он почти в 2000 раз тяжелее электрона, также считался элементарной частицей. Но по части простоты нуклон не имеет ничего общего с электроном. По мере развития ядерной физики объекты размером в 100 000 раз меньше атомов стали считаться не такими уж маленькими. Тогда как электрон остается точкой в пространстве – по крайней мере, на современном уровне знаний, – нуклон демонстрирует богатую, сложную внутреннюю механику. Оказывается, у нуклонов гораздо меньше общего с электронами, чем с ядрами, атомами и молекулами. Протоны и нейтроны – это конгломераты из множества меньших объектов. Мы знаем об этом, поскольку они вращаются, вибрируют и могут менять свою форму.

Точно так же как для баскетбольного мяча, для атомного ядра можно построить график, на котором по горизонтальной оси отложено вращение, то есть угловой момент нуклона, а его энергия – по вертикальной. Когда сорок лет назад это было сделано впервые, получившийся график удивил своей простотой: последовательность точек легла почти точно на *прямую линию*. Еще удивительнее было то, что у нее не наблюдалось конца.



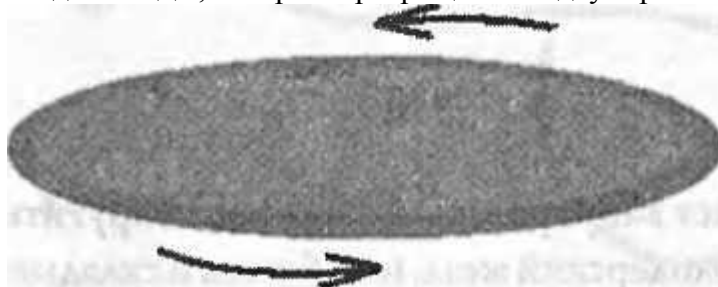


### ***Вращающийся нуклон***

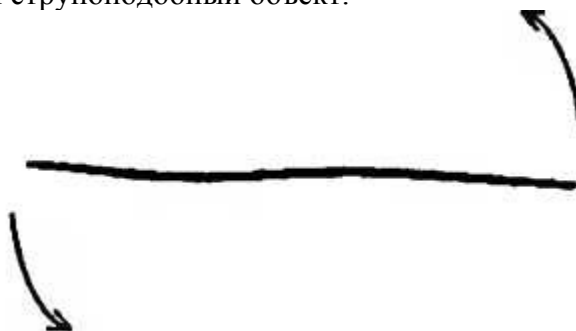
Такая диаграмма несет важную информацию о внутреннем устройстве нуклона. Две отмеченные особенности имеют огромное значение для тех, кто знает, как прочесть скрытое в них послание.

Сам факт, что нуклон может вращаться вокруг своей оси, указывает на то, что это не точечная частица; он состоит из частей, способных двигаться друг относительно друга. Но тут скрывается нечто большее. Вместо того чтобы неожиданно обрываться, последовательность, похоже, продолжается неограниченно, а значит, нуклон не разваливается, когда вращается слишком быстро. То, что удерживает его части вместе, намного мощнее сил, скрепляющих атомное ядро.

Неудивительно, что при вращении нуклон растягивается, но делает он это не так, как вращающийся кусок теста для пиццы, который превращается в двумерный блин.



Расположение точек в виде прямой линии указывает на то, что нуклон растягивается в длинный тонкий эластичный струноподобный объект.



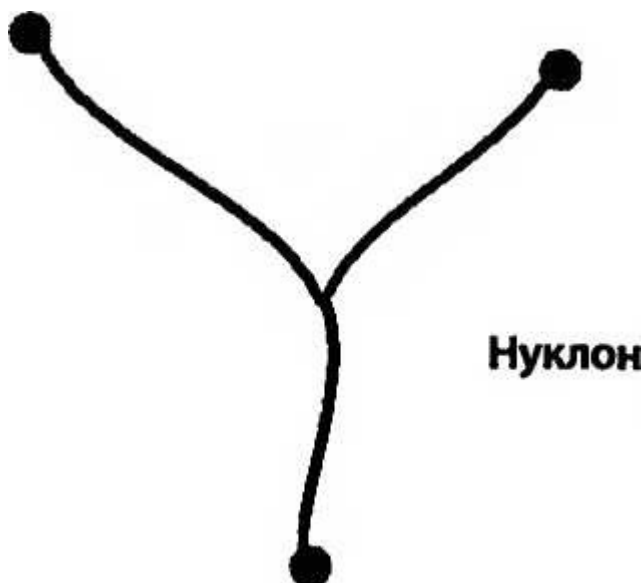
Полвека экспериментов с нуклонами принесли уверенность в том, что это эластичные струны, которые могут растягиваться, вращаться и вибрировать, когда возбуждаются дополнительной энергией. На самом деле все адроны можно растянуть в длинные струноподобные объекты. Очевидно, все они сделаны из одной и той же липкой, тягучей, растяжимой материи – чего-то наподобие кошмарно прочной жевательной резинки, которая совершенно не рвется. Ричард Фейнман использовал термин «партоны» для описания частей нуклона, однако закрепились термины «кварки» и «глюоны», которые предложил Мюррей Гелл-Манн. *Глюоны* – это как раз тот липкий материал, который образует струны и не дает кваркам разлетаться<sup>123</sup>.

Мезоны – это простейшие адроны. Открыто множество разных типов мезонов, но все они имеют одно и то же строение: один кварк и один антикварк, соединенные липкой струной.



Мезон может вибрировать, как пружина, крутиться вокруг своей оси, как чирлидерский жезл, изгибаться и складываться разными способами. Мезоны – это пример *открытых струн*, то есть струн, имеющих концы. В этом отношении они отличаются от резиновых колец, которые мы будем называть *замкнутыми струнами*.

Нуклоны состоят из трех кварков, каждый из которых присоединен к струне, а три струны сходятся в центре, как у боласа индейцев гаучо. Они тоже могут крутиться и вибрировать.



Быстрое вращение и вибрация адрона добавляют струне энергию, растягивают ее и увеличивают ее массу<sup>124</sup>.

Существует еще один тип адронов – семейство «бескварковых» частиц, состоящих только из струн, замкнутых на себя и образующих петлю. Физики называют их *глюболами*, но для струнного теоретика это просто *замкнутые струны*.

<sup>123</sup> Слово «глюон» происходит от английского glue – клей. – Примеч. перев.

<sup>124</sup> Поначалу физики не догадывались, что многие адроны – это вращающиеся или вибрирующие варианты нуклонов и мезонов; они считались совершенно новыми различными частицами. Публиковавшиеся в 1960-х годах таблицы элементарных частиц были длинными списками, для которых не хватало букв в греческом и латинском алфавитах. Но со временем прояснилось понятие «возбужденных состояний», и стало ясно, что все это в основном вращающиеся и вибрирующие мезоны и нуклоны.

## Глюбол, или замкнутая струна



Не похоже, чтобы кварки состояли из еще меньших частиц. Подобно электронам, они столь малы, что их размеры неизмеримы. Но струны, которые связывают кварки между собой, определенно состоят из других объектов, и эти объекты – не кварки. Липкие частицы, которые соединяются в струны, называются глюонами.

По сути, глюоны – это очень маленькие кусочки струны. Будучи чрезвычайно малыми, они тем не менее имеют два «конца» – положительный и отрицательный, – почти как если бы они были маленькими магнитами<sup>125</sup>.



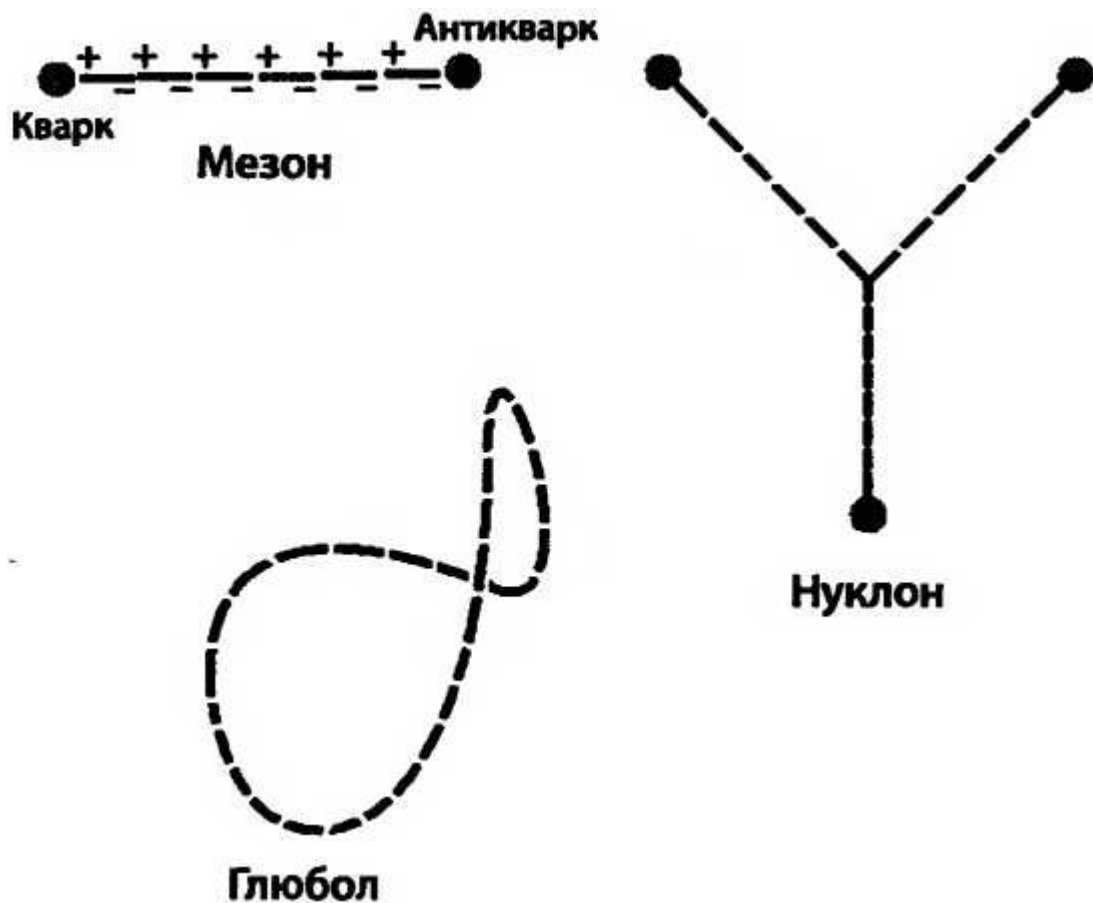
## Глюон

Математическая теория кварков и глюонов называется квантовой хромодинамикой (КХД). Может показаться, что это название связано с цветной фотографией, а не с элементарными частицами. Но терминология скоро прояснится.

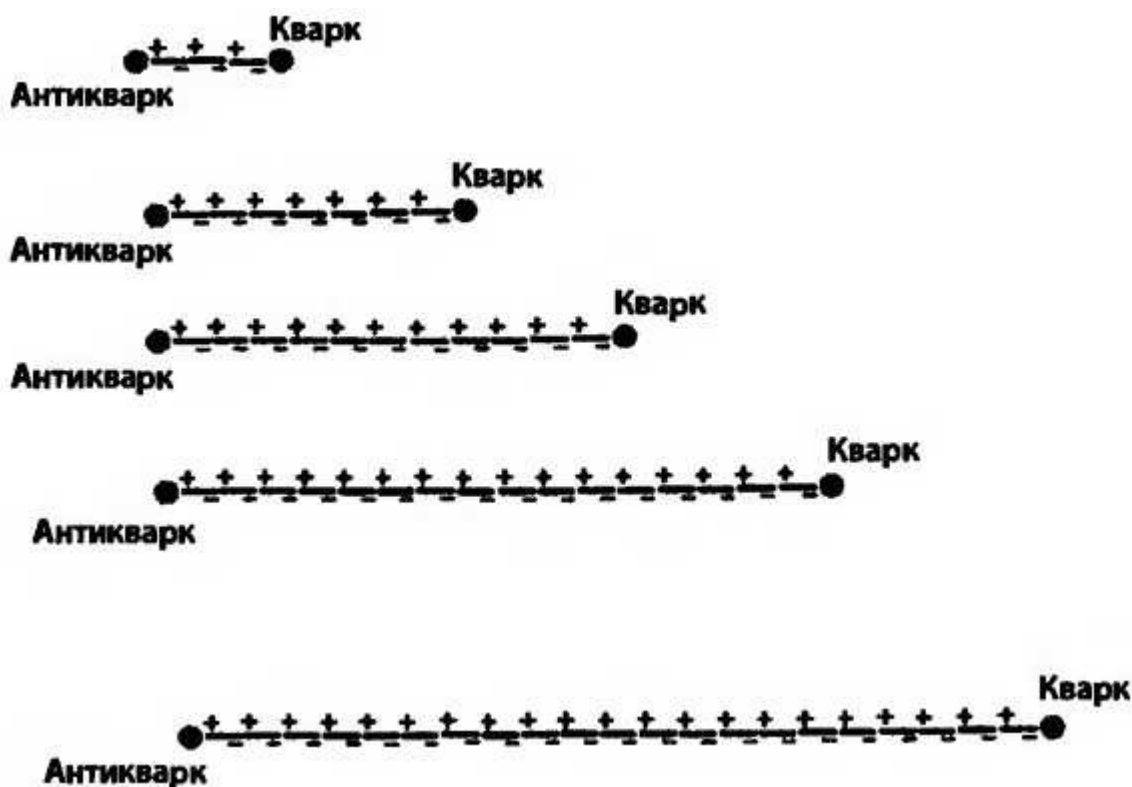
Согласно математическим правилам КХД, глюон не может существовать сам по себе. По математическим законам его положительный и отрицательный концы должны быть присоединены либо к другим глюонам, либо к кваркам: каждый положительный конец должен присоединиться к отрицательному концу другого глюона или к кварку; каждый отрицательный конец должен присоединиться к положительному концу другого глюона или к антикварку; наконец, три положительных или три отрицательных конца могут соединиться вместе. По этим правилам легко можно собрать нуклоны, мезоны и глюболы.

---

<sup>125</sup> Концы магнита обычно называют северным и южным полюсами. Я не хочу, чтобы создалось впечатление, будто глюоны ориентируются подобно стрелкам компаса, поэтому я называю полюса глюонов положительным и отрицательным.



Теперь рассмотрим, что происходит, если кварк в мезоне подвергся воздействию очень большой силы. Такой кварк начинает быстро удаляться от антикварка. Если бы все было так, как с электроном в атоме, то он бы улетел прочь, но здесь случается совсем другое. При удалении кварка от своего партнера между глюонами возникают зазоры, как между молекулами резиновой ленты, когда ее слишком сильно растягивают. Но вместо разрыва глюоны клонируют себя, порождая новые глюоны для заполнения зазоров. Так формируется струна между кварком и антикварком, которая предотвращает убегание кварка. На следующем рисунке показана временная последовательность состояний при такой высокоскоростной попытке убегания кварка от антикварка в мезоне.



В конце концов кварк исчерпает свою энергию, остановится и вернется обратно к антикварку. То же самое случится и с разогнавшимся кварком в нуклоне.

Струнная теория нуклонов, мезонов и глюоболов – это не досужие спекуляции. За прошедшие годы она была исключительно точно подтверждена и рассматривается как часть стандартной теории адронов. Что вызывает путаницу, так это вопрос, следует ли рассматривать струнную теорию как вытекающую из квантовой хромодинамики, иными словами, должны ли струны считаться длинными цепочками долее фундаментальных глюонов или же предпочесть другой способ объяснения: что глюоны – не более чем короткие сегменты струн. Возможно, что оба подхода верны.

Кварки кажутся столь же маленькими и элементарными, как электроны. Они не могут раскручиваться, сжиматься или деформироваться. Но, несмотря на то что в них не видно внутренних частей, они обладают степенью сложности, которая выглядит парадоксальной. Существует много типов кварков с разными электрическими зарядами и массами. Что вызывает эти различия, остается загадкой; внутренние механизмы, лежащие в основе этих различий, слишком малы, чтобы можно было их различить. Поэтому мы называем кварки элементарными, по крайней мере пока, и, как ботаники, даем им разные названия.

Перед Второй мировой войной, когда физикой в основном занимались европейцы, для именования частиц использовали греческий язык. *Фотоны, электроны, мезоны, барионы, лептоны* и даже *адроны* происходят из греческого языка. Но потом порывистые, непочтительные и порой глупые американцы взяли верх, и названия упростились. «Кварк» – это бессмысленное слово из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану», но с этой литературной высоты все покатило вниз. Отличия между кварками разных типов стали обозначать совершенно неприемлемым термином *аромат*. Мы могли бы говорить о шоколадных, клубничных, ванильных, фисташковых, вишневых и мятных кварках, но все оказалось не так. Шесть ароматов кварков: верхний, нижний, странный, очарованный, боттом и топ. В какой-то момент названия «боттом» и «топ» показались слишком рискованными, и довольно быстро они превратились в «преlestный» и «истинный»<sup>126</sup>.

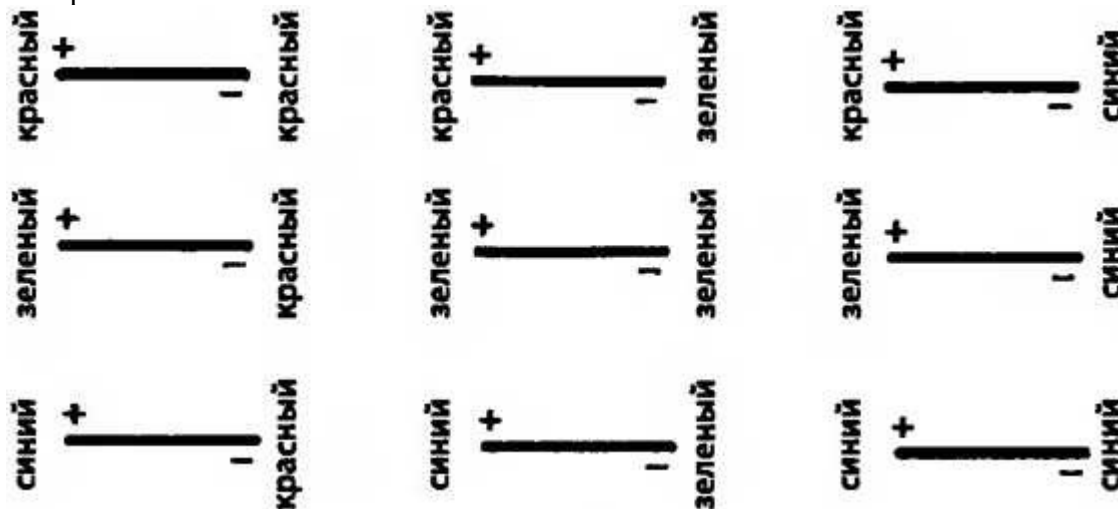
<sup>126</sup> По-английски ароматы первоначально назывались: up, down, strange, (charm, bottom, top. Кварки обозначались по первым буквам этих слов. Однако во многих других языках (в частности, в русском) трудно подобрать удачные переводы, позволяющие различать названия up (направленный вверх, верхний) и top (самый верхний), down (направленный вниз, нижний) и bottom (самый нижний). Это могло вызывать путаницу или

Главная цель моего рассказа об ароматах в том, чтобы просто проиллюстрировать, как мало мы знаем о строительных блоках материи и насколько условным может быть применение термина *элементарные частицы*. Но есть и другое различие, *очень* существенное для работы КХД. Каждый кварк – верхний, нижний, странный, очарованный, прелестный, истинный – может быть трех *цветов*: красного, голубого и зеленого. Отсюда и возникает «хромо» в квантовой хромодинамике.

Притормозим на минуту. Естественно, кварки слишком малы, чтобы отражать свет в обычном нашем понимании. Цветные кварки – вещь лишь незначительно менее глупая, чем шоколадные, клубничные или ванильные кварки. Однако людям нужны названия для обозначения вещей; называть кварки красными, зелеными или синими не более смешно, чем называть либералов – синими, а консерваторов – красными<sup>127</sup>. И хотя мы понимаем происхождение цвета кварков не лучше, чем происхождение их аромата, цвет играет намного более важную роль в КХД.

Глюоны, согласно КХД, не имеют аромата, но по отдельности они даже еще более цветные, чем кварки. Каждый глюон имеет положительный и отрицательный полюса, а каждый полюс обладает цветом – красным, зеленым или голубым. Можно сказать, что существует девять типов глюонов (это несколько избыточное упрощение, но по сути корректное)<sup>128</sup>.

Почему существует три цвета, а не два, не четыре, не какое-то другое число? Тут нет никакой связи с тем, что цветное зрение опирается на три основных цвета. Как я уже отметил, цветные метки произвольны и не имеют ничего общего с цветами, которые мы видим. На самом деле никто не знает, почему их именно три; это одна из тех загадок, которые указывают, как далеки мы еще от полного понимания элементарных частиц. Однако по тому, как они сочетаются в нуклонах и мезонах, мы знаем, что существует три, и только три цвета кварков.



### *Девять типов глюонов*

Тут я должен сделать признание. Несмотря на то что я занимаюсь физикой элементарных частиц более сорока лет, я на самом деле не очень люблю этот раздел физики. Слишком много тут всего намешано: шесть ароматов, три цвета, десятки произвольных

неудобные переводы вроде транслитераций «боттом» и «топ». Новые названия для последних двух ароматов beauty и true позволили уйти от этой проблемы, сохранив обозначения по первым буквам. – Примеч. перев.

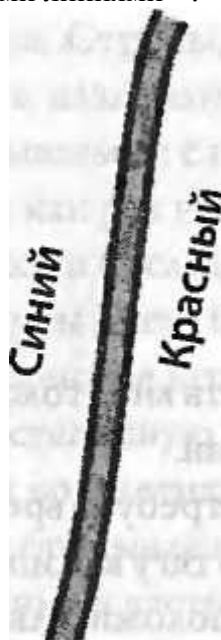
127 Примерно с 2000 года в американской политической жизни красный цвет ассоциируется с республиканской партией, синий – с демократической. В 2010 году партии приняли логотипы, выполненные в этих цветах. – Примеч. перев.

128 Эксперты, прочитав это, отметят, что существует только восемь различных типов глюонов. Одна квантово-механическая комбинация – глюон, с равной вероятностью являющийся красно-красным, сине-синим, зелено-зеленым, – избыточна.

числовых постоянных – трудно это назвать примером простоты и элегантности. Почему я продолжаю этим заниматься? Причина (и, я думаю, не только для меня) в том, что сама эта мешанина говорит нам о природе что-то важное. Трудно поверить, что бесконечно малые точечные частицы могут обладать таким числом свойств и такой сложной структурой. На некотором, еще не открытом уровне должен скрываться механизм, поддерживающий все эти так называемые элементарные частицы. Любопытство относительно этого скрытого изрядной сложности механизма и его влияния на фундаментальные законы природы – вот что заставляет меня брести через ужасное болото физики частиц.

Как водится, кварки стали хорошо известны широкой публике. Но если бы меня попросили предсказать, какие из частиц дают нам лучшие подсказки относительно скрытого в глубине механизма, я бы сделал ставку на глюоны. О чем пытаются рассказать нам эти липкие парочки положительных и отрицательных концов?

В главе 4 я объяснял, что в квантовой теории поля есть нечто большее, чем список частиц. Два других «ингредиента» – это пропагаторы, мировые линии, показывающие движение частиц из одной точки пространства-времени в другую, и узлы. Займемся сначала пропагаторами. Поскольку глюоны имеют два полюса, каждый своего цвета, физики часто изображают их мировые линии двойными. Чтобы обозначить конкретный тип глюона, будем подписывать его цвета рядом с отдельными линиями<sup>129</sup>.

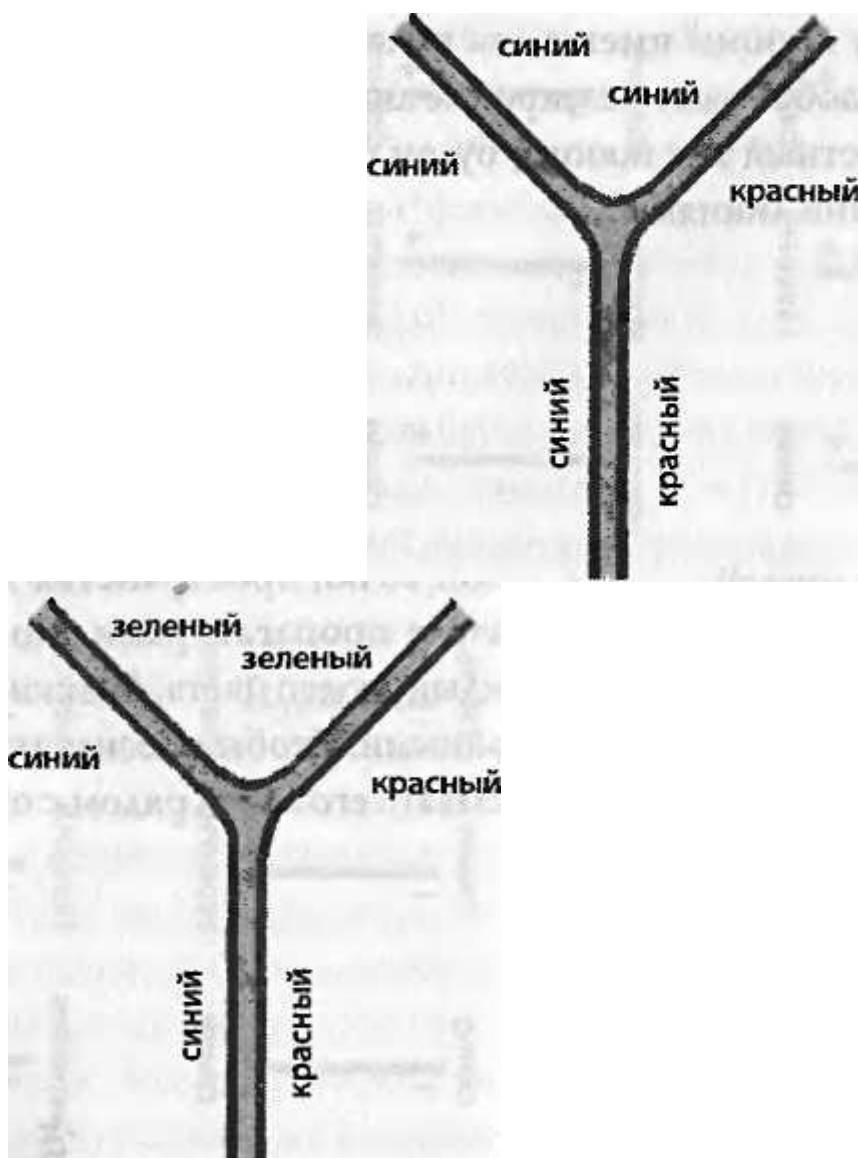


Последний «ингредиент» квантовой теории поля – это список узлов. Наиболее важны для нас те узлы, которые описывают распад одного глюона на два<sup>130</sup>. Схема исключительно проста: когда глюон с двумя концами распадается, возникает два новых конца. Согласно математическим правилам КХД, они должны быть одинакового цвета. Рассмотрим два примера. При просмотре снизу вверх видно, что сине-красный глюон распадается на сине-синий и сине-красный; на второй схеме сине-красный глюон распадается на сине-зеленый и зелено-красный.

---

<sup>129</sup> Для некоторых моих коллег так называемые двойные пропагаторы – это просто прием для отслеживания математических возможностей теории. Для других, в том числе и для меня, это важное указание на особенности микроскопического строения, которые слишком малы, чтобы сегодня их обнаружить.

<sup>130</sup> Вас, возможно, удивит, откуда мы знаем, что глюоны могут распадаться на пары глюонов. Ответ кроется глубоко в дебрях математики КХД. Согласно математическим правилам квантовой теории поля, глюоны могут делать только две вещи: распадаться на два глюона и испускать кварк. В действительности они делают и то и другое.



Эти узлы можно перевернуть вниз головой, чтобы показать, как два глюона могут слиться в один.

Хотя все это неочевидно и требует времени для полного понимания, глюоны имеют сильную тягу к слипанию друг с другом и образованию длинных цепочек: положительный конец к отрицательному, красный к красному, синий к синему, зеленый к зеленому. Эти цепочки и есть струны, которые связывают кварки, придавая адронам их струнные свойства.

### Струны в фундаменте

Идея эластичных струн вновь всплыла при изучении квантовой гравитации, с той лишь разницей, что они оказались меньше и быстрее примерно на двадцать порядков величины. Эти крошечные, гибкие и невероятно мощные нити энергии называются *фундаментальными струнами*<sup>131</sup>.

Позвольте мне во избежание недоразумений еще раз повторить, что в современной физике теория струн имеет два совершенно различных приложения. В применении к адронам она используется в масштабах, которые кажутся крошечными по обычным человеческим меркам, но являются гигантскими с точки зрения фундаментальной физики.

<sup>131</sup> Дискуссионным остается вопрос о том, являются фундаментальные струны окончательным объяснением элементарных частиц или просто очередной ступенью редукционистского марша ко все меньшего размера объектам. Независимо от их природы, в настоящее время для удобства используется термин «фундаментальные струны».



То, что три типа адронов – нуклоны, мезоны и глюболы – являются струнообразными объектами, которые описываются математикой теории струн, – это признанный факт. Лабораторным экспериментам, лежащим в основе теории адронных струн, уже почти полвека. Струны, которые связывают адроны, а сами состоят из глюонов, называются КХД-струнами. Фундаментальные же струны, связываемые с гравитацией и физикой около-планковского масштаба, как раз и вызвали все волнения, споры, перепалки в блогах и выход в последнее время полемических книг.

Фундаментальные струны могут быть настолько же меньше протона, насколько протон меньше штата Нью-Джерси. Но для них гравитация играет первостепенную роль.

Гравитационные силы во многих отношениях очень похожи на электрические. Формула, описывающая силу взаимодействия между электрически заряженными частицами, называется законом Кулона; формула для сил гравитации – законом всемирного тяготения Ньютона. Обе эти силы – и электрические, и гравитационные – подчиняются *закону обратных квадратов*. Это значит, что величина силы убывает как квадрат расстояния. Удвоение расстояния между частицами приводит к уменьшению силы в четыре раза; утроение расстояния снижает силу в девять раз; на учетверенном расстоянии сила станет меньше в шестнадцать раз и т.д. Кулоновская сила между двумя частицами пропорциональна произведению их электрических зарядов; ньютоновская сила притяжения пропорциональна произведению их масс. Это сходства, но есть и различия: электрическая сила может быть отталкивающей (между одинаковыми зарядами) или притягивающей (для противоположных зарядов), но гравитация всегда только притягивает.

Одно важное сходство состоит в том, что оба типа сил могут порождать волны. Представьте себе, что происходит с силой, действующей между двумя отдаленными заряженными частицами, когда одна из них неожиданно перемещается, скажем, вдаль от другого заряда. Можно подумать, что сила, действующая на вторую частицу, при смещении первой мгновенно изменится. Но в этой картине кое-что ошибочно. Если сила, действующая на далекую частицу, действительно менялась бы сразу, без задержки, можно было бы использовать этот эффект для отправки мгновенных сообщений в дальние районы космоса. Но мгновенные сообщения нарушают глубочайшие принципы физики. Согласно специальной теории относительности, никакой сигнал не может распространяться быстрее света. Нельзя передать сообщение за меньшее время, чем требуется свету на то, чтобы пройти то же расстояние.

В действительности сила, действующая на дальнюю частицу, не меняется мгновенно при резком движении ближней частицы. Вместо этого от переместившейся частицы начинает распространяться (со скоростью света) возмущение. Только когда оно достигнет дальней частицы, действующая на нее сила изменится. Распространение этого возмущения напоминает волновые колебания. Когда волна наконец приходит, она толкает вторую частицу, заставляя ее вести себя подобно пробке, качающейся на волнах в пруду.

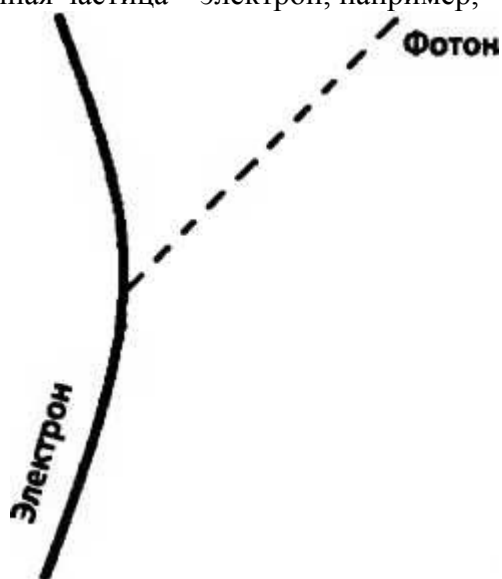
Ситуация аналогична тому, как если бы гигантская рука сдвинула Солнце. Его смещение не ощущалось бы на Земле в течение восьми минут – времени, которое требуется свету, чтобы пройти путь от Солнца. «Послание» распространяется, опять же со скоростью света, в форме *колебаний кривизны*, или *гравитационных волн*. Гравитационные волны являются для массы тем же, чем электромагнитные волны – для электрического заряда.

Теперь добавим немного квантовой теории. Как мы знаем, энергия колеблющихся электромагнитных волн приходит неделимыми квантами, которые называются фотонами. Планк и Эйнштейн имели очень серьезные причины считать, что колебательная энергия может поступать лишь дискретными порциями, и если только мы очень крупно не заблуждаемся, те же аргументы применимы и к гравитационным волнам. Кванты гравитационного поля называются гравитонами.

Здесь я должен сказать, что существование гравитонов, в отличие от фотонов, – это экспериментально не проверенная догадка. Она, как считает большинство физиков, базируется на надежно установленных принципах, но тем не менее остается гипотезой. Но

даже если это так, рассуждения, приводящие к выводу о существовании гравитонов, убедительны для большинства физиков, которые задумывались над этим вопросом.

Сходство между фотонами и гравитонами поднимает интересные вопросы. Электромагнитное излучение объясняется (в квантовой теории поля) фейнмановской диаграммой, в которой заряженная частица – электрон, например, – испускает фотон.



*Узел испускания фотона*

Естественно ожидать, что гравитационные волны возникают, когда частицы испускают гравитоны. Поскольку в гравитационном взаимодействии участвует всё, то все частицы должны быть способны испускать гравитоны.



*Узел испускания гравитона*

Даже гравитоны могут испускать гравитоны.



К сожалению, включение гравитонов в фейнмановские диаграммы приводит к математической катастрофе. Почти полвека физики-теоретики пытались придать смысл квантовой теории поля в применении к гравитонам и раз за разом терпели поражение, так что многие из нас пришли к выводу, что это бесполезное дело.

### Проблемы с квантовой теорией поля

Одним из ярких эпизодов поездки в Кембридж в 1994 году был обед с моим старым другом сэром Роджером Пеироузом. Сэр Роджер как раз только что стал сэром Роджером, и мы с Энн приехали в Оксфорд поздравить его.

Все четверо – мы с Роджером и наши жены – сидели на берегу реки Червелл в приятном открытом ресторанчике, глядя на проплывающих мимо пантеров. Пантинг, если вы не знакомы с этим видом спорта, – это благородный способ катания на лодке с использованием длинного шеста для неспешного отталкивания им от дна. Это буколическое занятие всегда напоминает мне полотно Ренуара «Завтрак лодочников», но в нем есть свои опасности. Когда мимо проплывала лодка с группой поющих студентов, шест у симпатичной девушки, которая с ним управлялась, застрял в иле. Она не желала его отпускать и немало нас позабавила, когда продолжила цепляться за шест, глядя вслед уплывающей лодке.

Тем временем мы вчетвером делили заказанный на всех шоколадный мусс. Дамы уже прикончили свои порции, а мы с Роджером смеялись над севшей на мель пантершей (она тоже хохотала), еще доедали оставшийся восхитительный темный шоколадный десерт. И тут мое внимание привлекло то, что мы с Роджером, вместо того чтобы брать шоколад полной вилкой, по очереди отрезаем половину от оставшегося куска. Роджер тоже это заметил, и началось соревнование – кто сможет последним разделить оставшийся кусочек.

Греки, напомнил Роджер, интересовались тем, бесконечно ли делима материя или у каждой субстанции есть свои мельчайшие неделимые кусочки – то, что они называли атомами. «Как ты думаешь, а существуют ли атомы шоколада?» – спросил я. Роджер заявил, что не припомнит, является ли шоколад одним из элементов периодической системы. Как бы то ни было, мы наконец доделили мусс до того, что казалось похожим на мельчайший атом шоколада, и, если я не ошибаюсь, он достался Роджеру. Инцидент с пантершей тоже счастливо завершился, когда мимо проплыла следующая лодка.

Проблема с квантовой теорией поля заключается в том, что пространство (и пространство-время) в ней подобны бесконечно делимому шоколадному муссу. Как бы тонко вы его ни нарезали, всегда можно разделить его еще тоньше. Все великие математические загадки имеют дело с бесконечностью. Как представить, что числа идут друг за другом без конца? Но как представить себе, что это не так? Как пространство может быть бесконечно делимым? Но как оно может таковым не быть? Я подозреваю, что бесконечность – главная причина помешательств среди математиков.

Помешанные или нет, математики называют бесконечно делимое пространство

*континуумом.* Проблема с ним в том, что на самых малых расстояниях в нем может происходить ужасающее число событий. Фактически в континууме нет самого малого расстояния – вы можете сгнать в процессе бесконечного спуска ко все меньшим и меньшим клеткам, и события будут происходить на каждом уровне. Иначе говоря, континуум может содержать бесконечное число битов информации в любом крошечном объеме пространства, сколь бы мал он ни был.

Проблема бесконечно малых особенно неприятна в квантовой механике, где все, что может дрожать, – дрожит, и «все, что не запрещено, обязательно». Даже в пустом пространстве при абсолютном нуле поля, такие как электрическое и магнитное, флуктуируют.

Эти флуктуации происходят во всех масштабах – от самых больших волн с длиной в миллиарды световых лет до волн размером не больше математической точки. Эта дрожь квантовых полей позволяет хранить неограниченное количество информации в любом крошечном объеме. И это рецепт математической катастрофы.

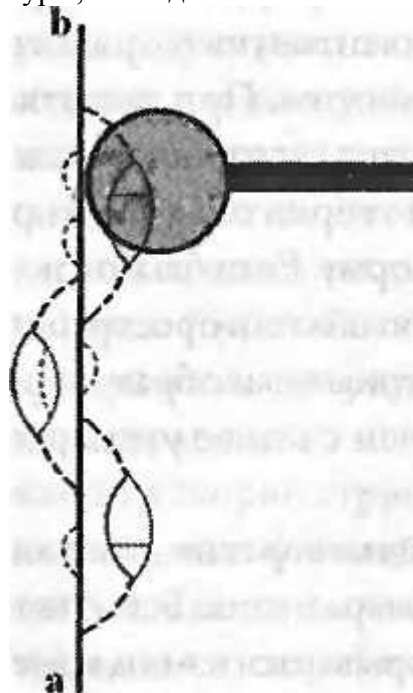
Потенциально бесконечное число битов в каждом крошечном объеме пространства проявляется на фейнмановских диаграммах как бесконечный переход ко все меньшим и меньшим субдиаграммам. Начнем с простой идеи пропагатора, изображающего электрон, движущийся из одной пространственно-временной точки в другую. Он начинается и заканчивается одним электроном.

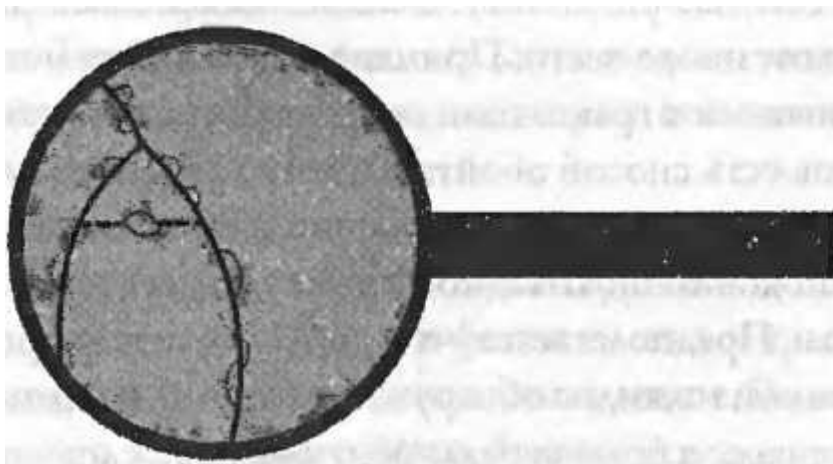


Для электрона есть и другие способы попасть из точки *a* в точку *b* – например, жонглируя по пути фотонами.



Очевидно, что число таких возможностей бесконечно, а согласно фейнмановским правилам, все они должны быть просуммированы, чтобы определить вероятность. Каждую диаграмму можно украсить дополнительными структурами. Каждый пропагатор и узел можно заменить более сложной историей, включающей диаграммы внутри диаграмм внутри диаграмм, пока они не станут неразлично мелкими. Но, пользуясь мощной лупой, можно добавлять еще более мелкие структуры, и так до бесконечности.





Возможность бесконечно добавлять на фейнмановские диаграммы все более мелкие структуры – одно из тревожных следствий континуальности пространства-времени в квантовой теории поля: количество шоколадного мусса всегда можно уменьшить.

С учетом всего этого – неудивительно, что квантовая теория поля математически опасный предмет. Непросто добиться, чтобы все флуктуации в бесконечно большом числе бесконечно малых ячеек пространства собрались в целостную вселенную. В действительности квантовая теория поля по большей части идет вразнос и дает бессмыслицу. Даже Стандартная модель элементарных частиц может при окончательном анализе не оказаться математически корректной.

Но ничто не сравнится с трудностями, возникающими, когда пробуешь построить квантовую теорию гравитации. Напомню, гравитация – это геометрия. При попытках совместить общую теорию относительности с квантовой механикой оказывается, что по правилам квантовой теории поля само пространство-время постоянно меняет свою форму. Если бы можно было рассмотреть под увеличением крошечную область пространства, мы увидели бы, что оно бешено дрожит, изгибаясь и образуя крошечные кочки и узлы кривизны. Более того, чем сильнее увеличение, тем неистовее становятся эти флуктуации.

Гипотетические фейнмановские диаграммы, включающие гравитоны, отражают эти извращения. Бесконечное число все меньших и меньших диаграмм вырывается из-под контроля. Каждая попытка придать смысл квантовой теории поля для гравитации приводила к одному и тому же результату: в самых малых масштабах происходит слишком много всего. Применение обычных методов квантовой теории поля к гравитации ведет к математическому фиаско.

У физиков есть способ обойти катастрофу, связанную с бесконечной делимостью пространства: они притворяются, будто пространство, подобно шоколадному муссу, не является истинным континуумом. Предполагается, что, дойдя в делении пространства до определенной точки, вы обнаружите у него неделимые крупинки, которые уже нельзя больше раздробить. Иными словами, они прекращают рисование фейнмановских диаграмм, когда их подструктуры становятся слишком маленькими. Это ограничение по малости величины называется *перенормировкой*. По сути, перенормировка – не что иное, как разбиение пространства на неделимые воксели, вмещающие не более одного бита.

Перенормировка кажется уходом от проблемы, но для нее есть одно оправдание. Физики долго рассуждали о том, что планковская длина является предельно малым атомом пространства. Фейнмановские диаграммы, даже включающие гравитоны, сохраняют четкий смысл, если только прекратить добавлять к ним структуры меньше планковского размера или около того. Поэтому почти все ожидали, что пространство на планковском масштабе имеет неделимую, гранулярную, вокселизованную структуру.

Но это было до открытия голографического принципа. Как мы увидели в главе 18, замена непрерывного пространства массивом вокселей, имеющих конечный, планковский размер, – это ошибочная идея. Вокселизация пространства значительно завышает число вариантов заполнения его областей. Это привело бы Птолемея к ошибочному выводу

относительно числа битов, которые могут храниться в его библиотеке, а теоретических физиков – к неверному представлению о количестве информации, которая может содержаться в области пространства.

Почти с самого появления теории струн признавалось, что она решает загадку бесконечно малых фейнмановских диаграмм. Отчасти она достигает этого, избавляясь от идеи бесконечно малых частиц. Но вплоть до появления голографического принципа недооценивалось, насколько радикально теория струн отличается от перенормировочной или вокселизированной версии квантовой теории поля. Замечательный факт состоит в том, что теория струн – это принципиально голографическая теория, описывающая пикселизированный мир.

Современная теория струн, как и ее более ранние воплощения, имеет дело с открытыми и замкнутыми струнами. В большинстве, хотя и не во всех, версий теории фотон – это открытая струна, подобная мезону, но только значительно меньше. Во всех версиях гравитон – это замкнутая струна, больше всего напоминающая миниатюрный глюбол. Может ли быть так, что в каком-то неожиданном глубоком смысле эти два типа струн – фундаментальные и КХД-струны – окажутся одними и теми же объектами? С учетом различия в их размерах это кажется маловероятным, однако струнные теоретики стали подозревать, что это огромное различие в масштабах может вводить в заблуждение. В главе 23 мы увидим, что в теории струн есть определенное единство, но пока мы будем говорить о двух разных теориях струн для разных явлений.

Струна – это гибкий объект, длина которого много больше толщины: шнурок для ботинок или рыболовная леска – это струны. В физике слово «струна» также подразумевает эластичность: струны могут растягиваться и сжиматься, подобно жгуту эспандера или резиновой ленте. КХД-струны очень прочные – к концу мезона можно подвесить большой грузовик, но фундаментальные струны еще прочнее. На самом деле, невзирая на ничтожную толщину, фундаментальные струны так невероятно прочны, что в мире обычной материи их не с чем сравнить. Число грузовиков, которое могла бы выдержать фундаментальная струна, составляет около  $10^{40}$ . Из-за этого колоссального натяжения чрезвычайно трудно растянуть фундаментальную струну до сколько-нибудь заметных размеров. Поэтому типичные размеры фундаментальных струн должны быть ненамного больше планковской длины.

Для струн, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, – жгутов для эспандера, резиновых лент и растянутых жевательных резинок – квантовая механика особой роли не играет, но КХД-струны и фундаментальные струны – это существенным образом квантово-механические объекты. Среди прочего это означает, что энергия может добавляться им лишь дискретными, неделимыми порциями. Переход от одного значения энергии к другому может быть выполнен только «квантовым скачком» вверх по лестнице энергетических уровней.

Нижний конец энергетической лестницы называется *нулевым состоянием*. Добавление одной единицы энергии переводит в *первое возбужденное состояние*. Следующий энергетический шаг дает *второе возбужденное состояние* и так далее шаг за шагом. Обычные элементарные частицы, такие как электроны и фотоны, находятся внизу лестницы. Если они вообще вибрируют, это лишь квантовые нулевые колебания. Но если теория струн верна, то их можно заставить вращаться и колебаться со все большей энергией (а значит, и массой).

Гитарную струну можно возбудить, щипнув медиатором, но, как вы понимаете, гитарный медиатор великоват для того, чтобы возбудить электрон. Простейший способ состоит в том, чтобы ударить электрон другой частицей. В результате мы используем одни частицы в качестве «медиаторов», чтобы «щипать» другие. Если столкновение достаточно сильное, оно заставит обе струны вибрировать в возбужденных состояниях. Естественно задать вопрос: «Почему бы физикам-экспериментаторам не возбудить электроны и протоны на ускорителях, сняв тем самым, раз и навсегда, вопрос о том, являются ли частицы вибрирующими струнами?» Проблема в высоте ступеньки – она слишком велика. Энергия,

необходимая для того, чтобы закрутить или заставить вибрировать адрон, — довольно умеренная по стандартам современной физики элементарных частиц, но энергия, требуемая для возбуждения фундаментальной струны, чрезмерно велика. Добавление электрону одной порции энергии увеличило бы его массу почти на планковскую величину. Еще хуже то, что эту энергию надо сконцентрировать в невероятно малом объеме пространства. Грубо говоря, потребовалось бы затолкать массу миллиарда миллиардов протонов в область размером в миллиард миллиардов раз меньше самого протона. Ни один из построенных ускорителей даже близко не подходит для такой задачи. Подобное никогда не делалось и, вероятно, никогда не будет сделано<sup>132</sup>.

Сильно возбужденные струны в среднем больше тех, что находятся в нулевом состоянии; дополнительная энергия растягивает их, увеличивая их длину. Если суметь вкачать в струну достаточную энергию, она растянется и станет похожа на большой, безумно дрожащий, запутанный клубок шерсти. И тут нет предела; при наличии достаточной энергии струну можно растянуть до любого размера.

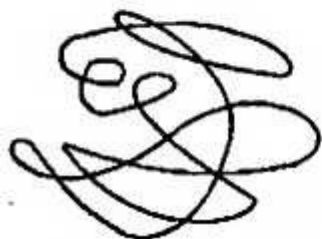
Есть только один способ, которым сильно возбужденные струны могут быть получены в природе, раз уж их не получить в лаборатории. Как мы увидим в главе 21, черные дыры — даже те гиганты, что находятся в центрах галактик, — это колоссальные запутанные «струны-монстры».



**Простейшие струны — это  
элементарные частицы**



**Встряхните или нагрейте их,  
добавив тем самым энергии**



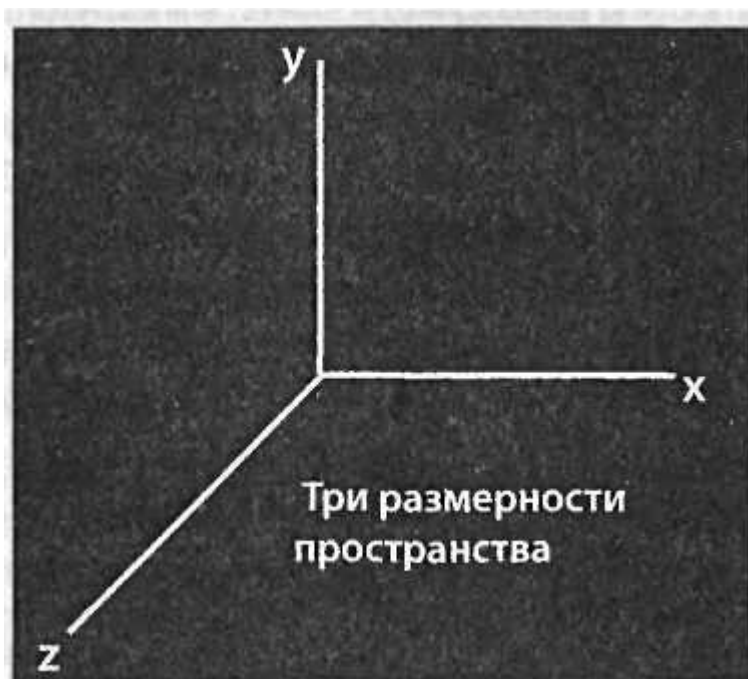
**Добавьте еще больше энергии**

Существует еще одно важное и удивительное следствие квантовой механики, слишком тонкое и технически сложное, чтобы объяснять его здесь. Пространство, каким мы его обычно воспринимаем, трехмерно. Существует много терминов для описания этих трех измерений, например долгота, широта и возвышение или длина, ширина и высота. Математики и физики часто описывают размерности, используя три оси, обозначенные  $x, y, z$ .

---

<sup>132</sup> Именно поэтому некоторые физики утверждают, что теория струн навсегда останется экспериментально не подтвержденной. Для такого заявления есть основания, но вина теоретиков тут не больше, чем экспериментаторов. Эти ленивые собаки должны построить ускоритель размером с галактику. Ну и конечно, добыть триллионы баррелей нефти, которые понадобятся каждую секунду, чтобы его питать.





Однако фундаментальным струнам недостаточно для движения только трех измерений. Я имею в виду, что тонкая математика теории струн становится ненадежной, пока к пространству не добавляются дополнительные измерения. Струнные теоретики много лет назад обнаружили, что математическая согласованность их уравнений нарушается, если не ввести *шесть дополнительных измерений пространства*. Мне всегда казалось, что если понимаешь что-то достаточно хорошо, то должна быть возможность объяснить это неформально. Но потребность теории струн в шести дополнительных измерениях так и не поддается простому объяснению, хотя прошло уже тридцать пять лет. Боюсь, тут я вынужден буду прибегнуть к методу негодяев и сказать: «Можно показать, что...»

Я бы очень удивился, встретив кого-то, способного представить себе четыре или пять измерений, не говоря уже о девяти<sup>133</sup>. Мне это удастся не лучше, чем вам, но я могу добавить шесть букв алфавита – *r, s, t, u, v, w* – к обычным *x, y* и *z*, а затем терзать эти символы методами алгебры и анализа. При девяти измерениях, доступных для движения, «можно показать, что» теория струн становится математически согласованной.

Теперь вы можете спросить: если теория струн требует девяти измерений, а наблюдаемое пространство имеет только три, не является ли это прямым доказательством того, что теория струн неверна? Но не все так просто. Многие знаменитые физики, включая Эйнштейна, Вольфганга Паули, Феликса Клейна, Стивена Вайнберга, Мюррея Гелл-Манна и Стивена Хокинга (никто из них не является струнным теоретиком), серьезно рассматривали возможность того, что пространство имеет более трех измерений. Очевидно, они не галлюцинировали, значит, должен быть какой-то способ скрыть существование дополнительных размерностей. Характерные словечки, используемые для обозначения сокрытия дополнительных измерений, – «свертка» и «компактификация». Струнные теоретики *сворачивают* шесть дополнительных измерений посредством процесса, называемого *компактификацией*. Идея состоит в том, что дополнительные измерения пространства могут быть скручены в очень маленькие узлы, так что мы, огромные создания, слишком велики, чтобы в них перемещаться или даже заметить их.

Представление о том, что одно или более измерений можно скрутить в крошечную геометрическую форму, слишком маленькую, чтобы ее заметить, – это общее место современной физики высоких энергий. Некоторые люди думают, что *дополнительные измерения* – это слишком умозрительная идея, «научная фантастика с уравнениями», как сказал один остряк. Но это недопонимание, основанное на невежестве. Все современные

---

<sup>133</sup> Часто приходится слышать, что теория струн десятимерна. Еще одно измерение не что иное, как время. Иными словами, теория струн  $(9 + 1)$  – мерная.

теории элементарных частиц используют своего рода дополнительные размерности для обеспечения недостающих механизмов, которые делают частицы сложными.

Струнные теоретики не изобрели концепцию дополнительных измерений, а использовали ее особым творческим способом. Хотя теория струн требует шести дополнительных измерений, общее представление можно получить, добавив к пространству всего одно новое измерение. Давайте исследуем идею дополнительных измерений в этой ее простейшей ипостаси. Начав с мира, имеющего только одно пространственное измерение, – назовем его Лайнландией, – мы добавим одно дополнительное свернутое измерение. Для указания точки в Лайнландии достаточно всего одной координаты; обитатели называют ее  $X$ .

Чтобы Лайнландия стала интереснее, нам надо добавить в нее объекты, так что создадим частицы, которые движутся вдоль линии.



Думайте о них как о крошечных бусинах, которые сцепляются друг с другом, образуя одномерные атомы, молекулы и, возможно, даже живых существ. (Я сильно сомневаюсь, что жизнь может существовать в мире с одним измерением, но давайте пока подержим эти сомнения при себе.) Считайте и линию, и бусины бесконечно тонкими, так что они не высовываются в другие измерения. А лучше даже попытаться представить себе линию с бусинами вообще без других измерений<sup>134</sup>.

Сообразительный человек придумает много альтернативных версий Лайнландии. Все бусины могут быть одинаковыми, или, в более интересном мире, может существовать несколько разных типов бусин. Чтобы различать эти типы, пометим их цветами – красным, синим, зеленым и т. д. Я могу представить себе бесчисленно множество возможностей: красные бусины притягивают синие, но отталкивают зеленые. Черные бусины очень тяжелые, а белые – безмассовые и движутся по Лайнландии со скоростью света. Можно даже позволить бусинам быть квантово-механическими, цвет каждой отдельной бусины может быть неопределенным.

Жизнь в одном-единственном измерении очень стесненная. Имея свободу двигаться только вдоль одной линии, лайнландцы непременно будут сталкиваться друг с другом. Смогут ли они общаться? Легко: для отправки сообщений они могут перебрасываться бусинами, находящимися у их концов. Однако их социальная жизнь очень уныла: каждое существо имеет лишь двоих знакомых – одного справа и одного слева. Нужно по меньшей мере два измерения, чтобы сформировать социальный круг.

Но внешность обманчива. Когда лайнландцы смотрят в очень сильный микроскоп, они начинают обнаруживать, что их мир в действительности двумерный. Они видят не идеальную математическую линию нулевой толщины, а скорее поверхность цилиндра. В обычных обстоятельствах окружность этого цилиндра слишком мала, чтобы лайнландцы могли ее обнаружить, но под микроскопом удалось открыть куда более мелкие объекты, меньше даже, чем лайнландские атомы. Эти объекты столь малы, что могут двигаться в *двух* измерениях.



Подобно своим братьям-великанам, эти лайнландские карлики могут перемещаться вдоль цилиндра, но они достаточно малы, чтобы обходить по его окружности. Они способны даже двигаться одновременно по обоим направлениям, накручивая спиральные витки вокруг цилиндра. И – о, радость! – они могут даже обходить друг друга без столкновений. Вполне

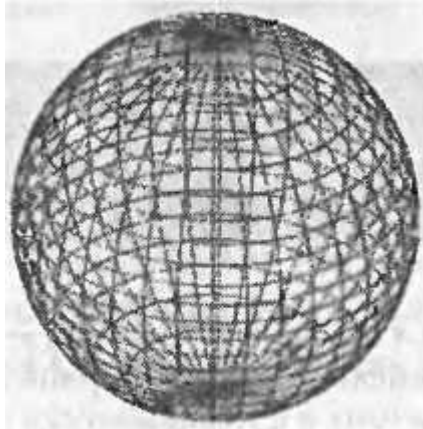
<sup>134</sup> CGHS-модель, которую я описывал в главе 15, – это и есть Лайнландия, но с массивной (и, несомненно, опасной) черной дырой на краю лайнландского космоса.

резонно они утверждают, что живут в двумерном пространстве, но с одной особенностью: если двигаться по прямой линии в дополнительном измерении, то скоро вернешься в исходную точку.

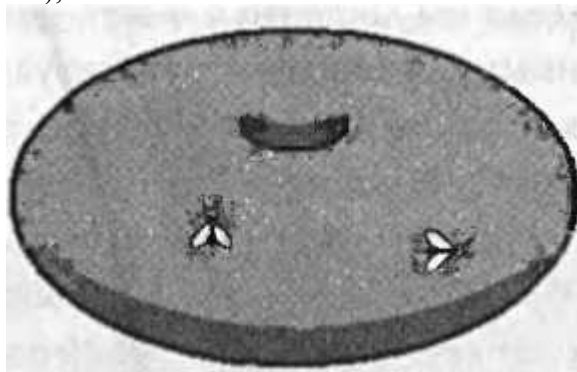
Лайнландцам понадобилось название для нового направления, и они обозначили его  $Y$ . В отличие от  $X$ , вдоль  $Y$  нельзя далеко уйти, не вернувшись в исходную точку. Лайнландские математики говорят, что направление  $Y$  *компактифицировано*.

Цилиндр, изображенный выше, получается при добавлении дополнительного свернутого измерения к исходному одномерному миру. Добавление шести дополнительных измерений к миру, в котором уже есть три обычных, выходит далеко за пределы способностей человеческого мозга к визуализации. Физиков и математиков отличает от остальных людей не то, что они мутанты, способные представить себе любое число измерений, а скорее то, что они прошли тяжелую математическую переподготовку, опять же, перепрошивающую сознание, – чтобы научиться «видеть» дополнительные измерения.

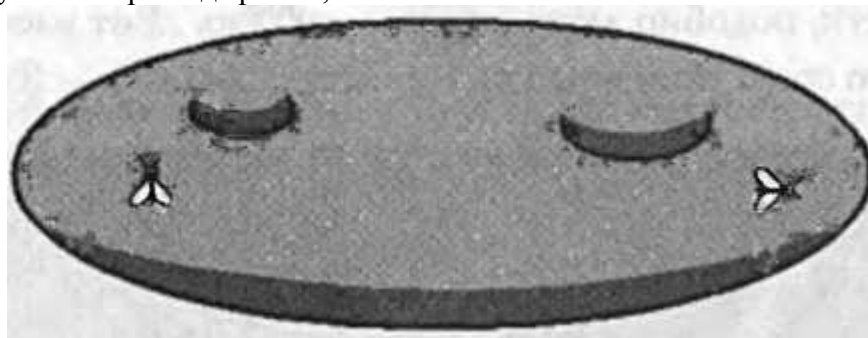
Единственное дополнительное измерение не обеспечивает достаточного разнообразия возможностей. Перемещение в свернутом направлении будет подобно движению по кругу без осознания этого. Но уже два дополнительных измерения открывают бесконечное множество новых возможностей. Два измерения могут образовать сферу.



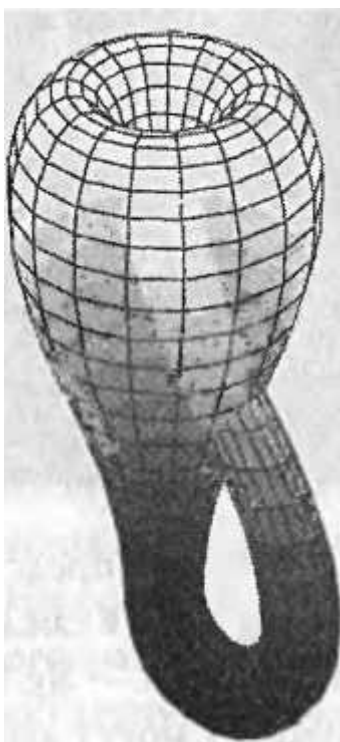
тор (поверхность бублика),



бублик с двумя или тремя дырками,



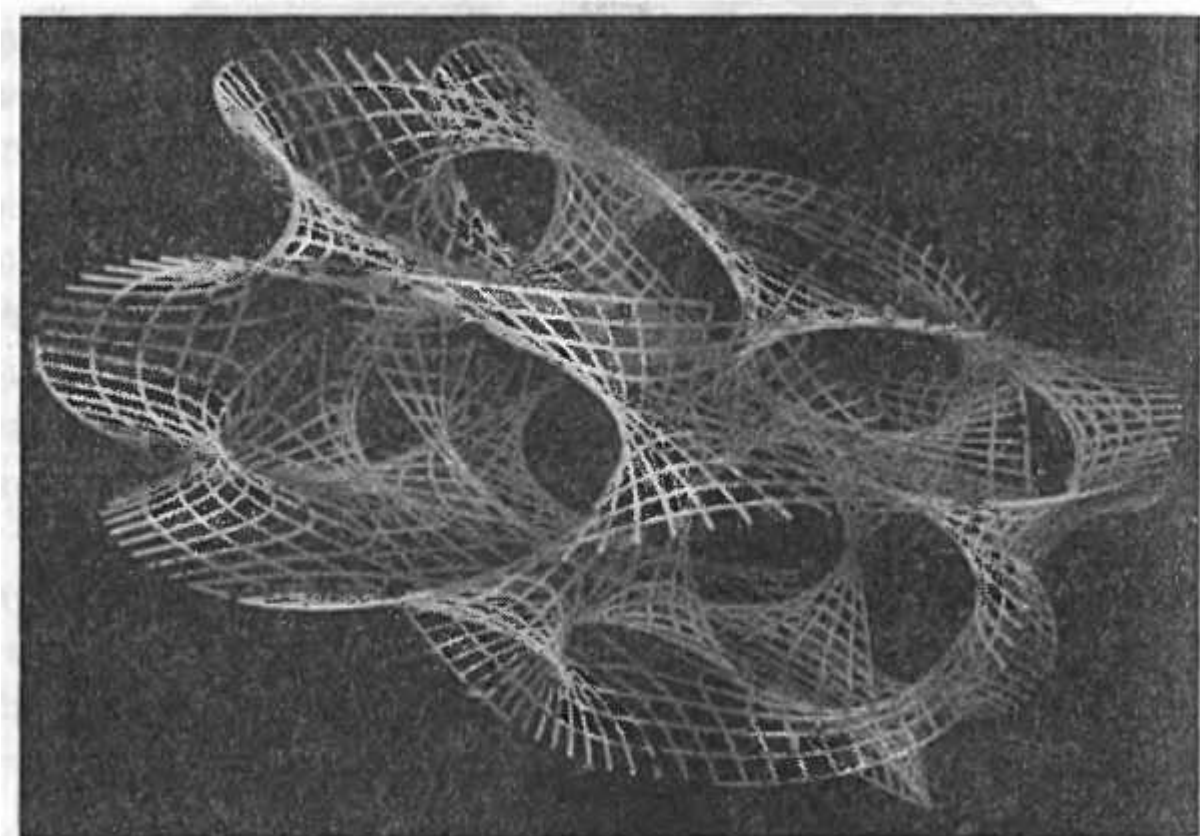
или даже причудливое пространство, называемое бутылкой Клейна.



Изображение двух дополнительных измерений не составляет больших проблем (мы только что сделали это), но с ростом числа измерений визуализировать их становится все труднее и труднее. К тому моменту когда мы достигнем шести дополнительных измерений, необходимых для теории струн, визуализация без обращения к математике становится безнадежным делом. Особые геометрические пространства, которые струнные теоретики используют для компактификации шести дополнительных измерений, называются *многообразиями Калаби – Яу*. Их насчитываются миллионы, и среди них нет двух одинаковых. Многообразия Калаби – Яу исключительно сложны, с сотнями шестимерных дырок от бубликов и прочими невообразимыми кренделями. Тем не менее математики создают их изображения, нарезая на слои меньшей размерности, подобно диаграммам вложения<sup>135</sup>. Вот изображение двумерного среза типичного пространства Калаби – Яу.

---

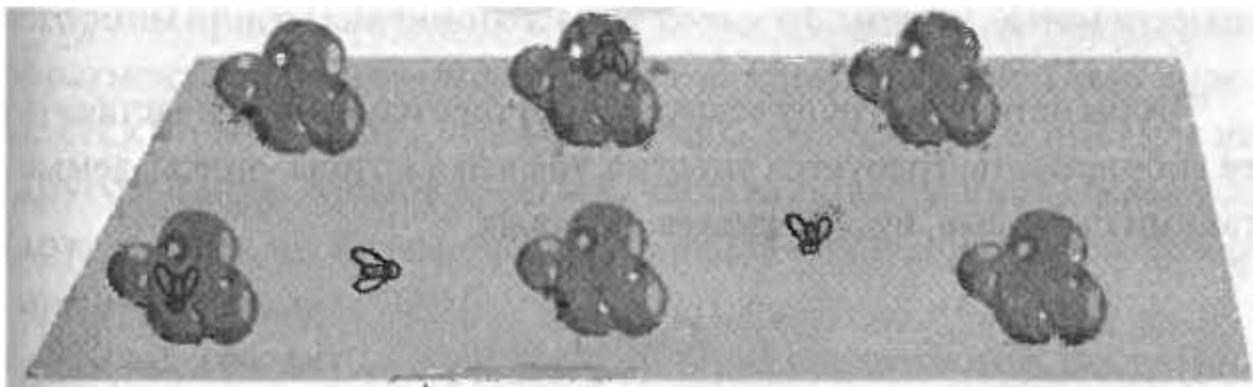
135 См. главу 3. – Примеч. перев.



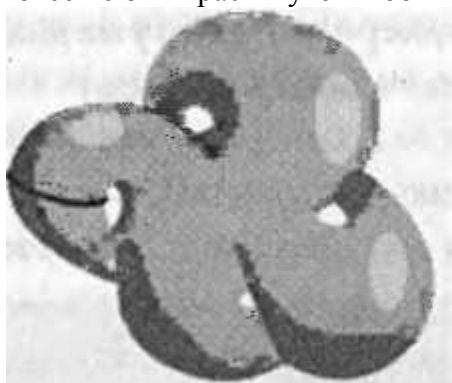
Я попробую дать вам некоторое представление о том, на что похоже обычное пространство, когда к каждой его точке добавлено шестимерное многообразие Калаби – Яу. Сначала посмотрите на обычные измерения, в которых могут двигаться такие большие объекты, как люди. (Я нарисовал его двумерным, но вы уже должны научиться достраивать третье измерение в воображении.)



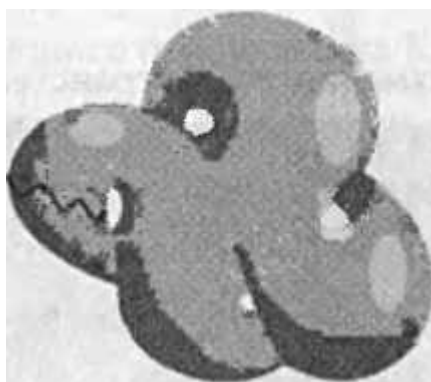
В каждой точке трехмерного пространства имеется также шесть других свернутых измерений, в которых могут перемещаться очень маленькие объекты. По необходимости я рисую пространства Калаби – Яу отдельно друг от друга, но вы должны представлять себе их в каждой точке обычного пространства.



Теперь вернемся к струнам. Обычный жгут от эспандера можно растягивать в разных направлениях, например вдоль оси восток – запад, или север – юг, или верх – низ. Его можно растягивать под разными углами, скажем, на север-северо-запад с 10-градусным наклоном к горизонту. Но если есть дополнительные измерения, число возможностей многократно возрастает. В частности, струны Могут растягиваться вдоль свернутых измерений. Замкнутая струна Может опоясывать пространство Калаби – Яу один или несколько Раз, но при этом вовсе не быть растянутой в обычных пространственных направлениях.



Позвольте мне еще немного усложнить ситуацию. Струна может опоясывать свернутое пространство и в то же самое время извиваться, подобно змее, так что изгибы прокатываются по струне.



Чтобы натянуть струну вокруг свернутого измерения и заставить ее вибрировать, требуется энергия, так что частицы, описываемые такими струнами, будут тяжелее обычных.

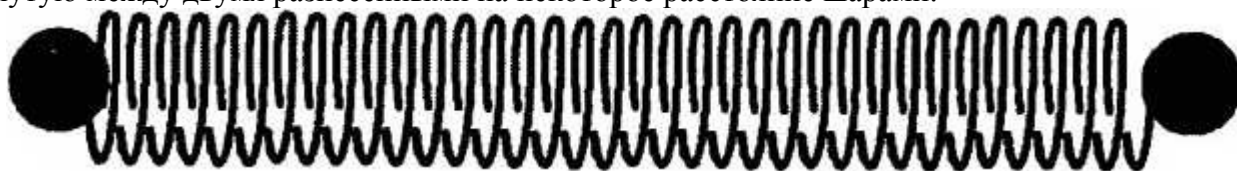
## Силы

Наша Вселенная – это мир не только пространства, времени и частиц, но также и сил. Электрические силы, действующие между заряженными частицами, могут перемещать кусочки бумаги и пылинки (скажем, за счет статического электричества), но более важно, что эти силы удерживают электроны на их орбитах вокруг атомных ядер. Гравитационные силы, действующие между Землей и Солнцем, удерживают на орбите Землю.

Все силы в конечном счете связаны с микроскопическими силами, действующими

между отдельными частицами. Но откуда берутся эти межчастичные силы? Для Ньютона универсальная сила притяжения, действующая между массами, была просто физическим фактом – в действительности он смог ее только описать, но не объяснить. Однако в течение девятнадцатого и двадцатого столетий такие физики, как Майкл Фарадей, Джеймс Клерк Максвелл, Альберт Эйнштейн и Ричард Фейнман, сделали блестящие открытия, объяснявшие силы через стоящие за ними более фундаментальные концепции.

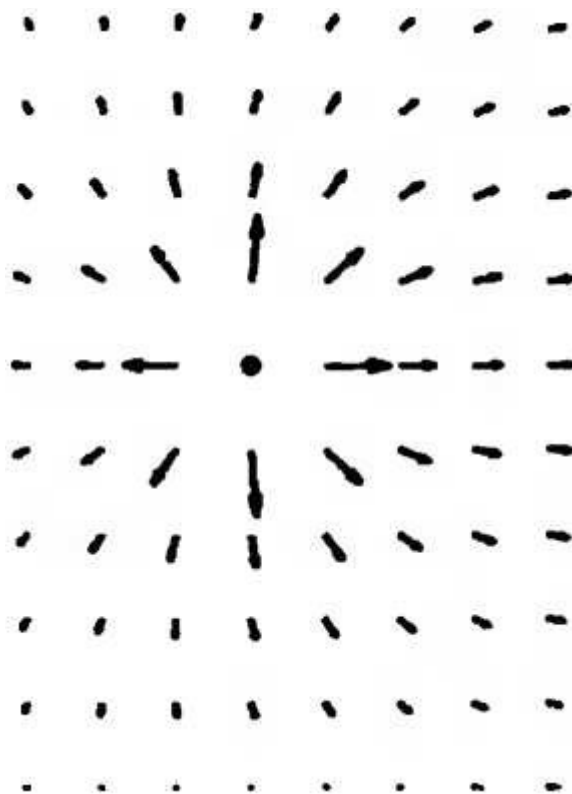
Согласно Фарадею и Максвеллу, электрические заряды притягиваются и отталкиваются не непосредственно; в пространстве между зарядами существует посредник, передающий взаимодействие. Представьте себе «Слинки» – эту ленивую игрушечную пружинку, – натянутую между двумя разнесенными на некоторое расстояние шарами.



Каждый из шаров подвергается воздействию силы только со стороны присоединенного к нему конца «Слинки». Затем каждый фрагмент «Слинки» воздействует на своих соседей. Сила передается по «Слинки», пока не передаст натяжение к объекту на другом конце. Может казаться, что два объекта притягиваются друг к другу, но это иллюзия, созданная посредничающей между ними «Слинки».

Когда доходит до электрически заряженных частиц, посредничающие агенты – это заполняющие пространство между ними электрическое и магнитное поля. Хотя они невидимы, эти поля совершенно реальны: это непрерывные невидимые возмущения пространства, которые переносят взаимодействия между зарядами.

Эйнштейн в своей теории гравитации пошел еще глубже. Массы искривляют геометрию пространства-времени в своей окрестности и благодаря этому искажают траектории других масс. Искажения геометрии тоже можно рассматривать как поля.



*Электрическое поле положительного заряда*



*Магнитное поле стержневого магнита*

Могло показаться, что на этом все кончится. Так и было, пока не появился Ричард Фейнман с квантовой теорией сил, которая на первый взгляд была совершенно не похожа на теории поля Фарадея – Максвелла и Эйнштейна. Его теория начинается с представления о том, что электрически заряженные частицы могут испускать (бросать) и поглощать (ловить) фотоны. В этой идее еще не было ничего странного; давно уже было понято, что электроны испускают рентгеновские лучи, когда внезапно останавливаются у препятствия в рентгеновской трубке. Обратный процесс поглощения был описан Эйнштейном в его статье, где он впервые ввел идею световых квантов.

Фейнман изображал заряженные частицы в виде жонглеров фотонами, постоянно испускающими и поглощающими их и создающими в пространстве, окружающем заряд, огромное число фотонов. Отдельный покоящийся электрон – это идеальный жонглер, никогда не теряющий то, что подбросил. Но, как и в случае с жонглером-человеком в железнодорожном вагоне, неожиданное ускорение может все нарушить. Заряд может сместиться со своей позиции, из-за чего окажется не в том месте, чтобы поглотить фотон. Этот упущенный фотон улетает прочь и становится частью излучаемого света.

Вернемся в железнодорожный вагон, где в поезд вместе с жонглером садится его партнер, и они вдвоем решают попрактиковаться в командной жонглерской работе. В основном каждый жонглер ловит свои собственные броски, но при сближении время от времени каждый из них может ловить шары, брошенные другим. То же самое происходит, когда сближаются два электрических заряда. Окружающие их облака фотонов смешиваются, и один заряд может поглощать фотоны, испущенные другим. Этот процесс называется *обменом фотонами*.

В результате обмена фотонами возникают силы, с которыми заряды действуют друг на друга. На сложный вопрос о том, будет ли сила притягивающей или отталкивающей, можно ответить лишь с учетом всех тонкостей квантовой механики. Достаточно сказать, что, когда Фейнман выполнял свои вычисления, он обнаружил то же, что Фарадей и Максвелл: одинаковые заряды отталкиваются, а противоположные – притягиваются.

Интересно сравнить жонглерские навыки электронов и жонглеров-людей. Человек, по-видимому, может бросать и ловить предметы несколько раз в секунду, однако электрон испускает и поглощает фотоны примерно  $10^{19}$  раз в секунду.

По теории Фейнмана, жонглерами являются все материальные частицы, а не только электрические заряды. Любая форма материи испускает и поглощает гравитоны – кванты гравитационного поля. Земля и Солнце окружены облаками гравитонов, которые перемешиваются и участвуют в обмене. А в результате гравитационная сила удерживает Землю на орбите.

Сколько же часто отдельный электрон испускает гравитон? Ответ довольно неожиданный: совсем нечасто. В среднем время, необходимое электрону, чтобы испустить гравитон, превышает весь возраст Вселенной. Вот почему, по фейнмановской теории, гравитационное взаимодействие между элементарными частицами настолько слабее электрического.



Так какая же теория верна: полевая Фарадея – Максвелла – Эйнштейна или фейнмановская теория частиц-жонглеров? Они кажутся слишком разными, чтобы быть правильными одновременно.

И тем не менее обе они верны. Все дело в квантовой дополнительности между волнами и частицами, о которой я рассказывал в главе 4. Волны – это полевая концепция: световые волны – это не что иное, как быстрые колебания электромагнитных полей. Но свет – это частицы, фотоны. Так что картины с фейнмановскими частицами и максвелловскими полями – просто еще один пример квантовой дополнительности. Квантовое поле, порожденное облаком частиц, которыми жонглируют, называется *конденсатом*.

### Струнная шутка

Позвольте мне рассказать свежий анекдот, который стал популярен среди струнных теоретиков.

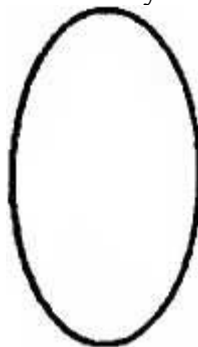
Пара струн заходит в бар и заказывают по пиву. Бармен говорит одной из них: «Давно тебя не видел. Как дела?» Затем поворачивается к другой струне и спрашивает: «Ты ведь здесь впервые? Ты так же замкнут, как и твоя подруга?» И получает в ответ: «Нет, я чертов узел».

М-да... А чего вы ждали от струнного теоретика?

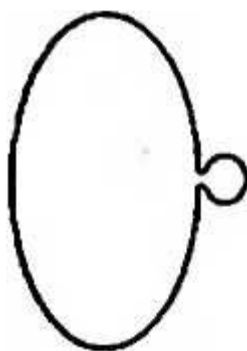
Шутка на этом заканчивается, но история продолжается. Бармен чувствует легкое опьянение. Возможно, это результат лишней рюмки, тайно принятой за стойкой, или, быть может, мерцание квантовых флуктуаций зашедшей пары немного вскружило ему голову. Но нет, это что-то большее, чем стандартная дрожь; струны, похоже, движутся очень странно, как будто какая-то скрытая сила тянет и соединяет их между собой. Каждый раз, когда одна струна делает неожиданное движение, мгновением позже другая срывается со своего сиденья, и наоборот. Но внешне их, кажется, ничто не соединяет.

Удивленный этим загадочным поведением бармен внимательно всматривается в пространство между ними, пытаясь разобраться. Поначалу он может разглядеть только слабое мерцание, дрожащее искажение геометрии, но где-то через минуту он замечает, что маленькие кусочки струн постоянно отрываются от тел двух клиентов, формируя между ними конденсат. Именно этот конденсат притягивает их и заставляет резко двигаться.

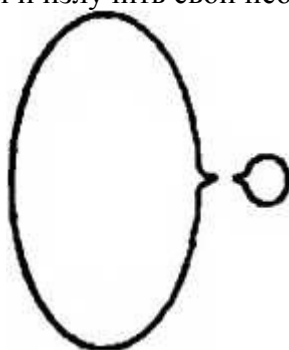
Струны испускают и поглощают другие струны. Рассмотрим случай замкнутых струн. В дополнение к обычной дрожи нулевых колебаний квантовая струна может разделиться на две струны. Я опишу этот процесс в главе 21, а пока нам хватит простой картинки, иллюстрирующей эту идею. Вот изображение замкнутой струны.



Струна извивается и дрожит, пока на ней не появляется небольшое выступающее ушко.

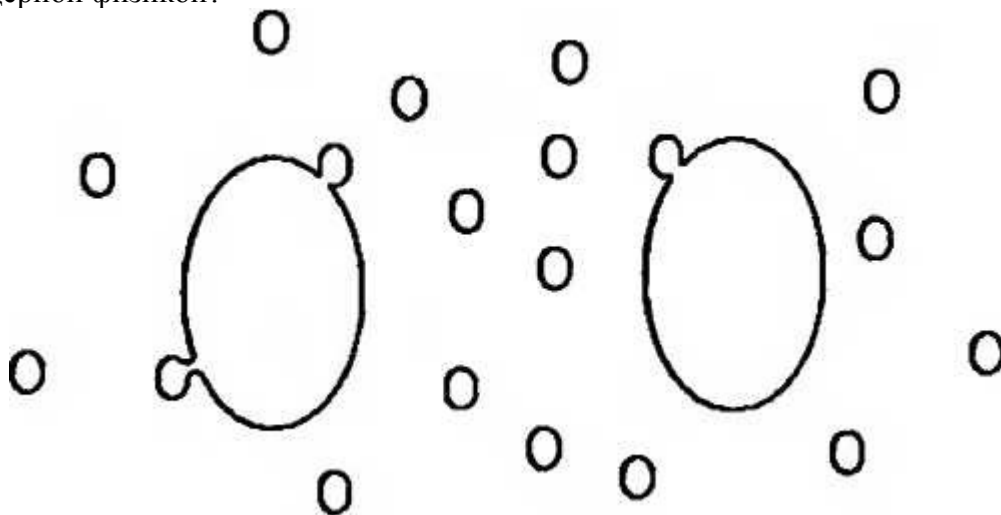


Теперь струна готова разделить и излучить свой небольшой кусочек.



Противоположное тоже возможно: маленькая струна, встретив Другую, большую струну, может быть поглощена в ходе обратного процесса.

Небольшие замкнутые струнные кольца – это гравитоны, роящиеся вокруг более крупных струн и образующие конденсат, который очень напоминает по своим проявлениям гравитационное поле. Гравитоны – кванты гравитационного поля – похожи по строению на глюболы ядерной физики, но в  $10^{19}$  раз меньше. Интересно, как все это связано (если связано) с ядерной физикой?



Некоторых специалистов из других областей физики раздражает энтузиазм струнных теоретиков, которые уверяют: «Прекрасная, элегантная, непротиворечивая, устойчивая математика теории струн приводит к удивительным, невероятным, фантастическим фактам, касающимся сил гравитации, а значит, она должна быть верной». Однако для скептически настроенного стороннего наблюдателя подобные славословия, даже если они оправданы, никак не повышают убедительность аргументов. Если теория струн дает верную картину реальности, то подтверждать это надо убедительными экспериментальными предсказаниями и эмпирическими проверками, а не восхвалениями. Скептики правы, но правы и струнные теоретики. Настоящая проблема заключается в чрезвычайной трудности экспериментирования с объектами размером, в миллиард миллиардов раз меньшим протона. Но будет теория струн в итоге подтверждена экспериментальными данными или нет, в настоящее время это надежная математическая лаборатория, в которой проверяются

различные идеи относительно того, как гравитация согласуется с квантовой механикой.

Поскольку в теории струн появляется гравитация, можно ожидать, что при сближении достаточно массивных струн должна образовываться черная дыра. Таким образом, теория струн – это концепция, в рамках которой можно исследовать хокинговский парадокс. Если Хокинг прав в том, что черные дыры неизбежно приводят к потере информации, тогда математика теории струн должна это подтвердить. Если Хокинг ошибается, теория струн должна показать, как может информация выходить из черной дыры.

В начале 1990-х годов мы с Герардом 'т Хоофтом (если я правильно помню) дважды встречались в Стэнфорде и один раз в Утрехте, и в этот период 'т Хоофт в целом не доверял теории струн, несмотря на то что сам написал одну из основополагающих статей, объясняющих взаимосвязь теории струн и квантовой теории поля. Я никогда точно не понимал, что именно ему не нравилось, но мне кажется, что отчасти это связано с совершенно безальтернативным доминированием струнных теоретиков в истеблишменте американской теоретической физики начиная с 1985 года. Вечно идущий против общего тренда 'т Хоофт верил (как и я) в силу разнообразия. Чем большим числом разных способов вы подходите к вопросу, чем больше разных стилей мышления применяется, тем выше шансы решить по-настоящему сложные научные проблемы.

Но у скептицизма Герарда были и другие причины помимо того, что он не переваривал захвата физики слишком узкой группировкой. Насколько я знаю, он признавал ценность теории струн, но был категорически против утверждений о том, что она является «окончательной теорией». Теория струн была открыта случайно, и ее развитие шло рывками. У нас никогда не было исчерпывающего набора принципов или небольшого набора основных уравнений. Даже сегодня она состоит из паутины взаимосвязанных математических фактов, которые удивительно хорошо соответствуют друг другу, но эти факты не складываются в некий компактный набор принципов, как в ньютоновской теории гравитации или в квантовой механике. Вместо этого имеется сеть элементов, которые хорошо подогнаны друг к другу, как очень сложно нарезанный пазл, общая картина которого просматривается лишь в туманной перспективе. Напомню высказывание 'т Хоофта, которое я приводил в начале главы: «Представьте, что я даю вам кресло, поясняя, что ножек у него пока нет, а сиденье, спинка и подлокотники, возможно, скоро будут доставлены; что бы я вам ни вручил, могу ли я называть это креслом?»

Теория струн действительно пока не является вполне сложившейся системой, но на сегодня это безоговорочно лучший математический ориентир на пути к окончательным принципам квантовой гравитации. И я должен добавить, что она оказалась самым мощным оружием в Битве при черной дыре, особенно в деле подтверждения ожиданий самого Герарда.

В следующих трех главах мы увидим, как теория струн помогла объяснить и подтвердить дополнительную черных дыр, происхождение их энтропии, а также голографический принцип.

## 20

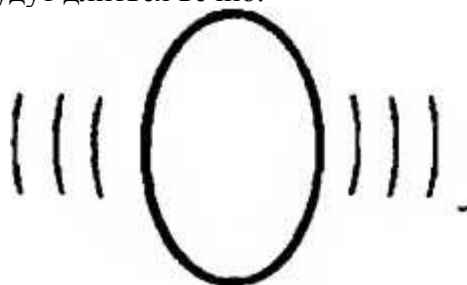
### **Аэроплан Алисы, или Последний видимый пропеллер**

Для большинства физиков, особенно тех, кто специализируется на общей теории относительности, дополнительность черных дыр кажется слишком сумасшедшей, чтобы быть правильной. Не то чтобы они некомфортно чувствуют себя с квантовой неопределенностью – на планковском масштабе она всеми признается. Однако дополнительность черных дыр предлагает нечто куда более радикальное. В зависимости от состояния движения наблюдателя атом может оставаться крошечным микроскопическим объектом или разрастись до размеров всего горизонта огромной черной дыры. Такую степень неоднозначности было слишком трудно принять. Она кажется странной даже мне.

Я размышлял об этом странном поведении в течение нескольких недель после

конференции в Санта-Барбаре в 1993 году, и постепенно оно стало напоминать мне нечто виденное мною раньше. За двадцать четыре года до того, в раннем детстве теории струн, меня беспокоило странное свойство крошечных струноподобных объектов – «резиновых лент», как я тогда их называл, – соответствовавших элементарным частицам.

Согласно теории струн, все в мире состоит из одномерных эластичных струн энергии, которые могут натягиваться, дрожать и вращаться. Будем думать о частицах как о миниатюрных резиновых лентах размером ненамного больше планковского масштаба. Такая лента, если ее «ущипнуть», начинает дрожать и вибрировать, и если между ее частями нет трения, эти дрожь и вибрация будут длиться вечно.



Добавление струне энергии заставляет ее колебаться еще сильнее, вплоть до того, что она начинает напоминать огромный, бешено флуктуирующий клубок шерсти. Эти колебания являются *тепловыми флуктуациями*, добавляющими струне реальную энергию.



Но не будем забывать и о квантовой дрожи. Даже если вся энергия от системы отведена и она находится в основном состоянии, дрожь никогда полностью не прекращается. Это сложное движение элементарной частицы – вещь довольно нетривиальная, однако с помощью аналогии я могу дать вам о нем некоторое представление. Но сначала я хочу рассказать о собачьих свистках и самолетных пропеллерах.

По каким-то причинам собаки слышат высокочастотные звуки, не воспринимаемые людьми. Возможно, барабанная перепонка у собак легче и способна к более высокочастотным вибрациям. Так что если вам нужно позвать свою собаку, но вы не хотите мешать соседям, то можно использовать собачий свисток. Он издает звук столь высокой частоты, что слуховая система человека его не воспринимает.

Теперь представьте себе Алису, ныряющую в черную дыру и дующую в свой собачий свисток, чтобы подать сигнал Рексу, которого она оставила на попечение Боба<sup>136</sup>. Сначала Боб ничего не слышит; частота слишком высока для его уха. Но вспомните, что происходит с сигналом, который испускается вблизи горизонта. Для Боба Алиса и все ее функции кажутся замедленными. Это относится и к высокочастотному звуку ее свистка. Хотя сначала звук находится вне пределов слышимости для Боба, по мере приближения Алисы к горизонту свисток становится для него различим. Допустим, Алисин собачий свисток испускает широкий диапазон частот, выходящий даже за пределы чувствительности Рекса. Что

---

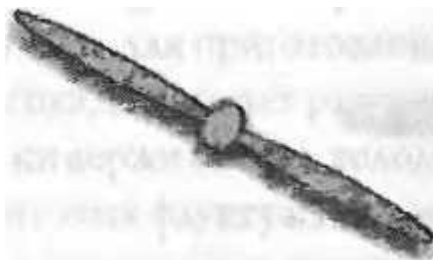
<sup>136</sup> Строго говоря, звукие может распространяться в пустоте. Вы можете либо вернуться к аналогии со сточной дырой, либо заменить Алисин свисток ультрафиолетовым фонариком.

услышит Боб? Сначала ничего, но вскоре он сможет расслышать самые низкие частоты, испускаемые свистком. Затем станут слышимы еще более высокие звуки. Наконец, Боб услышит всю симфонию звуков, испускаемых Алисиным свистком. Держите в уме эту картину, пока я буду рассказывать о самолетных пропеллерах.

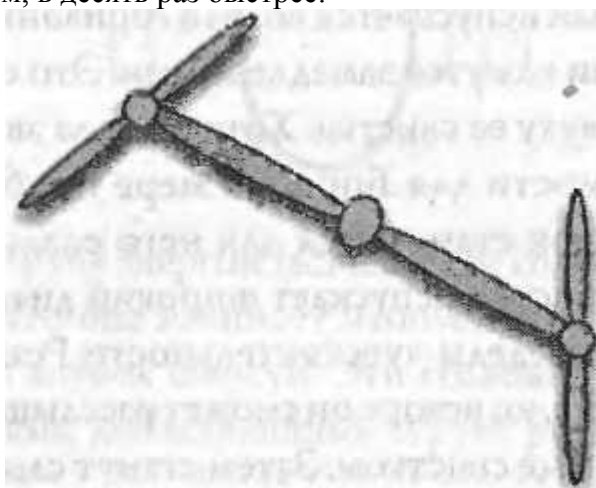
Скорее всего, вам доводилось наблюдать, как замедляется и останавливается пропеллер самолета. Сначала его лопасти неразличимы, и вы видите только центральную ступицу.



Но когда пропеллер замедляется и частота его вращения снижается примерно до тридцати оборотов в секунду, лопасти становятся видны и вся конструкция начинает выглядеть крупнее.

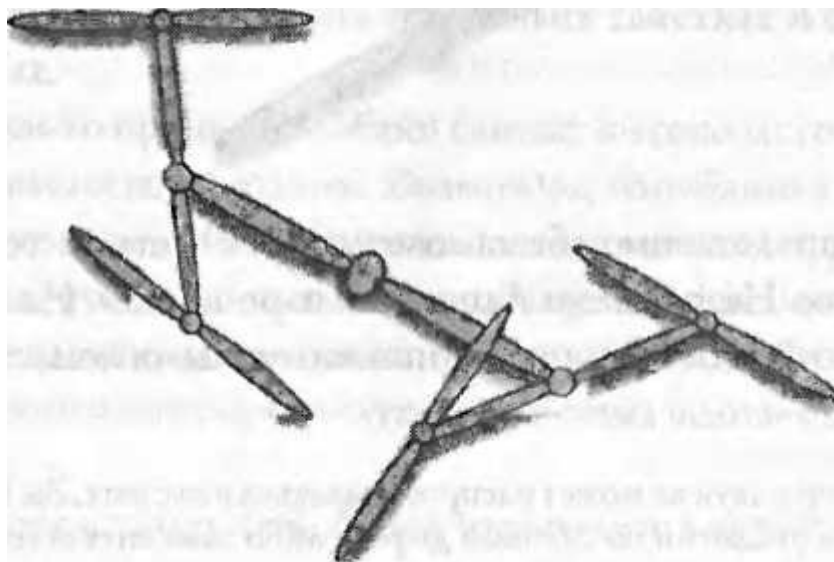


Теперь представим себе самолет нового типа с «составным» пропеллером. Назовем его Алисиным аэропланом. На концах его лопастей находятся ступицы с дополнительными лопастями «второго уровня». Пропеллеры второго уровня крутятся значительно быстрее основных лопастей – скажем, в десять раз быстрее.



Когда становятся видны лопасти первого уровня, вторичные все еще остаются невидимыми. Но по мере замедления пропеллера становятся видны и они. И вновь видимые размеры конструкции увеличиваются. Лопасти третьего уровня присоединены к концам вторичных лопастей. Они вращаются еще в десять раз быстрее. Понадобится дальнейшее замедление, но в соответствующий момент возникнет впечатление, что составной пропеллер занял еще большую площадь.

Алисин аэроплан не останавливается на трех уровнях. Его пропеллер наращивается до бесконечности, и по мере того как он замедляется, его видимые размеры становятся все больше и больше, пока не вырастают до совершенно невероятных размеров. Но пока пропеллер полностью не остановится, видно лишь конечное число уровней.



Следующим шагом, если вы вдруг еще не догадались, будет полет Алисы на своем аэроплане прямо в черную дыру. Что увидит Боб? Из того, что я вам рассказал, особенно о черных дырах и машинах времени, вы, вероятно, сумеете определить это самостоятельно. С течением времени пропеллеры будут выглядеть замедляющимися. Сначала появятся первые лопасти, а затем видимой будет становиться все большая часть конструкции, все большее число ее уровней, и, наконец, она разрастется до размеров всего горизонта.

Это то, что видит Боб. Но что увидит Алиса, движущаяся вместе с пропеллером? Ничего необычного. Когда она дует в свой собачий свисток, его звук по-прежнему ей не слышен. Когда она смотрит на пропеллер, тот по-прежнему крутится слишком быстро, чтобы ее глаза или камера могли его заметить. Она видит то же, что и мы с вами, глядя на быстро вращающийся пропеллер, – ступицу, и больше ничего.

Может показаться, что в этой картине есть какая-то ошибка. Алиса может быть неспособна увидеть быстро вращающиеся пропеллеры, но сказать, что они совершенно необнаружимы для нее, – это перебор. В конце концов, они запросто могут раскромсать ее на кусочки. Это действительно так для настоящих пропеллеров, но движения, которые я описываю, более изощренны. Вспомните, как в главах 4 и 9 я объяснял, что в природе существует два типа дрожи: квантовая и тепловая. Тепловая дрожь опасна; она может быть весьма болезненной, когда передает энергию вашим нервным окончаниям, и может послужить для приготовления стейка. Если температура достаточно высока, она может разрывать на части молекулы и атомы. Но как долго ни держи стейк в холодном и пустом вакууме, под воздействием квантовых флуктуаций электромагнитного поля он все равно останется совершенно сырым.

В 1970-х годах такие теоретики, изучавшие черные дыры, как Бекенштейн, Хокинг и особенно Уильям Унру, показали, что вблизи горизонта черной дыры тепловая и квантовая дрожь причудливым образом смешиваются. Дрожь, которая кажется невинными квантовыми флуктуациями тому, кто падает сквозь горизонт, превращается во все более опасные тепловые флуктуации для всего, что продолжает удерживаться снаружи от черной дыры. Всё это подобно тому, как если бы невидимые движения Алисиных пропеллеров (невидимые для Алисы) были квантовой дрожью, но, замедляясь в системе отсчета Боба, они превращались бы в тепловую дрожь. Безвредные квантовые движения, которых Алиса не может ощутить, были бы чрезвычайно опасны для Боба, если бы он решил зависнуть над самым горизонтом.

Вы, вероятно, уже связали все это с дополнительностью черных дыр. На самом деле здесь имеется поразительное сходство с тем, что я описывал в главе 15, рассказывая об атомах, падающих в черную дыру. Поскольку это было пять глав назад, я кратко напомним суть дела.

Представьте, что Алиса, падая к горизонту, смотрит на атом, падающий вслед за ней. Атом выглядит совершенно обычно, даже когда он пересекает горизонт. Его электроны

продолжают обращаться вокруг ядра в обычном темпе, и он выглядит не крупнее любого другого атома – примерно в одну миллиардную размера этой страницы.

Что же до Боба, то он видит, как атом замедляется с приближением к горизонту и, в то же время, тепловые движения разбивают его на части и размазывают по все расширяющейся площади. Атом напоминает миниатюрный Алисин аэроплан.

Хочу ли я сказать, что в атомах есть пропеллеры, у которых есть пропеллеры, у которых есть пропеллеры, и так до бесконечности? Удивительным образом это почти в точности то, что я имею в виду. Элементарные частицы обычно представляются очень маленькими объектами. Центральная ступица Алисиного составного пропеллера тоже выглядит небольшой, однако вся конструкция, включающая все структурные уровни, огромна или даже бесконечна. Можем ли мы ошибаться, утверждая, что они малы? Что говорят об этом эксперименты?

Размышляя об экспериментальных наблюдениях частиц, полезно представлять каждый эксперимент как процесс, подобный фотографированию движущегося объекта. Способность фиксировать быстрые движения зависит от того, насколько проворно камера выполняет запись изображения. Скорость срабатывания затвора – параметр, определяющий временное разрешение. Очевидно, что скорость затвора играет центральную роль при фотографировании Алисиного составного пропеллера. Медленная камера зафиксирует только центральную ступицу. Более быстрая сможет ухватить более высокочастотные элементы. Но даже самая скоростная камера сможет заснять лишь определенную часть составной структуры, если только не фотографируется самолет, падающий в черную дыру.

В экспериментах с элементарными частицами роль скорости затвора играет энергия столкновения частиц: чем она выше, тем быстрее затвор. К сожалению, скорость затвора серьезно ограничена возможностями ускорения частиц до очень высоких энергий. В идеале хотелось бы различать движения, происходящие на интервалах короче планковского времени. Для этого потребовалось бы разгонять частицы до энергий, превышающих планковскую массу, то есть принцип прост, но его практическая реализация невозможна.

Пора сделать паузу и рассмотреть невероятные трудности, с которыми столкнулась современная физика. Для наблюдения самых малых объектов и самых быстрых движений физики на протяжении двадцатого века применяли все более и более крупные ускорители. Первые из них были простыми настольными установками, способные зондировать строение атомов. Ядра потребовали более крупных машин размером с большие здания. Кварки были открыты лишь тогда, когда ускорители выросли до размеров в несколько километров. Крупнейший сегодняшний ускоритель, Большой адронный коллайдер в Женеве, Швейцария, имеет окружность почти тридцать километров, но все равно слишком мал для ускорения частиц до планковской массы. Насколько большой нужен ускоритель, чтобы на нем можно было изучать движения планковской частоты? Сказать, что ответ обескураживает, – это ничего не сказать; для разгона частицы до планковской массы ускоритель должен иметь размер не меньше нашей Галактики.

Говоря упрощенно, наблюдение планковских движений с помощью современной технологии сравнимо с фотографированием вращающегося самолетного пропеллера камерой, затвор которой остается открытым около десяти миллионов лет. Неудивительно, что элементарные частицы выглядят очень маленькими, поскольку все, что мы можем увидеть, – это ступица.

Раз эксперименты не позволяют нам убедиться, что частицы являются раскидистыми высокочастотными вибрирующими структурами, нам остается лишь обращаться к лучшим имеющимся теориям. Во второй половине двадцатого века самой мощной математической основой для изучения элементарных частиц была квантовая теория поля. Эта великолепная теория первым делом постулирует: частицы столь малы, что их можно считать точками в пространстве. Но вскоре эта картина разрушается. Частицы быстро окружают себя другими частицами, которые появляются и исчезают в умопомрачительном темпе. Эти новые пришельцы-ушельцы сами окружены еще более быстро появляющимися и исчезающими

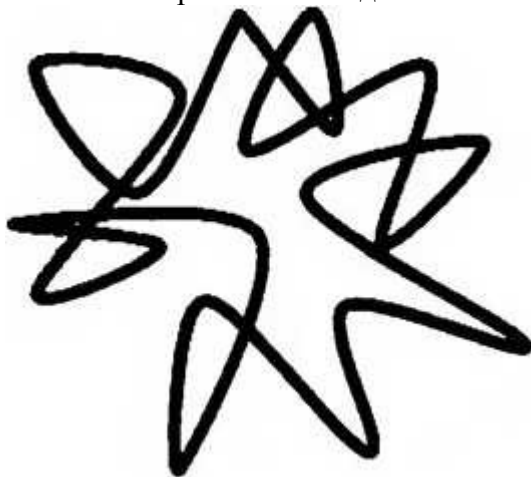
частицами. Фотографирование со все более короткой выдержкой открывало бы нам внутри частиц все новые и новые структуры – все быстрее и быстрее появляющиеся и исчезающие частицы. Медленная камера видит молекулу как туманное бесструктурное пятнышко. Она проявляется как совокупность атомов, только если скорость затвора достаточно велика, чтобы поймать движения атомов. История повторяется на атомном уровне. Размазанный электрический заряд вокруг ядра требует еще более быстрого эксперимента, чтобы разрешить его на электроны. Ядра разрешаются на протоны и нейтроны, которые состоят из кварков и так далее.

Но эти все более быстрые фотографии не показывают главной особенности, которую мы ищем: расширения структуры, которая занимает все больше и больше пространства. Вместо этого они показывают все меньшего и меньшего размера частицы, образующие нечто вроде русской матрешки. Для объяснения того, как ведут себя частицы вблизи горизонтов, это нам не подходит.

Теория струн куда более многообещающая. То, что она говорит, настолько контринтуитивно, что физики много лет не знают, что с этим делать. Элементарные частицы, описываемые теорией струн, – предположительно, крошечные колечки из струн – как раз похожи на составные пропеллеры. Возьмем для начала медленный затвор. Элементарная частица выглядит почти как точка; будем считать, что это ступица. Теперь ускорим затвор, чтобы он оставался открытым чуть дольше планковского времени. На снимке становится видно, что частица – это струна.



Ускорим затвор еще сильнее. Теперь вы видите, что каждый участок струны флуктуирует и вибрирует, так что новая картинка выглядит более запутанной и растянутой.



Но не будем на этом останавливаться, повторим процесс. Каждая маленькая петелька, каждый изгиб струны разрешается на еще быстрее флуктуирующие петли и завитки.





Что видит Боб, когда наблюдает за струноподобной частицей, падающей к горизонту? Сначала колебательные движения слишком быстры, чтобы их заметить, и все, что он видит, – это крошечный ступицеподобный центр. Но вскоре проявляется странная природа времени вблизи горизонта, и движения струны начинают казаться все более медленными. Постепенно Боб видит все большую часть колеблющейся структуры, точно так же, как при наблюдении Алисиного составного пропеллера. С течением времени становятся видны все более быстрые колебания, а струна кажется растущей и распространяющейся по всему горизонту черной дыры.

Но что будет, если мы падаем вместе с частицей? Тогда время ведет себя нормально. Высокочастотные флуктуации сохраняют свою высокую частоту, далеко выходящую за пределы возможностей нашей медленной камеры. Нахождение вблизи горизонта не дает нам никаких преимуществ. Как и в случае с Алисиным аэропланом, мы можем видеть только крошечную ступицу.

Теория струн и квантовая теория поля имеют то общее свойство, что вид предметов в них меняется при изменении скорости срабатывания затвора. Но в квантовой теории поля объекты не растут. Вместо этого они распадаются на все меньшего размера объекты – все меньшие русские матрешки. Но когда составляющие становятся меньше планковской длины, начинает работать совершенно иная схема – схема Алисиного аэроплана.

В аллегорической книге Рассела Хобана «Мышонок и его отец»<sup>137</sup> имеется забавная (непреднамеренная) метафора принципа работы квантовой теории поля. Однажды в ходе своего кошмарного приключения игрушечные заводные мыши – отец и сын – обнаруживают бесконечно удивительную банку «Собачьего корма Бонзо». На этикетке банки была изображена собака, держащая банку «Собачьего корма Бонзо», на этикетке которой собака держала банку «Собачьего корма Бонзо», на этикетке которой... И мыши все всматривались в эту цепочку, стараясь найти «последнюю видимую собаку», но так и не обрели уверенности, что смогли ее разглядеть.

---

<sup>137</sup> Рассел Хобан (1925–2011) – англо-американский писатель. В оригинале его роман называется «The Mouse and His Child». Он вышел в 1967 году и признан классикой жанра. Это детская книга о странствиях двух игрушечных заводных мышат и одновременно философская притча. Русский перевод: Хобан Рассел. Мышонок и его отец. – М.: Открытый мир, 2006. – Примеч. перев.

Объекты внутри объектов внутри объектов – это и есть суть квантовой теории поля. Однако, в отличие от этикетки «Бонзо», здесь объекты движутся, и чем они меньше, тем быстрее. Поэтому, для того чтобы их увидеть, нужны и более мощный микроскоп, и более быстрая камера. Но обратите внимание: ни разрешенная на части молекула, ни банка «Собачьего корма Бонзо» не становится больше по мере того, как в них открываются все новые и новые структуры.

Теория струн в этом отличается и работает, как Алисин аэроплан. По мере того как объекты замедляются, становится видно все больше и больше струнных «пропеллеров». Они занимают все больше пространства, так что вся сложная структура вырастает в размерах. Конечно, Алисин аэроплан – это аналогия, но она отражает многие математические свойства теории струн. Струны, как и любые объекты, подвержены квантовой дрожи, но особым образом. Подобно Алисиному аэроплану или симфонической версии собачьего свистка, струны вибрируют на множестве разных частот. Большинство этих вибраций слишком быстры для регистрации даже с использованием очень быстрых затворов на мощных ускорителях частиц.

Разбираясь со всем этим в 1993 году, я также начал понимать слепое пятно Хокинга. Для большинства физиков, обученных квантовой теории поля, представление о растущих частицах с неограниченной дрожащей структурой было совершенно чуждым. По иронии судьбы, единственным человеком, который стал догадываться о такой возможности, был величайший специалист в области квантовой теории поля, мой товарищ по оружию Герард 'т Хоофт. Хотя он излагал это по-своему – не на языке теории струн, – его работа также отражает ту идею, что объекты увеличиваются с ростом временного разрешения, с которым их исследуют. Напротив, хокинговские ухищрения включали этикетку от «Собачьего корма Бонзо», но не Алисин аэроплан. Для Стивена квантовая теория поля с ее точечными частицами была началом и концом микроскопической физики.

## 21

### Обсчет черных дыр

Однажды утром, когда я спустился к завтраку, моя жена Энн сказала, что я надел футболку задом наперед; V-образный вырез был у меня на спине. Позднее в тот же день, когда я вернулся домой с пробежки, она засмеялась и сказала: «Теперь она шиворот-навыворот». Это заставило меня задуматься: сколько существует способов надевания футболки? Энн насмешливо сказала: «Это одна из тех глупостей, о которых вы, физики, все время думаете». Просто для того, чтобы доказать мое умственное превосходство, я быстро объявил, что существует 24 способа надевания футболки. Можно просунуть голову в любое из четырех отверстий. Это оставляет три отверстия для торса. После просовывания головы и торса в выбранные два отверстия остается две возможности для левой руки. После того как и этот выбор сделан, для правой руки остается единственный вариант. Таким образом, имеется  $4 \times 3 \times 2 = 12$  вариантов. Но теперь можно вывернуть футболку наизнанку, что даст еще 12 возможностей, так что я гордо заявил, что решил задачу: существует 24 способа носить футболку. На Энн это не произвело впечатления. Она ответила: «Нет, их 25. Ты один забыл». Я озадаченно спросил: «И что же я упустил?» Бросив на меня полный надменности взгляд, она ответила: «Ты можешь ее скомкать и выбросить...» Ну, вы уловили мысль<sup>138</sup>.

Физики (и даже в большей мере математики) очень хорошо умеют подсчитывать разные вещи, в особенности возможности. Их подсчет – это ключевой момент в понимании энтропии, но в случае черных дыр – что именно мы подсчитываем? Уж конечно, не число способов, которыми черная дыра может носить футболку.

Почему подсчет возможностей для черных дыр так важен? В конце концов, Хокинг уже получил ответ, когда вычислил, что энтропия равна площади горизонта в планковских

---

<sup>138</sup> С момента, когда это было написано, Энн открыла по крайней мере еще способов ношения футболки.

единицах. Однако вопрос об энтропии черных дыр окружен колоссальным количеством недоразумений. Позвольте я напомним почему.

Стивен доказывал, что сама идея энтропии как скрытой информации – информации, которую вы могли бы получить, если бы узнали все детали, – должна нарушаться при включении в рассмотрение черных дыр. И он был далеко не одинок в этом мнении. Почти все эксперты по черным дырам пришли к тому же заключению: энтропия черных дыр является чем-то иным, не имеющим ничего общего с подсчетом квантовых состояний.

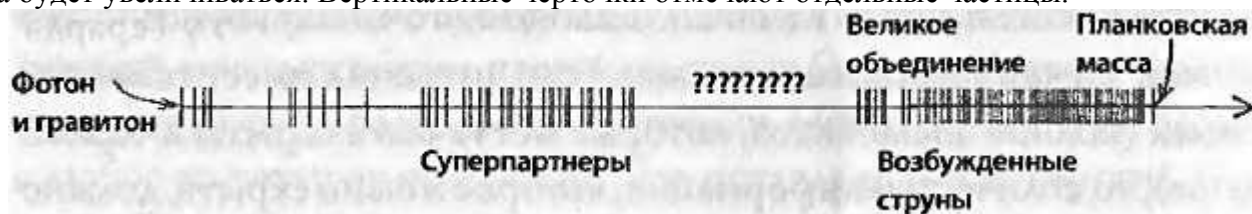
Почему Хокинг и другие релятивисты пришли к столь радикальному взгляду? Проблема была в убедительном аргументе Стивена о том, что можно кидать и кидать информацию в черную дыру – подобно запихиванию в вагончик бесконечного числа клоунов – без всякой утечки информации вовне. Если энтропия имеет обычный смысл (полное число битов, которые могут быть скрыты в черной дыре), то количество информации, которое можно скрыть, должно быть ограничено. Но если в черной дыре может пропасть бесконечное число битов, то из этого следует, что расчет энтропии черной дыры нельзя выполнить путем подсчета скрытых возможностей, а уже *это* означало бы необходимость революционного пересмотра оснований одного из старейших и надежнейших разделов физики – термодинамики. Отсюда вытекала острая необходимость знать, действительно ли энтропия черной дыры считается как число возможных конфигураций последней.

В этой главе я собираюсь рассказать о том, как струнные теоретики подошли к этому подсчету и как по ходу дела они получили надежное квантово-механическое обоснование энтропии Бекенштейна – Хокинга – обоснование, которое не оставляло места для потери информации. Это было крупное достижение, которое сильно продвинуло нас на пути подрыва утверждения Стивена о бесконечном количестве информации, которое способна проглотить черная дыра.

Но прежде позвольте мне объяснить, на какой точке зрения изначально стоял Герард 'т Хоофт.

### Догадка 'т Хоофта

Существует множество различных элементарных частиц, и, я думаю, надо честно признать, что физики не в полной мере понимают, чем одни из них отличаются от других. Но и не задаваясь глубокими вопросами, мы можем сделать эмпирический обзор всех частиц, существование которых либо уже подтверждено экспериментально, либо предсказывается из теоретических соображений. Один из способов все их отобразить состоит в нанесении их на ось и создании своего рода спектра элементарных частиц. Будем откладывать по горизонтальной оси массу (не в масштабе), поместив слева самые легкие объекты, а вправо масса будет увеличиваться. Вертикальные черточки отмечают отдельные частицы.



На нижнем (левом) краю располагаются все знакомые нам частицы, существование которых не вызывает сомнений. Две из них не имеют массы и движутся со скоростью света – фотон и гравитон. Затем идут различные типы нейтрино, электрон, некоторые кварки, мю-лептон, еще кварки, W-бозон, Z-бозон, бозон Хиггса и тау-лептон. Названия и подробности не имеют большого значения.

На несколько больших значениях массы располагается целая коллекция частиц, существование которых лишь предполагается, но физики в большинстве своем (включая и меня) считают, что они действительно есть<sup>139</sup>. По причинам, которые здесь для нас не имеют

139 Мы узнаем об этом в ближайшие годы, когда заработает в полную силу европейский ускоритель БАК

значения, эти гипотетические частицы называются *суперпартнерами*. За суперпартнерами находится большой интервал, который я пометил вопросительными знаками. Нельзя сказать, что мы знаем, что там ничего нет; у нас просто нет особых причин постулировать существование частиц в этой области. Также ни один из построенных или даже рассматриваемых ускорителей не обладает мощностью, достаточной для создания частиц с такой большой массой. Так что этот интервал есть *terra incognita*.

Затем с массами намного больше, чем у суперпартнеров, идут *частицы Великого объединения*. Они тоже гипотетические, но есть очень серьезные основания верить в их существование – по моему мнению, даже более серьезные, чем в случае суперпартнеров, – но их открытие в лучшем случае будет косвенным.

Самые неоднозначные частицы на моей диаграмме – это *возбужденные струны*. Согласно теории струн, это очень тяжелые вращающиеся и вибрирующие *возбужденные состояния* обычных частиц. Затем, на самом верху, мы помещаем *платовскую массу*. До начала 1990-х годов большинство физиков ожидало, что планковская масса завершает спектр масс элементарных частиц. Но у Герарда 'т Хоофта была иная точка зрения. Он доказывал, что наверняка должны быть объекты с большей массой. Планковская масса кажется огромной в масштабе масс электрона и кварков, но она сопоставима с массой пылинки. Очевидно, что существуют вещи и потяжелее, скажем, шар для боулинга, паровоз или рождественский пирог. Но выделяются среди таких тяжелых объектов те, которые имеют наименьшие размеры при данной массе.

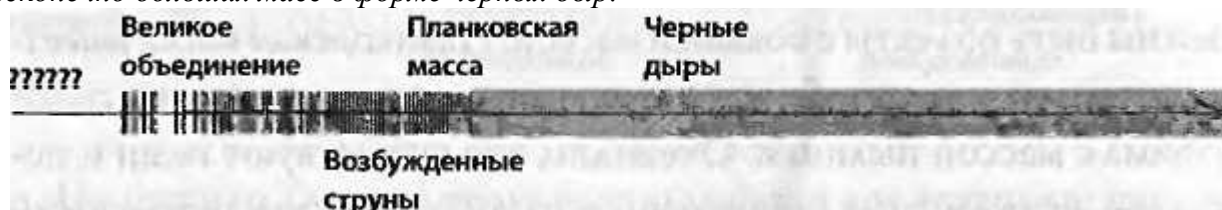
Возьмем обычный кирпич. Он весит около килограмма. Мы говорим «твердый, как кирпич». Но кирпичи, которые кажутся нам твердыми, – это почти полностью пустое пространство. Приложите к ним достаточно большое давление, и их можно сжать до значительно меньшего размера. Если давление в самом деле велико, кирпич может уменьшиться до размеров булавочной головки или даже вируса. И даже тогда это будет в основном пустое пространство.

Но есть предел. Я имею в виду не практический предел, связанный с ограничениями современной технологии. Я говорю о законах природы и фундаментальных физических принципах. Каков диаметр наименьшей области, которую может занимать объект массой в один килограмм? Сразу вспоминается планковский размер, но это неправильный ответ. Объект можно сжимать, пока он не станет черной дырой с массой в один килограмм<sup>140</sup>, но не дальше, – это самый компактный объект данной массы.

Какого же размера будет однокилограммовая черная дыра? Ответ, вероятно, окажется меньше, чем вы ожидаете. Шварцшильдовский радиус (радиус горизонта) такой черной дыры составляет около одного миллиона планковских длин. Может показаться, что это много, но в действительности это в триллион раз меньше одиночного протона. Такая черная дыра будет столь же мала, как элементарная частица, так почему нам не признать ее таковой?

'т Хоофт так и поступил. Или, по крайней мере, он сказал, что – нет важных проявлений, в которых такой объект фундаментально отличался бы от элементарной частицы.

*Спектр элементарных частиц не обрывается на платовской массе. Он продолжается до бесконечно больших масс в форме черных дыр.*



(Большой адронный коллайдер).

<sup>140</sup> Здесь есть техническая тонкость. Сжатие кирпича или другого объекта увеличивает его энергию, а поскольку  $E = mc^2$ , то увеличивается также и его масса. Но этот прирост можно компенсировать разными способами. Наша задача – получить наименьший возможный однокилограммовый объект.

т Хоофт также доказывал, что черные дыры не могут иметь произвольную массу: подобно обычным частицам, им доступен лишь определенный дискретный набор масс. Однако при массах больше планковской они распределены настолько плотно, что совершенно сливаются<sup>141</sup>.

Переход от обычных частиц (или возбужденных струн) к черным дырам не столь резкий, как я изобразил на рисунке. Скорее всего, спектр возбужденных струн переходит в спектр черных дыр без отчетливой границы вблизи планковской массы. Это было предположение 'т Хоофта, и, как мы увидим, есть убедительные причины в него верить.

### Обсчитывая струны и черные дыры

Алисин аэроплан – это метафора того, как внешний вид зависит от зрителя. Алиса, сидя в кокпите, не видит на горизонте ничего удивительного. Но если смотреть извне черной дыры, кажется, что у аэроплана становится все больше и больше пропеллеров, которые постепенно охватывают весь горизонт. Алисин аэроплан также служит метафорой того, как работает теория струн. Когда струна падает к горизонту, внешний наблюдатель будет видеть, как материализуется все больше и больше фрагментов струны, которые постепенно заполняют горизонт.

Наличие энтропии у черных дыр предполагает, что у них есть скрытая микроскопическая структура, подобно молекулам в ванне теплой воды. Но само по себе существование энтропии не дает никакого намека на природу «атомов горизонта», хотя и позволяет грубо оценить их количество.

В Алисином мире атомы горизонта – это пропеллеры. Возможно, и в самом деле существует теория квантовой гравитации, основанная на пропеллерах, но, я думаю, что на эту роль больше подходит теория струн, по крайней мере сегодня.

Идея о том, что струны имеют энтропию, возвращает нас к самым ранним дням теории струн. Подробности сильно математизированы, но общую идею понять легко. Начнем с простейшей струны, представляющей элементарную частицу определенной энергии. Для определенности пусть это будет фотон. Присутствие (или отсутствие) фотона – это один бит информации.

А теперь давайте что-нибудь сделаем с фотоном, предполагая, что он действительно является крошечной струной: встряхнем его, или ударим другой струной, или просто положим на горячую сковородку<sup>142</sup>. Подобно небольшому резиновому кольцу, он начнет вибрировать, вращаться и растягиваться. Если добавлено достаточно энергии, получается огромная запутанная мешанина – клубок шерсти, с которым поиграла кошка. Это не квантовая, а *тепловая дрожь*.

Этот клубок шерсти вскоре становится слишком сложным, чтобы описывать его во всех деталях, но о нем по-прежнему можно получить общую информацию. Полная длина нити может составлять сотню метров. Запутанное месиво может образовать шар диаметром в пару метров. Такого рода описание будет полезно, даже если нет других подробностей. Упущенные детали – и есть скрытая информация, которая придает энтропию шару из струны.

Энергия и энтропия – все это напоминает о теплоте. И действительно, запутанные шары из струн, представляющие собой очень сильно возбужденные элементарные частицы,

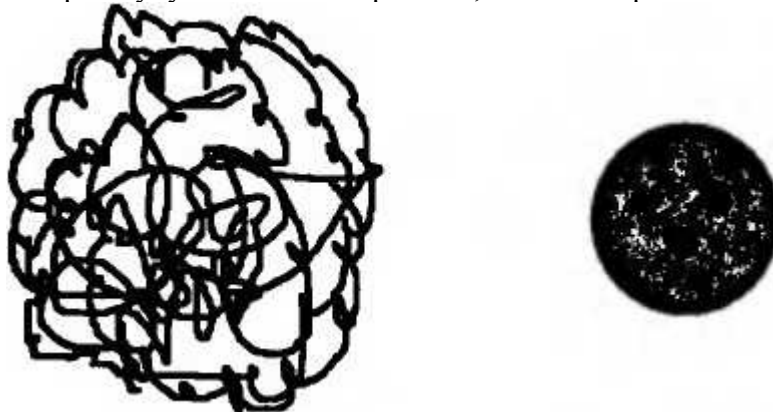
---

141 Почему так плотно? Это энтропия. С увеличением массы площадь горизонта увеличивается; поэтому энтропия черной дыры тоже растет. Но не забывайте: энтропия означает скрытую информацию. Когда мы говорим, что масса черной дыры составляет один килограмм, мы в действительности имеем в виду примерно один килограмм. Более точно было бы сказать, что масса составляет один килограмм с некоторой погрешностью. Если существует много возможных черных дыр с массами в пределах этой погрешности, то много информации остается за рамками нашего описания. Эта отсутствующая информация и есть энтропия черной дыры. Зная, что энтропия черной дыры растет с массой, 'т Хоофт заключил, что спектр масс черных дыр должен становиться очень плотным и размазываться.

142 И поднимем температуру до 1023 градусов Кельвина.

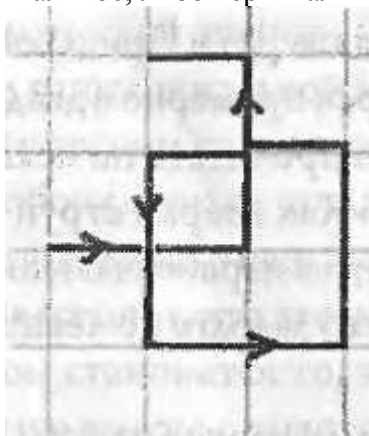
обладают температурой. Это также было известно с самых первых дней развития теории струн. Во многих отношениях эти запутанные возбужденные струны напоминают черные дыры. В 1993 году я всерьез задумывался: а вдруг черные дыры – не что иное, как огромные беспорядочно перепутанные шары из струн? Идея казалась захватывающей, но в деталях оказалась совершенно неверной.

Например, масса (или энергия) струны пропорциональна ее длине. Если 1 метр пряжи весит 1 грамм, то 100 метров будут весить 100 граммов, а 1000 метров – 1000 граммов.



*Струнный клубок Черная дыра*

Но энтропия струны тоже пропорциональна ее длине. Представьте себе движение вдоль струны со всеми ее поворотами и изгибами. Каждый из них – это несколько битов информации. Упрощенное изображение струны представляет ее как серию жестких звеньев решетки. Каждое звено либо горизонтальное, либо вертикальное.



Начнем с одного звена; оно может быть направлено вверх, вниз, влево или вправо. Всего четыре возможности. Это эквивалентно двум битам информации. Теперь добавим еще одно звено. Оно может продолжаться в том же направлении, свернуть под прямым углом (влево или вправо) или сделать разворот. Это еще два бита. Каждое следующее звено добавляет пару битов. Это означает, что скрытая информация пропорциональна общей длине струны.

Если и масса и энтропия запутанной струны пропорциональны ее длине, то не нужно сложной математики для понимания того, что ее энтропия пропорциональна массе:

***Энтропия ~ Масса.***

(В математике пропорциональность обозначается тильдой «~».)

Мы знаем, что энтропия обычной черной дыры тоже растет с массой. Но оказывается, соотношение «энтропия ~ масса» *не выполняется* для черных дыр. Чтобы понять почему, просто проследите за цепочкой пропорциональностей: энтропия пропорциональна площади горизонта; площадь пропорциональна квадрату шварцшильдовского радиуса; шварцшильдовский радиус пропорционален массе. Сведите все воедино, и вы увидите, что

энтропия пропорциональна не массе, а *квадрату массы* черной дыры:

### *Энтропия – Масса<sup>2</sup>.*

Если теория струн верна, то всё состоит из струн. Всё означает *всё* и должно включать в себя черные дыры. Летом 1993 года это меня глубоко разочаровало и опечалило.

На самом деле я просто сглупил. Я упустил нечто очевидное, но это не доходило до меня вплоть до сентября, когда я на месяц отправился в Нью-Джерси. Два самых важных центра теоретической физики – университет Ратджерса и Принстонский университет – оба находятся в Нью-Джерси примерно в двадцати километрах друг от друга. Мне предстояло прочитать по лекции в каждом из них, и обе были озаглавлены: «Как теория струн может объяснить энтропию черных дыр». Когда я первоначально об этом договаривался, то рисковал, надеясь, что задолго до лекций смогу разобраться, что же тут не так.

Не знаю, один ли я среди физиков с таким повторяющимся ночным кошмаром. У меня он возникает в разных формах с самого начала профессиональной деятельности более сорока пяти лет назад. Во сне я должен прочитать важную лекцию о некоем новом исследовании, но по мере того как срок лекции приближается, я обнаруживаю, что мне нечего сказать. У меня нет никаких заметок, а иногда я не могу даже вспомнить тему. Напряжение и паника нарастают. Иногда я даже вижу себя перед аудиторией в нижнем белье или, хуже того, вовсе без него.

Но теперь это был не сон. Первая из двух лекций должна была состояться в Ратджерсе. По мере приближения срока я все сильнее напрягался, стараясь спасти положение, но у меня ничего не получалось. Затем, когда оставалось всего дня три, я вдруг осознал собственную глупость. Ведь я оставил за рамками рассмотрения гравитацию.

Гравитация проявляется как притяжение объектов друг к другу, которое их сближает. Возьмите огромный камень – Землю, например. Без гравитации он может оставаться целым за счет молекулярного сцепления, как любой камень. Но гравитация привносит мощный новый эффект, притягивая части Земли, сдвигая ядро и сжимая его до меньших размеров. Притягивающая сила гравитации дает и еще один эффект: она меняет массу Земли. Отрицательная потенциальная энергия, связанная с гравитацией, немного уменьшает массу планеты. Ее реальная масса немного меньше, чем сумма частей.

Тут я должен остановиться и объяснить один контринтуитивный факт. Вспомним на минуту беднягу Сизифа, как он вечно заталкивает на вершину холма свой камень, лишь для того, чтобы увидеть, как тот скатывается вниз. Сизифов цикл сохранения энергии:

химическая → потенциальная → кинетическая → тепловая.

Забудем пока о химической энергии (о меде, которым питается Сизиф) и начнем цикл с потенциальной энергии камня на вершине холма. Вода перед Ниагарским водопадом тоже обладает потенциальной энергией. И в обоих случаях, когда масса падает на меньшую высоту, потенциальная энергия уменьшается. В итоге она превращается в тепло, но представим, что это тепло излучается в космос. Конечным результатом становится то, что камень и вода теряют потенциальную энергию вместе с высотой.

То же самое происходит с веществом, составляющим Землю, когда оно прижимается (гравитацией) ближе к центру Земли: оно теряет потенциальную энергию. Потерянная потенциальная энергия выделяется в форме тепла, которое, в конечном счете, излучается в космос. Результат: Земля пережила потерю энергии, а значит, и потерю массы.

Итак, я стал подозревать, что масса длинной запутанной струны тоже может уменьшаться под действием гравитации и не быть пропорциональной длине, если надлежащим образом учесть гравитационные эффекты. Вот мысленный эксперимент, который я вообразил. Предположим, что есть рукоятка, с помощью которой можно плавно усиливать и ослаблять силу гравитации. Поверните рукоятку в сторону уменьшения, и Земля немного расширится, слегка потяжелев. Поверните рукоятку в другую сторону, и Земля сожмется, став при этом немного легче. Поверните еще больше, и гравитация станет еще сильнее. Наконец, она станет настолько сильной, что Земля сколлапсирует и станет черной дырой. Но самое главное, что масса черной дыры окажется *значительно* меньше

первоначальной массы Земли.

С гигантским шаром из струны, который я себе представлял, произошло бы то же самое. Размышляя о связи между шарами из струн и черными дырами, я забыл повернуть рукоятку включения гравитации. Так что однажды вечером от нечего делать – напомним, это было в центральном Нью-Джерси, – я представил себе, что поворачиваю рукоятку гравитации. В воображении я увидел шар из струны, стягивающий сам себя в компактную сжатую сферу. Но еще важнее то, что я понял: новый меньшего размера шар из струны будет также иметь намного меньшую массу, чем первоначальный.

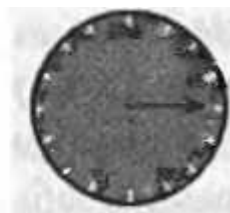
Есть еще один момент. Если размер и масса шара из струны изменятся, не изменится ли при этом энтропия? К счастью, энтропия – это как раз та вещь, которая *не меняется* при медленном повороте рукоятки. Это, возможно, самый фундаментальный факт относительно энтропии: если вы изменяете систему медленно, ее энергия может меняться (и обычно меняется), но энтропия остается такой же, какой была. Это основание и классической и квантовой механики называется *адиабатической теоремой*.

Повторим наш мысленный эксперимент, заменив Землю большой запутанной струной. Начнем с того, что установим рукоятку на ноль.

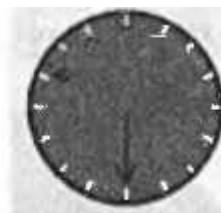


**Гравитация**

Без гравитации струна не напоминает черную дыру, но обладает энтропией и массой. Теперь медленно повернем рукоятку гравитации. Части струны начинают притягиваться друг к другу, и шар из струны сжимается.



Продолжим поворачивать рукоятку, пока струна не станет настолько компактной, что образует черную дыру.



### **Гравитация**

Масса и размеры сократились, но – и это важный момент – энтропия осталась неизменной. Что случится, если повернуть рукоятку обратно на ноль? Черная дыра начнет надуваться и в конце концов снова превратиться в большой шар из струны. Если медленно поворачивать рукоятку назад и вперед, объект попеременно будет становиться то большим

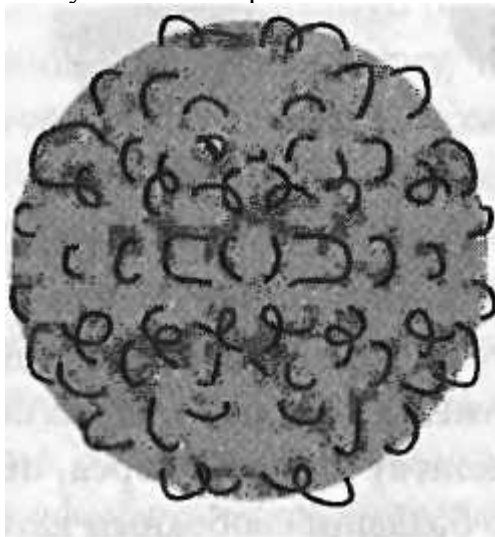


свободным клубком из запутанной струны, то плотно сжатой черной дырой. Но пока мы поворачиваем рукоятку медленно, энтропия остается неизменной.

В момент озарения я понял, что проблема с представлением черной дыры как шара из струны не в том, что энтропия ведет себя неправильно. Это масса нуждалась в корректировке с учетом эффектов гравитации. Когда я выполнил расчеты, занявшие всего один листок бумаги, все встало на свои места. По мере того как шар из струны сжимается и трансформируется в черную дыру, его масса меняется как раз нужным образом. И в итоге энтропия и масса оказываются в правильном соотношении: Энтропия  $\sim$  Масса<sup>2</sup>.

Но мои расчеты были обескураживающе неполными. Напомню, что маленький волнистый знак тильды ( $\sim$ ) означает «пропорционально», а не «равно». Равна ли в точности энтропия квадрату массы? Или она вдвое больше?

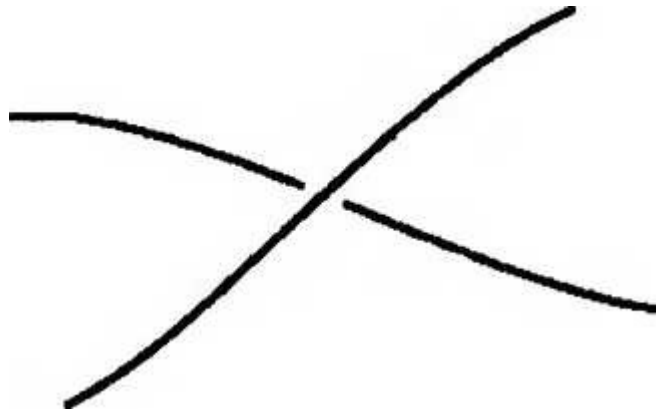
Вырисовывающаяся картина горизонта черной дыры представляла собой запутанную струну, распластанную по горизонту гравитацией. Но те же самые квантовые флуктуации, которые мы с Фейнманом выдумывали в кафе «Уэст Энд» в 1972 году, заставляют некоторые части струны немного выступать, и эти кусочки как раз и могут быть загадочными атомами горизонта. Грубо говоря, кто-то вне черной дыры мог бы заметить кусочки струны, каждый с двумя концами, надежно прикрепленными к горизонту. На языке теории струн атомы горизонта — это открытые струны (струны с концами), прикрепленные к своего рода мембране. В действительности эти кусочки могли бы отрываться от горизонта, и это объяснило бы, как черные дыры излучают и испаряются.



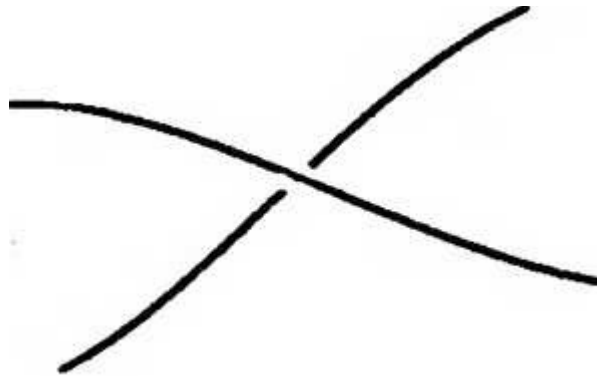
Похоже, что Джон Уилер ошибался: черные дыры *покрыты* волосами. Кошмар закончился, и я был готов к лекции.

### **Когда струны пересекаются**

Фундаментальные струны могут проходить одна сквозь другую. На следующем рисунке показан такой пример. Представьте себе замкнутую струну, удаляющуюся от вас, и другую, более далекую, движущуюся к вам. В определенной точке они пересекутся, и будь они обычными жгутами от эспандера, они бы зацепились друг за друга.

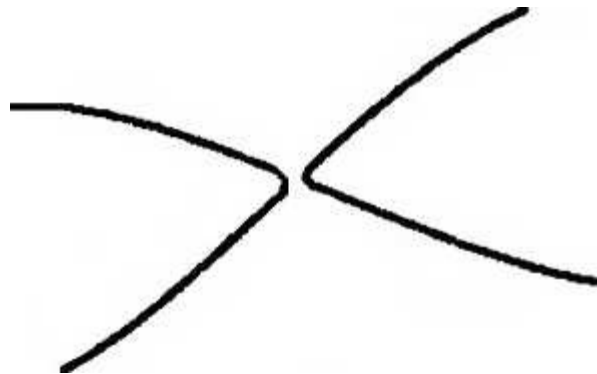


Но математические правила теории струн позволяют им проходить друг сквозь друга, и в итоге получится такая картинка.



Чтобы проделать такое с настоящими жгутами от эспандера, пришлось бы разрезать один из них, а затем снова соединить после встречи.

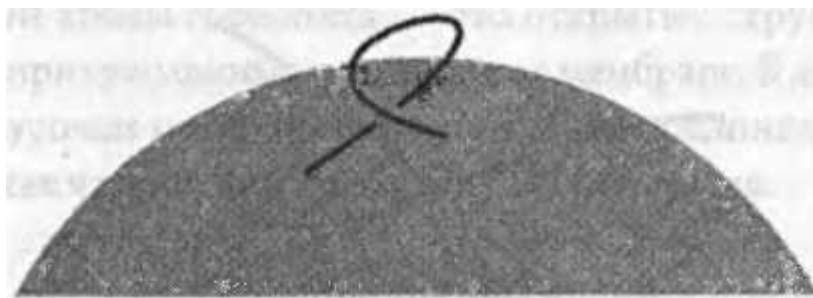
Но когда соприкасаются струны, может произойти нечто иное. Вместо того чтобы пройти друг сквозь друга, они могут перестроиться, и тогда получится что-нибудь вроде этого.



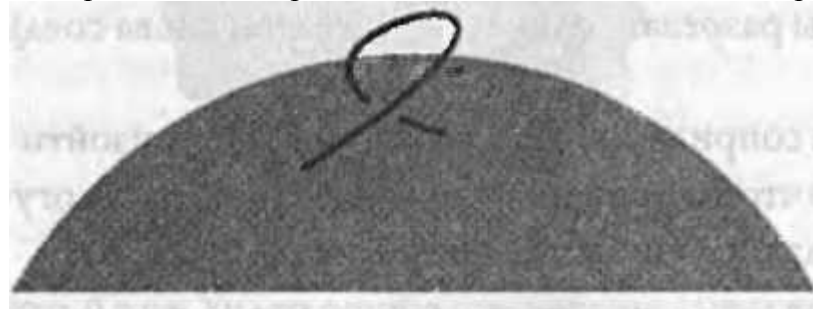
Чтобы сделать это со жгутами эспандера, надо их оба разрезать, а потом соединить новым способом.

Какой из двух результатов получится при пересечении струн? Иногда ответ будет один, иногда – другой. Фундаментальные струны – квантовые объекты, а в квантовой механике нет ничего определенного – все варианты возможны, но с определенными вероятностями. Например, струны могут проходить друг сквозь друга в 90 % случаев. А в остальных 10 % случаев они перестраиваются. Вероятность перестраивания называется *константой взаимодействия струн*.

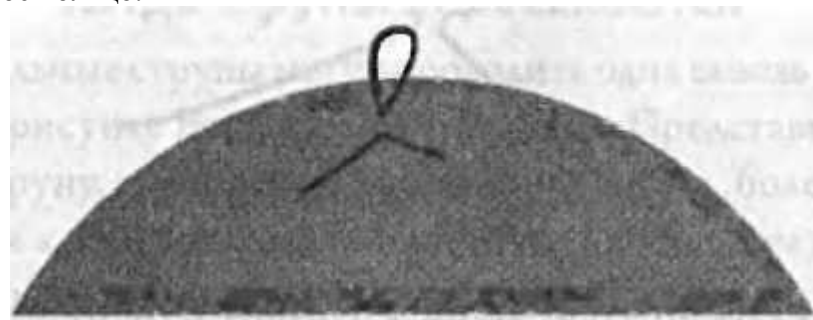
Зная об этом, давайте присмотримся к короткому кусочку струны, приподнявшемуся над горизонтом черной дыры. Этот короткий сегмент перекручен, и вот-вот с ним случится самопересечение.



В 90 % случаев он проходит сам через себя, и ничего больше с ним не приключается.



Но в 10 % случаев он реорганизуется, и тогда возникает нечто новое: от струны отделяется маленькое кольцо.



Этот небольшой кусочек замкнутой струны является частицей. Он может быть фотоном, гравитоном или любой другой частицей. Поскольку он находится за пределами черной дыры, у него есть шанс ускользнуть, и, когда это происходит, черная дыра теряет немного энергии. Так теория струн объясняет хокинговское излучение.

### **Назад в Нью-Джерси**

Физики Нью-Джерси были очень практичной группой. Эдвард Виттен, интеллектуальный лидер Института перспективных исследований в Принстоне, не только великий физик, но также один из ведущих математиков мира. Кто-то, конечно, скажет, что короткие доклады и досужие вымыслы – не самая сильная его сторона (хотя я нахожу его сухую мудрость и широчайшую любознательность весьма приятными), но все согласятся, что его интеллектуальная строгость восхитительна. Я имею в виду не математическую строгость, а скорее ясность, внимательность и отличную продуманность аргументов. Разговаривать с Виттеном о физике порой бывает очень трудно, но это всегда вознаграждается.

В Ратджерсе интеллектуальный дискурс тоже был необычайно высокого качества. Там было шестеро очень успешных физиков-теоретиков, каждый из которых вызывал восхищение, особенно у струнных теоретиков, но также и в более широком кругу физиков. Все они были моими друзьями, но трое – особенно близкими. Я знал Тома Бэнкса, Стива Шенкера и Натана «Нати» Сейберга с тех времен, когда они были очень молодыми физиками, и я был очень рад их компании. Все шестеро рутгертовских физиков обладали грозным интеллектом. Оба университета имели репутацию мест, где вам не отделаться полуготовыми соображениями.

Теперь я знаю, что мои собственные аргументы были очень далеки от полной готовности. Дополнительность черных дыр, Алисин аэроплан, струны, трансформирующиеся в черные дыры и обратно, вместе с некоторыми грубыми оценками – моя картинка казалась более или менее целостной. Но для превращения этих идей в строгую математику в 1993 году не было инструментов. Тем не менее идеи, которые я защищал, нашли отклик у физиков Нью-Джерси. В частности, Виттен в своем отклике более или менее прямо признал предположение о том, что горизонт черной дыры состоит из кусочков струны. Он даже проработал вопрос об испарении струн по аналогии с испарением черных дыр. Шенкер, Сейберг, Бэнкс и их коллега Майкл Дуглас – все внесли очень полезные предложения, направленные на то, чтобы сделать эти идеи более точными.

Также в Нью-Джерси был струнный теоретик, которого я не очень хорошо знал. Кумрун Вафа, молодой профессор из Гарварда, приехал в Соединенные Штаты из Ирана, чтобы изучать физику в Принстоне. К 1993 году его считали одним из самых креативных и математически проницательных физиков в мире. Будучи в основном струнным теоретиком, он также много работал с черными дырами, и так сложилось, что он оказался в аудитории Ратджерса, когда я объяснял, как энтропия черной дыры может вытекать из струнной природы горизонта. Беседа, которая состоялась между нами после этого, имела решающее значение.

### Экстремальные черные дыры

Ко времени моей лекции было уже известно, что если сбросить электрон в черную дыру, то она станет электрически заряженной. Заряд быстро распределяется по горизонту и вызывает отталкивание, которое немного сжимает горизонт.

Однако нет причины останавливаться на одном электроны. Горизонт можно зарядить сколь угодно сильно. И чем сильнее он заряжен, тем ближе становится к сингулярности.

Кумрун Вафа указал, что есть особенный тип заряженных черных дыр, в которых соблюдается строгий баланс между гравитационным притяжением и электрическим отталкиванием. Такие черные дыры называются *экстремальными*. Согласно Вафе, экстремальные черные дыры должны быть идеальными лабораториями для проверки моих идей. Он утверждал, что они могут стать ключом к более точным вычислениям, которые позволят заменить расплывчатый знак пропорциональности ( $\sim$ ) твердым знаком равенства ( $=$ ).

Давайте чуть подробнее остановимся на заряженных черных дырах. Сгустки электрического заряда обычно нестабильны, поскольку электроны отталкиваются друг от друга (вспомните закон: одинаковые заряды отталкиваются; противоположные заряды притягиваются). Даже если образуется облако электрического заряда, его обычно немедленно разрывают на части силы электрического отталкивания. Но гравитация может компенсировать электрическое отталкивание, если сгусток заряда достаточно массивен. Поскольку все объекты во Вселенной гравитационно притягиваются друг к другу, то между тяготением и электрическим отталкиванием возникнет конкуренция – гравитация притягивает заряды, а электрическое взаимодействие расталкивает. Заряженная черная дыра – это что-то вроде перетягивания каната.

Если сгусток заряда очень массивен, но имеет лишь небольшой электрический заряд, гравитация выигрывает в этом соперничестве, и сгусток будет сжиматься. Если его масса мала, но он имеет огромный электрический заряд, тогда электрическое отталкивание возьмет верх, и сгусток станет расширяться. Существует точка равновесия, где заряд и масса имеют строго определенное соотношение. В этой точке электрическое отталкивание и гравитационное притяжение уравниваются друг друга, и перетягивание каната заканчивается вничью. Именно это и есть экстремальная черная дыра.

Теперь представьте, что у вас есть две рукоятки, одна для гравитации, а другая для электрических сил. Сначала обе они включены. Когда гравитация и электрические силы в

точности уравновешены, у вас получается экстремальная черная дыра. Если ослабить гравитацию, не уменьшая электрических сил, последние начнут побеждать в перетягивании каната. Но если начать ослаблять обе силы в строго определенной пропорции, то баланс будет сохраняться. Каждая сторона будет слабеть, но ни одна не сможет добиться превосходства.

Наконец, если обе рукоятки прокрутить до нуля, гравитационные и электрические силы исчезнут. Что останется? Струна без всяких сил, действующих между ее частями. На протяжении всего этого процесса энтропия не меняется. Но ключевой момент состоит в том, что и масса тоже не меняется. Взаимно компенсирующие друг друга электрические и гравитационные силы «не совершают работы», что на языке физиков означает, что энергия остается в точности такой же, как вначале.

Вафа рассуждал, что *если* мы знаем, как создать такую черную дыру в теории струн, то можем с высокой точностью изучить, как рукоятки управления гравитационными и электрическими силами включаются и выключаются. Он сказал, что должна быть возможность с использованием теории вычислить точные значения коэффициентов, которые я тогда понятия не имел, как определять. Смешивая метафоры, можно сказать, что точное вычисление этих коэффициентов стало Священным Граалем для струнных теоретиков и способом закончить приготовление моей идеи. Но никто не знал, как собрать подходящего типа заряженную черную дыру из компонентов, которые предлагает теория струн.

Теория струн немного напоминает очень сложный набор «Тинкертой»<sup>143</sup>, с большим количеством различных деталей, которые могут соединяться друг с другом в целостные конструкции. Я еще расскажу немного об этих математических «колесиках и шестеренках», но в 1993 году некоторые важные детали, необходимые для построения экстремальной черной дыры, еще не были открыты.

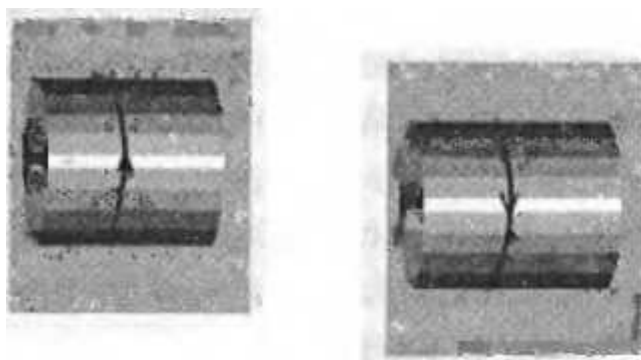
Индийский физик Ашок Сен был первым, кто попробовал собрать экстремальную черную дыру и проверить струнную теорию энтропии черных дыр. В 1994 году он подошел к этому очень близко, но все же недостаточно для завершения истории. В среде физиков-теоретиков Сена ценят очень высоко. Он имеет репутацию глубокого мыслителя и технического волшебника. Застенчивый, хрупкий человек с исключительно сильным мелодичным бенгальским акцентом, из-за которого его иногда трудно понять. Тем не менее его лекции славятся своей ясностью. В строго педагогической манере он записывает каждое новое понятие на доске. Идеи разворачиваются с неизменной последовательностью, которая делает все сказанное кристально ясным. Его научным статьям тоже присуща эта совершенная ясность.

Я даже не знал, что Сен занимался черными дырами. Но вскоре после того, как я вернулся в Соединенные Штаты из поездки в Кембридж, кто-то – думаю, это была Аманда Пит – вручил мне для прочтения его статью. Она была длинная и техническая, но в последних нескольких абзацах Ашок применял идеи теории струн – те, что я описывал в Ратджерсе, – чтобы вычислить энтропию нового класса экстремальных черных дыр.

Черная дыра Сена была сделана из деталей, о которых мы знали в 1993 году, – фундаментальных струн и шести дополнительных свернутых размерностей пространства. То, что сделал Сен, было простым, но очень ясным развитием моих собственных ранних идей. Его главная инновация состояла в том, чтобы начать со струны не только очень сильно возбужденной, но также еще и многократно охватывающей одно из свернутых измерений. В упрощенном цилиндрическом мире – расширенной версии Лайнландии – витки струны выглядят как резиновая лента, обернутая вокруг куска пластиковой трубы.

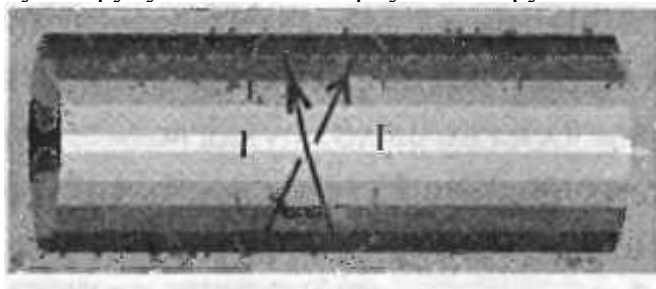
---

143 «Тинкертой» (Tinkertoy) – изобретенный в 1914 году детский конструктор, основными элементами которого являются деревянные стержни и соединительные диски для них с отверстиями через каждые 45° по окружности, а также вдоль оси. – Примеч. перев.

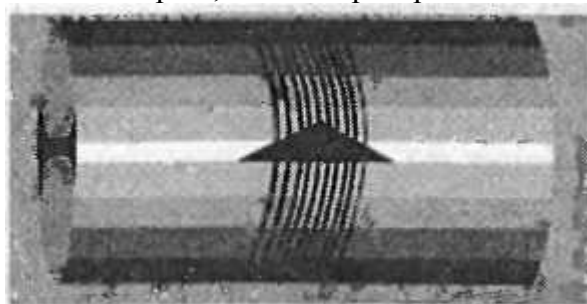


Такие струны тяжелее обычных частиц, поскольку требуется энергия для того, чтобы растянуть их вокруг цилиндра. В типичной теории струн масса витка струны может составлять несколько процентов планковской массы.

Затем Сен взял простую струну и дважды обернул ее вокруг цилиндра.



Струнные теоретики сказали бы, что эта струна имеет *винтовое число*<sup>144</sup>, равное 2, и она еще тяжелее, чем струна, делающая один виток. Но что, если струна намотана вокруг свернутого измерения не один или два раза, а миллиарды раз?



На количество оборотов струны вокруг свернутого измерения пространства нет ограничений. В результате она может сравниться по массе со звездой или даже с галактикой. Но место, которое она занимает в обычном пространстве, то есть в несвернутых размерностях обычного трехмерного пространства, очень мало. Вся эта масса заключена в столь крошечном пространстве, что она гарантированно будет черной дырой.

Сен применил еще одну хитрость, еще один ингредиент теории струн образца 1993 года: извивы, движущиеся вдоль струны. Информация должна была скрываться в особенностях этих извивов, в точности как я описывал это годом ранее.

Извивы на эластичной струне не остаются неподвижными. Они распространяются вдоль струны, подобно волнам: одни по часовой стрелке, а другие против. Два извива, движущиеся в одном направлении, гонятся друг за другом по струне, никогда не сталкиваясь. Однако если две волны движутся в противоположных направлениях, они сталкиваются, порождая сложную мешанину. Поэтому Сен решил хранить всю скрытую информацию в волнах, движущихся «в ногу» по часовой стрелке без всяких столкновений.

Когда все ингредиенты были собраны и различные рукоятки включены, у струны Сена не было других возможностей, кроме как превратиться в черную дыру. Но вместо обычной черной дыры из-за накручивания струны вокруг свернутого измерения появляется

<sup>144</sup> Используется также термин топологическое число. – Примеч. перев.

совершенно особый тип экстремальной черной дыры.

Экстремальная черная дыра электрически заряжена. Но где же электрический заряд? Ответ был известен уже много лет: накручивание струны на компактизированное измерение придает ей электрический заряд. Каждый оборот струны добавляет одну единицу заряда. Если струна намотана в одном направлении, получается положительный заряд, если в противоположном – отрицательный. Гигантские многократно намотанные струны Сена также могут рассматриваться как сгустки электрического заряда, скрепляемые гравитацией, – иными словами, как заряженная черная дыра.

Площадь – это геометрическое понятие, а геометрия пространства и времени управляется эйнштейновской общей теорией относительности. Единственный способ узнать площадь горизонта черной дыры – это вывести ее из уравнений Эйнштейна для гравитации. Сен мастерски владел этими уравнениями и легко (легко для него) решил их для специального сконструированного им типа черных дыр, а затем вычислил площадь горизонта.

И тут случилась катастрофа! Когда уравнения были решены и площадь горизонта подсчитана, результат оказался равным *нулю*! Иными словами, вместо замечательной обширной оболочки горизонт сжался до размеров точки пространства. Вся энтропия, запасенная в извивающихся, змеящихся струнах, была, похоже, сконцентрирована в крошечной точке. Это не только было проблемой для черных дыр, но и прямо противоречило голографическому принципу, утверждающему, что максимальная энтропия области пространства равна ее площади в планковских единицах. Где-то была допущена ошибка.

Сен ясно видел, что возникла проблема. Уравнения Эйнштейна *классические*, то есть они игнорируют эффекты квантовых флуктуаций. Без квантовых флуктуаций электрон в атоме водорода упал бы на ядро, и весь атом стал бы по размеру не больше протона. Но квантовые движения в основном состоянии, вызванные принципом неопределенности, делают атом в 100 000 раз больше ядра. Сен понял, что то же самое может происходить и с горизонтом. Хотя классическая физика предсказывает, что он должен сжиматься в точку, квантовые флуктуации могли бы расширить его до того, что я называю *растянутым горизонтом*.

Сен внес необходимые поправки: быстрая, «на обороте конверта», оценка показала, что энтропия и площадь растянутого горизонта действительно пропорциональны друг другу. Это был еще один триумф струнной теории энтропии горизонта, но, как и прежде, победа была неполной. Точность вновь ускользнула; оставалась неопределенность относительно того, насколько именно квантовые флуктуации могут растянуть горизонт. Блестящая работа Сена по-прежнему заканчивалась расплывчатой тильдой. Максимум, что он мог сказать, это то, что энтропия черной дыры *пропорциональна* площади горизонта. Это было почти попадание, но «почти» не считается. «Последний гвоздь в гроб» еще предстояло рассчитать.

Это почти состоявшееся вычисление имело не больше шансов убедить Стивена Хокинга, чем мои аргументы. Тем не менее кольцо смыкалось. Для реализации предложения Вафы и создания экстремальной черной дыры с большим классическим горизонтом требовались новые детали конструктора «Тинкертой». К счастью, их уже готовы были открыть в Санта-Барбаре.

### **D-браны Полчински**

D-браны следовало бы называть P-бранами – по инициалу Полчински. Но к тому времени, когда Джо открыл свои браны, термин *P-браны* уже использовался для совсем другого объекта. Поэтому Джо назвал свои – *D-бранами*, в честь немецкого математика девятнадцатого века Иоганна Дирихле. Тот, конечно, ничего непосредственно с D-бранами не делал, но его математические исследования волн имели к ним некоторое отношение.

Слово *брана* не встречается в словарях, кроме как в контексте теории струн. Оно происходит от общеупотребительного термина *мембрана*, означающего двумерную

поверхность, способную изгибаться и растягиваться. Открытие свойств D-бран, сделанное Полчински в 1995 году, было одним из самых важных событий в истории современной физики. Вскоре оно принесло замечательные результаты во всех областях – от черных дыр до ядерной физики.

Простейшая брана – это нульмерный объект, называемый О-браной. Частица или точка пространства нульмерна, по точке невозможно перемещаться, поэтому частица и 0-брана – это синонимы. Сдвинувшись на один уровень, мы получаем 1-браны, которые одномерны. Фундаментальные струны – это частный случай

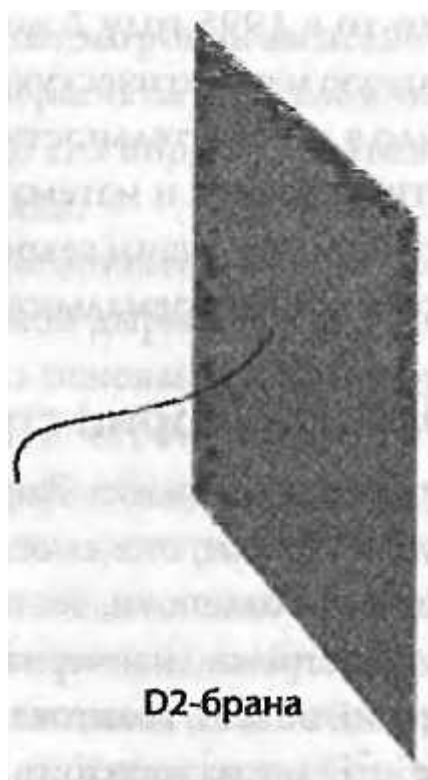
1-бран. Мембраны – двумерные листы материи – это 2-браны. А что можно сказать о 3-бранах? Они существуют? Представьте себе твердый куб из резины, заполняющий некоторую область пространства. Его можно назвать заполняющей пространство 3-браной.

Может показаться, что мы исчерпали измерения. Очевидно, что нет возможности уложить 4-брану в трехмерное пространство. Но что, если у пространства есть свернутые измерения, шесть штук, например? В этом случае одно из измерений 4-браны может тянуться в свернутом измерении. В действительности если всего существует девять измерений пространства, то в нем могут содержаться любые виды бран, вплоть до 9-бран.

D-брана – это не просто любого вида брана. Она имеет совершенно особые свойства, а именно: к ней могут прикрепляться фундаментальные струны. Рассмотрим случай D0-браны. Здесь D означает, что это D-брана, а O указывает, что она нульмерна. Так что D0-браны – это частицы, на которых могут оканчиваться фундаментальные струны.







D1-браны часто называют D-струнами, потому что они одномерны и сами являются разновидностью струн, хотя их не следует путать с фундаментальными струнами<sup>145</sup>. Обычно D-струны значительно тяжелее фундаментальных струн. D2-браны – это мембраны, вроде резиновых листов, но опять же, с тем свойством, что на них могут оканчиваться фундаментальные струны.

Были ли D-браны странной произвольной выдумкой, которую Полчински добавил к теории струн? В его первой исследовательской работе, я думаю, так и могло быть. Физики-теоретики часто изобретают новые концепции просто для того, чтобы поиграть с ними и увидеть, к чему они приводят. На самом деле в 1994 году, когда Джо впервые показал мне идею D-бран, это было как раз в духе такого разговора: «Гляди, мы можем добавить в теорию струн новый объект. Правда, забавно? Давай копнем его свойства».

Но где-то в 1995 году Джо осознал, что D-браны заполняют колоссальную математическую дыру в теории струн. Их существование было в действительности необходимо для завершения растущей паутины логики и математики теории. И D-браны оказались как раз тем недостающим секретным ингредиентом, необходимым для построения экстремальной черной дыры.

### **Математика теории струн вознаграждает усилия**

В 1996 году за дело взялись Вафа с Энди Строминджером. Объединив струны и браны, они смогли сконструировать экстремальную черную дыру с большим и, без сомнений, классическим горизонтом. Поскольку экстремальная черная дыра рассматривалась как крупный классический объект, квантовая дрожь могла оказать лишь ничтожно малое влияние на горизонт. Теперь пространства для сомнений не оставалось. Теория струн дала верное количество скрытой информации, предполагаемое формулой Хокинга, без всяких неоднозначных множителей, которые равны то ли двум, то ли пи, и без знака пропорциональности.

---

<sup>145</sup> То, что в теории струн имеется два типа струн, может показаться странным и до некоторой степени произвольным. Существуют мощные математические симметрии, называемые дуальностями, связывающие фундаментальные струны и D-струны. Эти дуальности очень похожи на дуализм электрических зарядов и магнитных монополей, гипотезу о которых выдвинул в 1931 году Поль Дирак. Они оказали сильное влияние на некоторые области чистой математики.

Это не была обычная черная дыра вроде тех, о которых упоминают в школе. Объект, который Строминджер и Вафа построили из струн и D-бран, походил на кошмарный сон инженера, но это была простейшая конструкция, имеющая большой классический горизонт, который был им нужен. Потребовались все математические хитрости теории струн, включая струны, D-браны, полный набор дополнительных измерений и много чего еще. Сначала они взяли несколько DS-бран, заполняющих пять из шести свернутых измерений пространства. Вдобавок к этим внедренным DS-бранам они обернули большое количество D1-бран вокруг свернутых измерений. А затем добавили струны, присоединенные обоими своими концами к D-бранам. И вновь открытые куски струн должны были играть роль атомов горизонта, которые содержат энтропию. (Если вы немного растерялись, не беспокойтесь. Мы коснулись вещей, к легкому пониманию которых человеческий мозг не приспособлен.)

Строминджер и Вафа выполнили те же шаги, что уже делались ранее. Сначала они установили рукоятки на ноль, так чтобы гравитация и другие силы исчезли. Без этих сил, которые все усложняют, можно было точно подсчитать, сколько энтропии запасено во флуктуациях открытых струн. Технически расчеты были сложнее и тоньше, чем все, что предпринималось до сих пор, но, проявив изобретательность, они в этом деле преуспели.

Следующим шагом стало решение эйнштейновских уравнений поля для случая экстремальной черной дыры. На этот раз для вычисления площади не потребовалось основанной на неопределенности растягивающей процедуры. К огромному их (и моему) удовлетворению, Строминджер и Вафа обнаружили, что площадь горизонта и энтропия были не просто пропорциональны; информация, скрытая в извивах струн, присоединенных к бранам, в точности согласовывалась с формулой Хокинга. Они вбили этот гвоздь.

Как это часто бывает, до этих новых идей почти одновременно дошла и другая команда исследователей. Как раз когда Строминджер и Вафа выполняли свою работу, один из самых ярких физиков нового поколения еще был студентом в Принстоне. Научным руководителем Хуана Малдасены был Курт Каллан (С из CGHS). Малдасена и Каллан тоже использовали DS-браны совместно с D1-бранами и открытыми струнами. Каллан и Малдасена опубликовали свою статью через несколько недель после Строминджера и Вафы. Их метод несколько отличался, но вывод в точности подтвердил результаты Строминджера и Вафы.

Фактически Каллан и Малдасена смогли пойти немного дальше предыдущей работы и научились работать со слегка неэкстремальными черными дырами. Экстремальная черная дыра – довольно странное явление в физике. Это объект с энтропией, но без тепла и температуры. В большинстве квантово-механических систем при отводе всей энергии всё жестко фиксируется на своих местах.

Например, если отвести все тепло от кубика льда, то в результате получится идеальный кристалл абсолютно без дефектов. Любая перестановка молекул воды потребовала бы энергии, а значит, и немного тепла. У льда, от которого отведено все тепло, не остается ни избыточной энергии, ни температуры, ни энтропии.

Но есть исключения. Некоторые особые системы имеют множество состояний, в которых достигается одинаковая минимальная энергия. Иными словами, даже после того, как вся энергия отведена, есть возможности такой реорганизации системы, чтобы скрывать в ней информацию, причем делать это без добавления энергии. Физики говорят, что у таких систем имеется *вырожденное основное состояние*. Системы с вырожденным основным состоянием имеют энтропию – могут скрывать информацию – даже при температуре абсолютного нуля. Экстремальные черные дыры – идеальный пример таких странных систем. В отличие от обычных шварцшильдовских черных дыр они находятся при температуре абсолютного нуля, а значит, не испаряются.

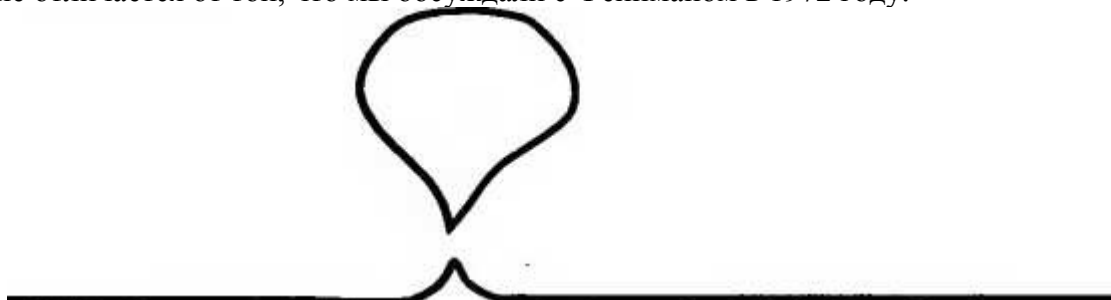
Давайте вернемся к примеру Сена. В его варианте все извивы струны движутся в одном направлении и потому не могут сталкиваться друг с другом. Но добавим извивы, движущиеся в противоположном направлении. Как можно ожидать, сталкиваясь с первыми, они будут порождать некоторую путаницу. В действительности они разогреют струну и поднимут ее температуру. В отличие от обычных черных дыр эти почти экстремальные

черные дыры не испаряются полностью, они испускают избыточную энергию и возвращаются в экстремальное состояние.

Каллан и Малдасена смогли применить теорию струи для вычисления скорости, с которой испаряется почти экстремальная черная дыра. Способ, которым теория струн объясняет испарение, восхитителен. Когда два извива, движущихся в противоположных направлениях, сталкиваются, они образуют один извив большего размера, который выглядит примерно вот так.



Как только образуется этот извив, ничто не препятствует его отрыву по модели, которая не отличается от той, что мы обсуждали с Фейнманом в 1972 году.



Но Каллан и Малдасена сделали больше, чем говорили. Они выполнили очень детальные расчеты испарения. Замечательный факт состоит в том, что их результаты в точности совпадают с методом Хокинга, предложенным двадцатью годами раньше, за исключением одного важного отличия: Малдасена и Каллан использовали только общепринятые методы квантовой механики. Как мы уже обсуждали в предыдущей части, квантовая механика хотя и содержит статистический элемент, но не допускает потерь информации. Поэтому исключена возможность, чтобы информация пропадала в ходе процесса испарения.

И вновь, похожие идеи разрабатывались другими физиками. Совершенно независимо две пары индийских физиков Самит Дас и Самир Матур, а также Гаутам Мандал и Стента Вадиа из бомбейского Института Тата (откуда вышел и Ашок Сен), выполнив расчеты, пришли к подобным же результатам.

Собранные воедино, все эти работы стали громадным достижением, и все они заслуженно стали знаменитыми. Тот факт, что энтропия черных дыр может быть подсчитана как информация, хранящаяся в извивах струи, прямо противоречила взглядам многих релятивистов, включая Хокинга. Стивен видел в черных дырах *пожирателей информации*, а не емкости, в которых информация хранится до востребования. Успех расчетов Строминджера – Вафы показал, что единственный математический результат способен перетянуть чашу весов. Это стало началом конца для идеи потери информации.

Драматичность этого момента не прошла незамеченной. Многие люди, включая моих друзей из Санта-Барбары, неожиданно дезертировали со своего корабля и переметнулись на сторону противника. Если у меня и оставались какие-то сомнения в том, что Битва при черной дыре вскоре завершится, они рассеялись, когда Джо Полчински и Гэри Хоровиц – прежде державшие в битве нейтралитет – стали моими союзниками<sup>146</sup>. В моем понимании это было переломное событие.

Теория струн может быть, а может не быть правильной теорией физического мира, но

---

<sup>146</sup> Полчински и Хоровиц написали статью, используя тот же метод, который я применил в 1993 году, для подсчета энтропии многих типов черных дыр, возникающих в теории струн, – как экстремальных, так и обычных, и во всех случаях ответы совпадали с формулой для площади Бекенштейна – Хокинга.

она показала, что аргументы Стивена некорректны. Игра была окончена, но, удивительным образом, Стивен и многие другие релятивисты не хотели этого признавать. Они по-прежнему были ослеплены старыми хокинговскими аргументами.

## 22

### Южная Америка выигрывает сражение

Большинство людей не вспоминают о Южной Америке, когда думают о выдающихся физиках. Даже сами южноамериканцы удивляются, когда узнают, сколько замечательных физиков вышли из Аргентины, Бразилии и Чили. Даниэль Аматти, Альберто Сирлин, Мигель Вирасоро, Гектор Рубинштейн, Эдуардо Фрадкин и Клаудио Тейтельбойм – это лишь некоторые из тех, кто серьезно повлиял на нашу науку.

Тейтельбойм, сменивший недавно имя на Клаудио Бунстер (см. сноску на с. 148), – особый человек, не похожий ни на кого из знакомых мне физиков. Его семья была очень близка к чилийскому социалистическому президенту Сальвадору Альенде и поэту-активисту, обладателю Нобелевской премии Пабло Неруде. Брат Клаудио Цезарь Бунстер возглавлял 7 сентября 1986 года группу, пытавшуюся убить бывшего фашистского диктатора генерала Аугусто Пиночета.

Клаудио – высокий темноволосый человек, с могучим, атлетически сложенным телом и свирепым пронизывающим взглядом. Несмотря на легкое заикание, он обладает обаянием и харизмой, которые могли бы сделать его великим политическим вождем. Он и в самом деле был антифашистским лидером небольшой группы ученых, помогавших в мрачные годы сохранить в живых чилийскую науку. Я не сомневаюсь, что в то время его жизнь находилась под угрозой.

Клаудио – человек потрясающих способностей и с легкой сумасшедшинкой. Будучи врагом военного режима в Чили, он любит всевозможную милитаристскую атрибутику. Живя в Техасе, перед возвращением в Чили он часто посещал выставки ножей и огнестрельного оружия и даже сегодня часто носит военную униформу.

Когда я в первый раз посетил его в Чили, он до смерти напугал меня, прикинувшись солдатом.

Это было в 1989 году, и вся власть еще принадлежала Пиночету. Когда мы с женой и нашим другом Вилли Фишлером сошли с самолета в Сантьяго, до зубов вооруженные люди в форме грубо согнали всех в длинную очередь на паспортный контроль. Клерки на контроле были военными, все при оружии, некоторые с автоматами. Пройти паспортный контроль было нелегко: длинная очередь едва двигалась и мы очень устали.

Вдруг, совершенно неожиданно, я увидел высокую фигуру в темных очках и военной униформе (или в чем-то похожем на униформу), прошедшую через оцепление и направляющуюся прямо к нам. Это был Клаудио, и он отдавал приказы солдатам так, словно был генералом.

Подойдя к нам, он взял меня за руку и, сделав надменный вид, провел нас мимо охраны, с властным видом махнув им рукой. Он подхватил наш багаж и быстро вывел нас из аэропорта к своему неправильно припаркованному джипу цвета хаки. Мы рванули из аэропорта в Сантьяго с такой скоростью, что порой машина вставала на два колеса. Каждый раз, проезжая мимо группы солдат, Клаудио отдавал им честь. «Клаудио, – прошептал я, – что это за безумие? Ты же нас убьешь». Но никто нас не остановил.

Последний раз я был в Чили уже после того, как на смену режиму Пиночета давно уже пришло демократическое правительство. У Клаудио были отличные связи с военными, особенно в авиации. Поводом для визита была конференция по черным дырам, организованная Клаудио и его небольшим институтом. Он использовал все свое влияние в военно-воздушных силах, чтобы свозить нашу компанию, включая Хокинга на самолете на чилийскую антарктическую базу. Мы получили массу удовольствия, но самым замечательным было то, как чилийские авиационные генералы, включая начальника штаба,

нас обслуживали. Один генерал разливал чай, другой подносил закуску. Очевидно, Клаудио действительно обладал большим влиянием в Чили.

Но именно в 1989 году, во время автобусной экскурсии в чилийские Анды, Клаудио впервые рассказал мне о неких *антидеситтеровских черных дырах*. Сегодня их называют *БТЗ-черными дырами* по инициалам Банадоса, Тейтельбойма и Занелли. Макс Банадос и Йорг Занелли входили в ближайший круг Клаудио и сделали тогда открытие, оказавшее долгосрочный эффект на ход Битвы при черной дыре.

### Ангелы и демоны

Физики, занимающиеся черными дырами, всегда мечтали уложить черную дыру в запечатанную шкатулку, надежно сохранив ее, подобно драгоценному украшению. Сохранив от чего? От испарения. Запечатывание в шкатулке – это что-то вроде закрывания крышкой котла с водой. Вместо того чтобы улетать в космос, частицы будут ударяться в стенки шкатулки (или в крышку котла) и падать обратно в черную дыру (или в котел).

Конечно, никто на практике не сможет поместить черную дыру в шкатулку, но такой мысленный эксперимент представляет интерес. Стабильная, неизменная черная дыра была бы намного проще испаряющейся. Но есть проблема: никакая реальная шкатулка не сможет вечно удерживать черную дыру. Как и все на свете, реальные шкатулки подвержены квантовой дрожи, и рано или поздно случится авария. Шкатулка войдет в контакт с черной дырой и – упс! – окажется в нее затянутой.

Здесь-то и появляется антидеситтеровское пространство (АДС). Прежде всего, надо отметить, что, несмотря на свое название, антидеситтеровское пространство в действительности является пространственно-временным континуумом, одним из измерений которого служит время. Виллем де Ситтер был голландским физиком, математиком и астрономом, который открыл четырехмерное решение уравнений Эйнштейна, носящее его имя. Математически пространство де Ситтера – это экспоненциально расширяющаяся вселенная, которая растет во многом подобно тому, как это проис-<sup>147</sup> ходит с нашей реальной Вселенной<sup>148</sup>. Пространство де Ситтера долгое время считалось не более чем математической диковиной, но в последние годы оно приобрело огромное значение для космологов. Это искривленный пространственно-временной континуум с положительной кривизной, то есть сумма углов треугольника в нем больше 180 градусов. Но все это к делу не относится. В этот раз нас интересует не пространство де Ситтера, а антидеситтеровское пространство.

Антидеситтеровское пространство не было открыто антиматериальным двойником де Ситтера. Приставка «анти» указывает на то, что кривизна этого пространства отрицательная, а значит, сумма углов треугольника меньше 180 градусов. Самая интересная особенность АДС состоит в том, что оно обладает многими свойствами внутреннего пространства сферической шкатулки, но такой, которая не может быть проглочена черной дырой. Дело в том, что сферические стены АДС наделены мощной силой – непреодолимым отталкиванием, действующим на все, что к ним приближается, включая и горизонт черной дыры. Это отталкивание столь сильное что контакт между стенкой и черной дырой совершенно невозможен.

Обычное пространство-время имеет четыре измерения – три пространственных и одно временное. Физики иногда называют его четырехмерным, но это скрывает различие между пространством и временем. Более точно описывать пространство-время как  $(3 + 1)$  – мерное.

Флэтландия и Аайнландия – это тоже пространственно-временные континуумы.

---

<sup>147</sup> В последние годы астрономы и космологи обнаружили, что наша Вселенная расширяется в ускоренном темпе, удваивая свой размер примерно за десять миллиардов лет. Это экспоненциальное расширение связывают с космологической постоянной, или «темной энергией», как ее называют в популярной прессе.

<sup>148</sup> В последние годы астрономы и космологи обнаружили, что наша Вселенная расширяется в ускоренном темпе, удваивая свой размер примерно за десять миллиардов лет. Это экспоненциальное расширение связывают с космологической постоянной, или «темной энергией», как ее называют в популярной прессе.

Флэтландия – мир лишь с двумя измерениями пространства, но его обитатели имеют чувство времени. Они должны корректно описывать свой мир как  $(2+1)$  – мерный. Лайнландцы, которые могут двигаться только вдоль одной оси, но также ощущают время, живут в  $(1 + 1)$  – мерном пространстве-времени. Замечательная особенность размерностей  $(2+1)$  и  $(1 + 1)$  состоит в том, что мы легко можем изображать такие пространства на картинках, что помогает нашей интуиции.



Конечно, ничто не мешает математическим физикам изобретать миры с любым числом пространственных измерений, несмотря на неспособность мозга их визуализировать. Однако интересно, можно ли изменить число временных измерений? В чисто абстрактном математическом смысле ответ – да, но он, похоже, не имеет большого смысла с физической точки зрения. Одно измерение выглядит вполне подходящим значением.

Антидеситтеровские пространства могут быть разной размерности. У них может быть любое число пространственных направлений, но только одно временное. То АДС, с которым работали Банадос, Тейтельбойм и Занелли, было  $(2 + 1)$  – мерным, что позволяет легко все объяснить на картинках.

### Физика в разных измерениях

Трёхмерное пространство (не пространство-время) – это одна из тех вещей, которая кажется жестко прошитой в нашей когнитивной системе. Никто не может визуализировать четырёхмерное пространство без опоры на абстрактную математику. Может показаться, что одно- и двумерные пространства изобразить проще, и, в определенном смысле, так и есть. Но если вы на мгновение задумаетесь, то поймете, что, визуализируя линии и плоскости, вы всегда представляете их вложенными в трёхмерное пространство. Это почти наверняка связано с тем, как эволюционировал наш мозг, и не имеет никакого отношения к особым математическим свойствам трех измерений<sup>149</sup>.

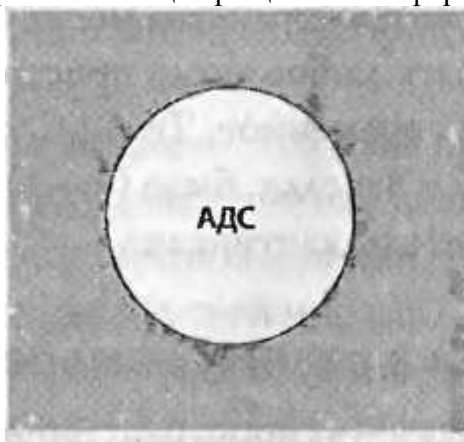
Квантовая теория поля – теория элементарных частиц – столь же осмысленна в мире с меньшим числом измерения, как в трёхмерном пространстве. Судя по всему, элементарные частицы вполне возможны в двумерном пространстве (Флэтландии) и даже в одномерном (Аайнландии). Фактически уравнения квантовой теории поля упрощаются, когда уменьшается число измерений, и многое из того, что мы знаем об этой науке, было

<sup>149</sup> Может ли физический мир быть одно- или двумерным (я имею в виду пространство, не пространство-время)? Я твердо не знаю – нам известны не все принципы, от которых это может зависеть, – но с математической точки зрения квантовая механика и специальная теория относительности остаются столь же непротиворечивыми в одном и двух измерениях, как и в трех. Я не утверждаю, что в этих альтернативных мирах может существовать разумная жизнь, а лишь говорю, что некоего рода физика в них возможна.

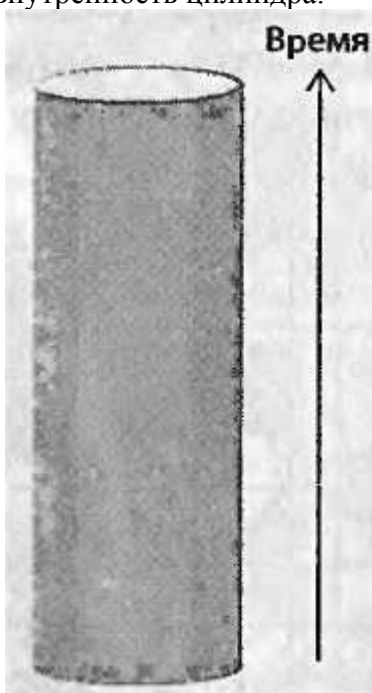
первоначально открыто путем изучения квантовой теории поля в подобных модельных мирах. Так что ничего необычного в том, что Банадос, Тейтельбойм и Занелли изучали вселенную всего с двумя измерениями, не было.

### **Антидеситтеровское пространство**

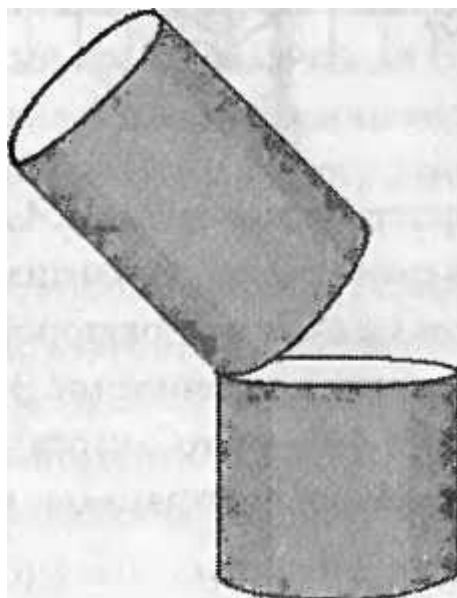
Лучший способ объяснить АДС – тот, что предложил Клаудио во время чилийской автобусной экскурсии: на картинках. Не будем пока думать о времени и начнем с обычного пространства внутри пустой круглой шкатулки. В трех измерениях ее внутренняя область будет сферической; в двух измерения она еще проще и имеет форму круга.



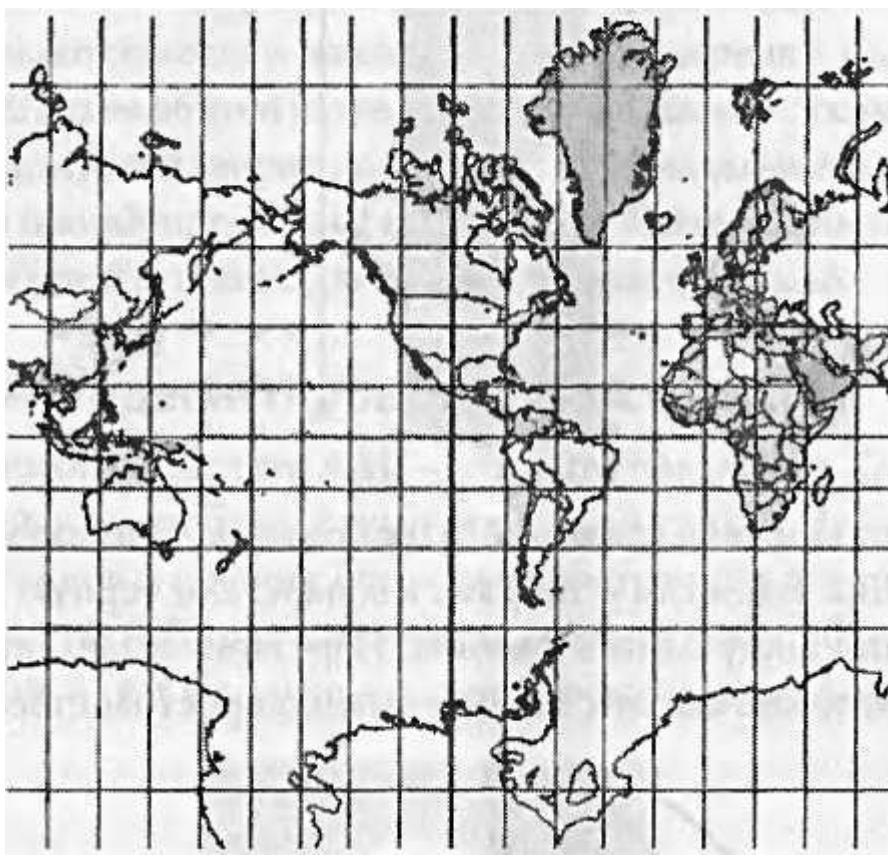
Теперь добавим время. Когда оно отложено по вертикальной оси, пространственно-временной континуум напоминает внутреннюю область цилиндра. На рисунке АДС – это незакрашенная внутренность цилиндра.



Представим себе срезы АДС (напоминаю, они имеют два измерения) по аналогии с тем, как мы нарезали черную дыру при построении диаграммы вложения. Нарезание выделяет сечения, о которых можно сказать, что они именно пространственные.



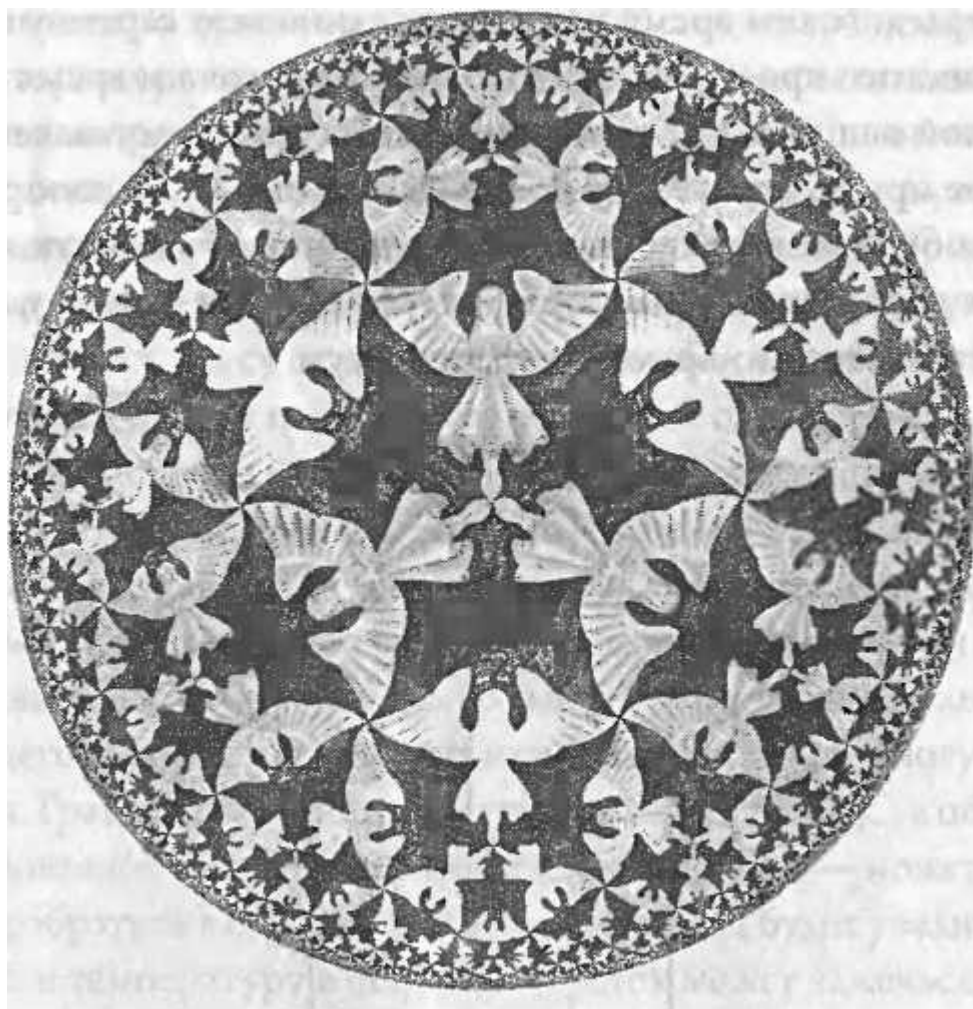
Давайте изучим двумерный срез немного внимательнее. Как и следовало ожидать, он искривлен в чем-то подобно земной поверхности. Это означает, что, рисуя его на плоскости (на листе бумаги), вы будете растягивать и искажать поверхность. Невозможно нарисовать карту Земли на плоском листе бумаги без серьезных искажений. Области, близкие к северному и южному краям карты в проекции Меркатора, значительно увеличены сравнительно с областями вблизи экватора. Гренландия выглядит такой же большой, как Африка, хотя в действительности площадь Африки примерно в пятнадцать раз больше.



Пространство (а также пространство-время) в АДС искривлено, но в отличие от земной поверхности его кривизна отрицательна. Растягивание его на плоскости дает «антимеркаторовский» эффект: области на краях выглядят слишком маленькими.



Знаменитый рисунок Эшера «Предел – круг 4»<sup>150</sup> – это «карта» пространства с отрицательной кривизной, которая показывает, как именно выглядит двумерный срез АДС.



Я нахожу «Предел – круг 4» по меньшей мере гипнотическим. (Он напоминает мне бесконечный поиск последней видимой собаки персонажами романа «Мышонок и его отец», см. главу 20.) Ангелы и демоны нескончаемо повторяются, переходя в бесконечный фрактальный край. Заключил ли Эшер сделку с дьяволом, позволившую ему нарисовать бесконечное число ангелов? Или, если я как следует пригляжусь, то смогу заметить последнего видимого ангела?

Задержимся на мгновение для перепрошивки своих представлений: вам должно стать видно, что все ангелы и демоны имеют одинаковые размеры. Это не просто маленькое ментальное упражнение, оно помогает запомнить, что Гренландия почти в точности равна по размерам Аравийскому полуострову, несмотря на то что в проекции Меркатора выглядит в восемь раз крупнее. По-видимому, в голове у Эшера эти ментальные упражнения были прошиты очень хорошо, но, попрактиковавшись, вы тоже смажете приобрести такой навык.

Теперь добавим время и сведем воедино всю картину антидеситтеровского пространства. Как обычно, отложим время по вертикальной оси. Каждый горизонтальный срез представляет собой обычное пространство в определенный момент. Рассматривайте АДС как бесконечное число слоев пространства – тонкую нарезку бесконечной салями, – которая, будучи сложена в стопку, образует пространственно-временной континуум.

---

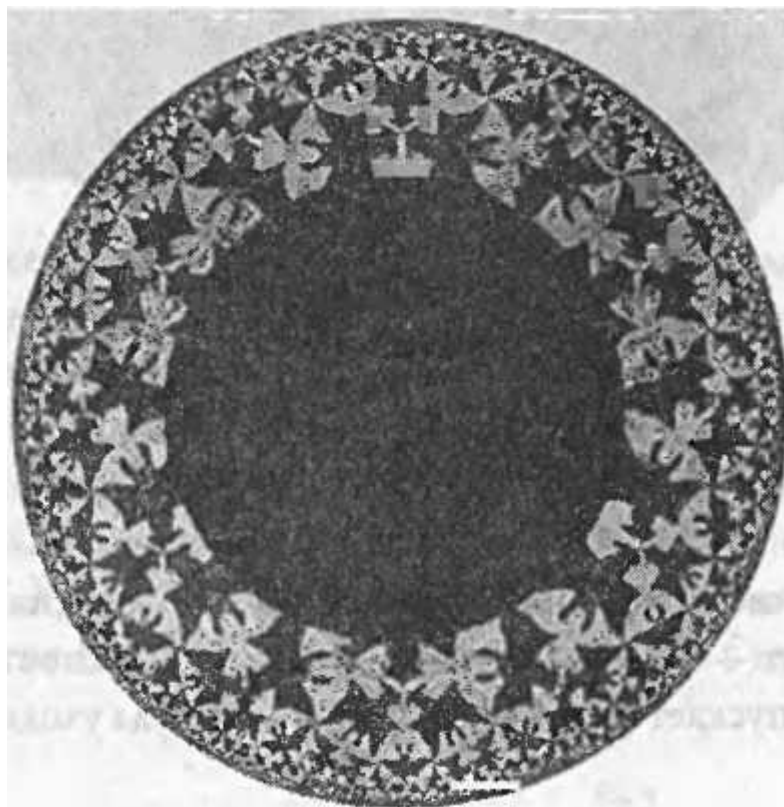
<sup>150</sup> Полное название рисунка Эшера: «Предел – круг 4 (Рай и Ад)»; по-английски: Circle Limit IV (Heaven and Hell). – Примеч. перев.



Пространство в АДС причудливо искривлено, но не более чем время. Напомню, что, как мы узнали в главе 3, часы, находящиеся в разных местах, согласно общей теории относительности, часто идут в разном темпе. Например, замедление хода часов вблизи горизонта черной дыры позволяет использовать ее в качестве машины времени. Часы в АДС тоже ведут себя странно. Представьте, что у каждого эшеровского демона есть наручные часы. Если ближайšie к центру демоны оглянутся на своих чуть более далеких соседей, они заметят нечто странное: часы у тех идут примерно вдвое быстрее. Если предположить, что у демонов есть метаболизм, то у внешних соседей обмен веществ тоже будет протекать быстрее. Каждый следующий ряд будет быстрее предыдущего, пока вблизи границы часы не станут идти так быстро, что для центральных демонов все сольется в кружащийся туман.

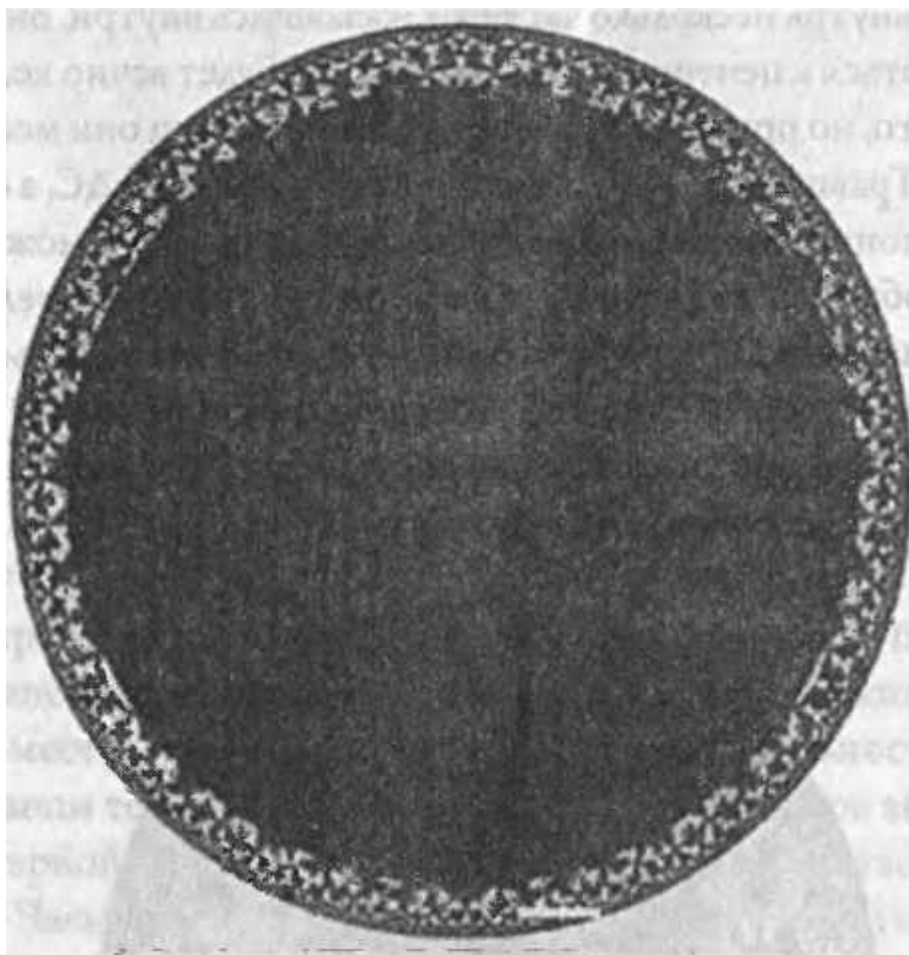
Кривизна пространства-времени в АДС создает гравитационное поле, которое притягивает объекты к центру, *даже если там ничего нет*. Одно из проявлений этого призрачного гравитационного поля состоит в том, что если массу сместить в сторону границы, ее будет тянуть назад, почти как если бы она была на пружине. Предоставленная самой себе масса будет бесконечно колебаться вперед и назад. Другой эффект, по сути, является обратной стороной медали: притяжение к центру ничем не отличается от отталкивания границей. Это отталкивание – непреодолимая сила, которая удерживает всё, включая черные дыры, от соприкосновения с границей.

Шкатулки делаются для того, чтобы класть в них вещи, поэтому положим внутрь несколько частиц. Оказавшись внутри, они станут притягиваться к центру. Отдельная частица будет вечно колебаться вокруг него, но при наличии двух или более частиц они могут сталкиваться. Гравитация – не призрачная гравитация АДС, а обычное гравитационное взаимодействие между частицами – может заставить их собраться в сгусток. Добавление частиц будет увеличивать давление и температуру в центре, и сгусток может зажечься, образовав звезду. Добавление еще большей массы приведет в конце концов к катастрофическому коллапсу: образуется черная дыра – черная дыра, заключенная в шкатулку.



Банадос, Тейтельбойм и Занелли были не первыми, кто изучал черные дыры в АДС; эта честь принадлежит Дону Пейджу и Стивену Хокингу. Однако БТЗ открыли их простейший пример, который просто визуализировать, поскольку пространство имеет только два измерения. Вот воображаемый снимок БТЗ-черной дыры. Край черной области – это горизонт.

За одним исключением антидеситтеровские черные дыры обладают всеми свойствами обычных. Как всегда, противная сингулярность скрывается за горизонтом. Добавление массы увеличивает размеры черной дыры, приближая ее горизонт к внешней границе.

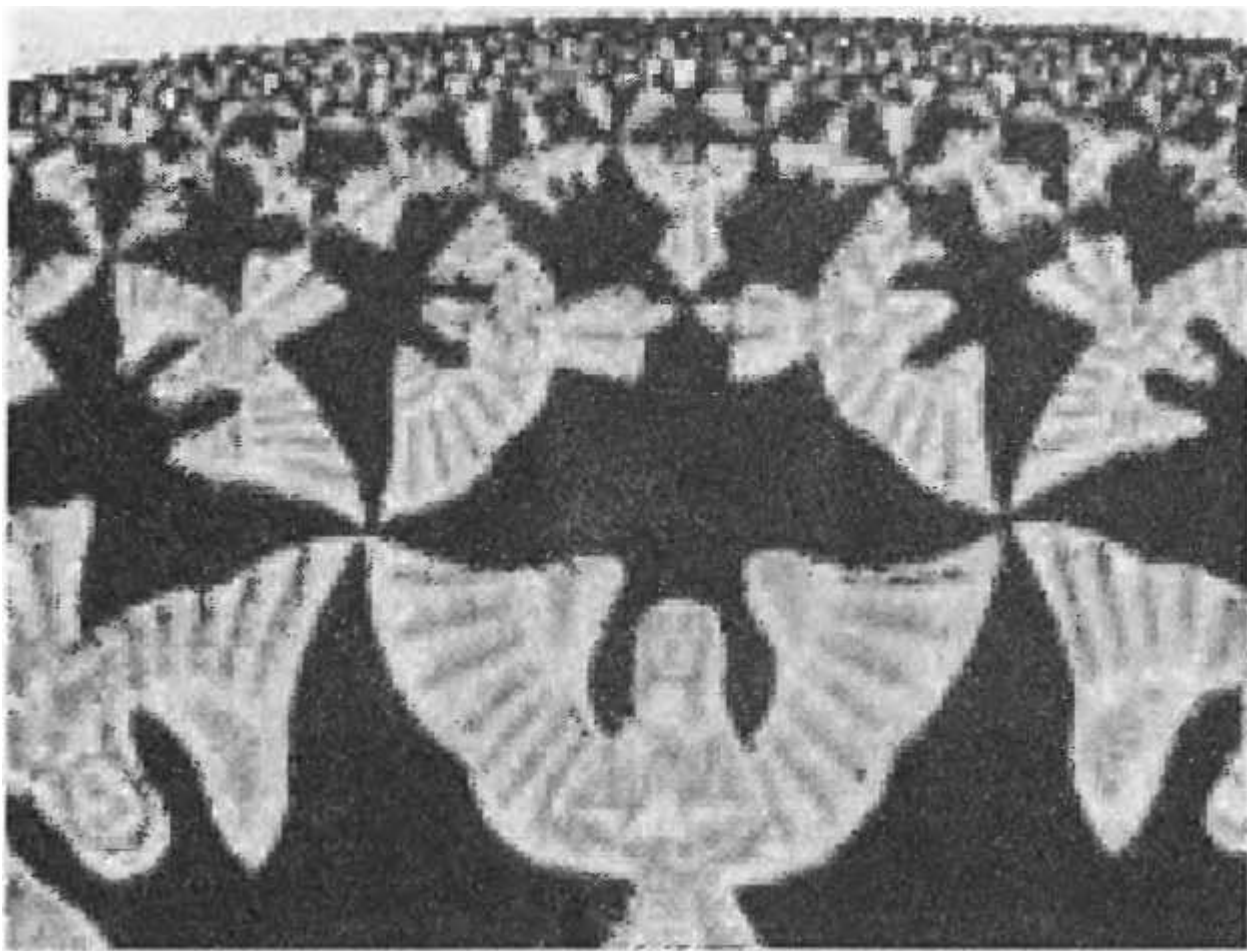


***Добавьте массы, и АДС-черная дыра вырастет***

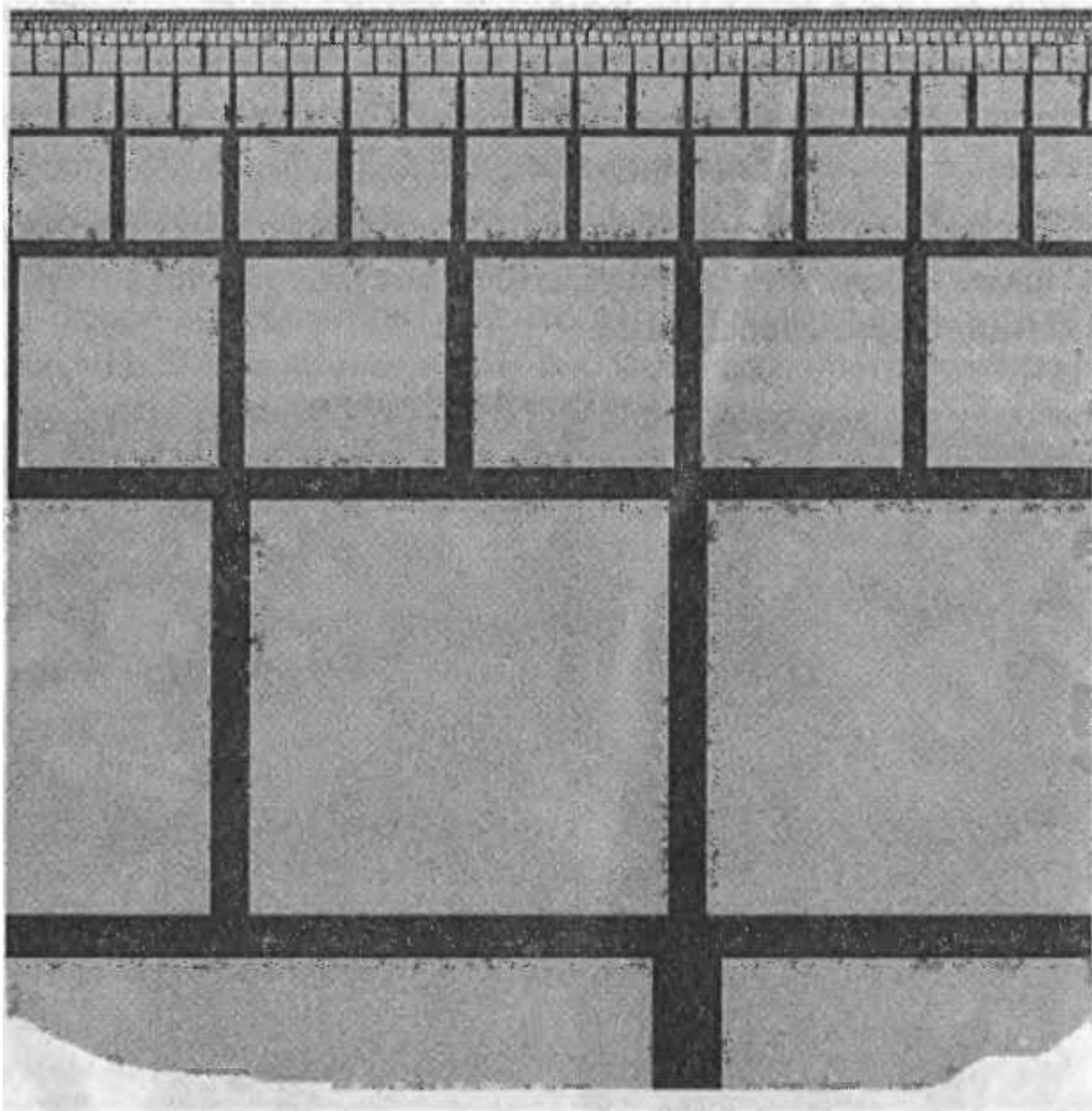
Но, в отличие от обычных черных дыр, АДС-версия не испаряется. Горизонт – это бесконечно горячая поверхность, которая постоянно испускает фотоны. Но фотонам некуда уходить. Вместо испарения в пустое пространство они падают обратно в черную дыру.

**Еще немного об АДС**

Представьте, что вы всматриваетесь в граничную точку рисунка «Предел – круг 4» и затем раздуваете рисунок так, что его край выглядит совершенно прямым.

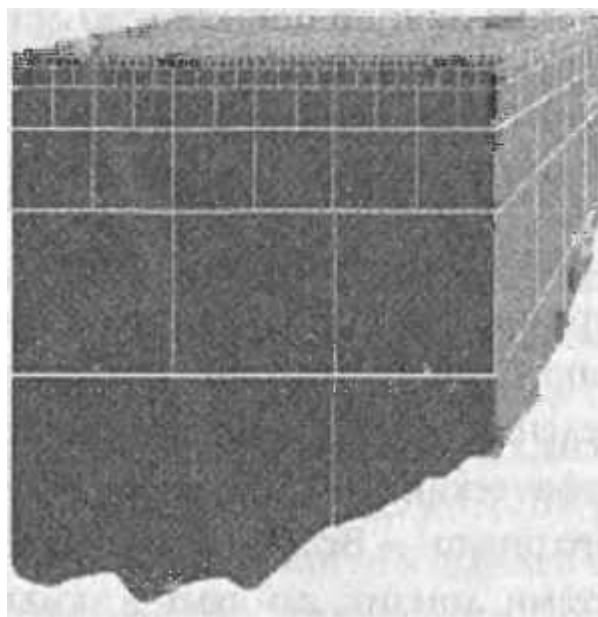


Мы можем повторять это снова и снова, никогда не исчерпав ангелов и демонов, пока в пределе край не станет выглядеть совершенно прямым и бесконечным. Я – не Эшер и не буду пытаться рисовать его изящных созданий. Я упрощу их настолько, что демоны превратятся в квадраты, а картина станет напоминать решетку из всё уменьшающихся по мере приближения к границе квадратов. Думайте об АДС как о бесконечной кирпичной стене. При спуске вниз по стене кирпичи удваиваются в размерах с каждым новым рядом.



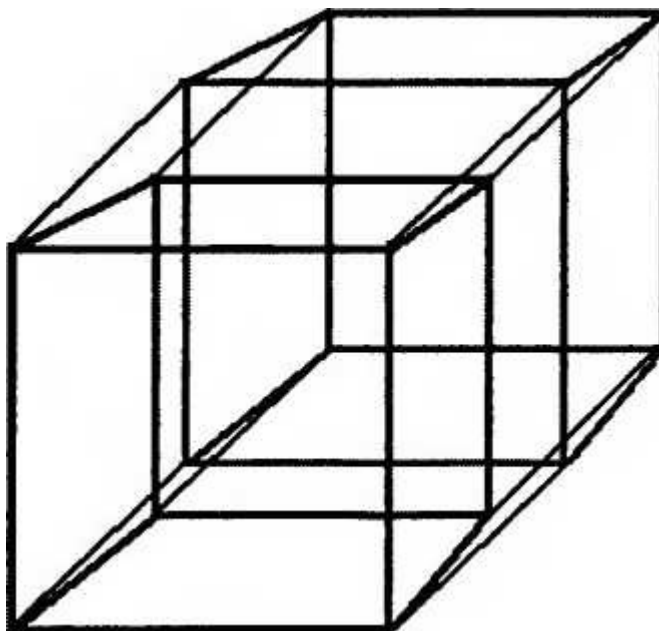
Конечно, в антидеситтеровском пространстве не будет реальных линий, так же как нет линий долготы и широты на поверхности Земли. Они проведены здесь лишь для того, чтобы наглядно показать, как искажаются размеры из-за кривизны пространства.

Эшеровский рисунок и моя грубая версия представляют двумерное пространство, но реальное пространство – трехмерно. Нетрудно представить, как будет выглядеть пространство, если добавить еще одно измерение (не временное). Все, что нужно сделать, – это заменить квадраты сплошными трехмерными кубами. На следующей картинке я изобразил небольшой участок такой трехмерной «кирпичной стены». Но не забывайте, что она тянется бесконечно как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.



Добавление к этой картине времени производится так же, как и раньше: каждый квадрат или куб оснащается своими собственными часами. Скорость хода часов зависит от того, в каком слое они расположены. Каждый раз, когда мы придвигаемся на один слой ближе к границе, часы ускоряются в два раза. И напротив, когда мы спускаемся вниз по стене, часы замедляются.

С математической точки зрения нет причин останавливаться на трехмерном пространстве. Складывая друг на друга четырехмерные кубы меняющихся размеров, можно построить  $(4+1)$  – мерное антидеситтеровское пространство и так далее для любого числа измерений. Но нарисовать даже один четырехмерный куб весьма сложно. Вот одна такая попытка.



Если сложить их друг на друга и попытаться нарисовать четырехмерную версию АДС, получится ужасная мешанина.

### **Мир в шкатулке**

Прекращение испарения черных дыр – достойная причина для изучения физики внутри шкатулки. Но идея мира в шкатулке гораздо интереснее. Подлинная цель состоит в понимании голографического принципа и доведении его до математической точности. Вот как я объяснял голографический принцип в главе 18: «Трехмерный мир нашего обыденного

опыта – Вселенная, заполненная галактиками, звездами, планетами, домами, камнями и людьми, – это голограмма, образ реальности, закодированной на далекой двумерной поверхности. Этот новый закон физики, называемый голографическим принципом, утверждает, что всё, находящееся внутри некоторой области пространства, можно описать посредством битов информации, расположенных на ее границе».

Отчасти неточность формулирования голографического принципа связана с тем, что предметы могут проходить через границу. В конце концов, это ведь воображаемая математическая поверхность безо всякой реальной материи. Сама возможность для объектов входить в рассматриваемую область и покидать ее затуманивает смысл слов «всё, находящееся внутри некоторой области пространства, можно описать посредством битов информации, расположенных на ее границе». Но мир в шкатулке с идеально непроницаемыми стенами избавлен от этой проблемы. Новая формулировка будет такой:

*Всё, находящееся внутри шкатулки с непроницаемыми стенами, можно описать посредством битов информации, хранящихся в пикселах на ее стенах.*

Во время чилийской автобусной экскурсии 1989 года я не понял, почему Клаудио Тейтельбойм так восхищался антидеситтеровским пространством. Черные дыры в шкатулке – ну и что? Мне понадобилось восемь лет, чтобы уловить суть, – восемь лет и еще один южноамериканский физик, на этот раз аргентинский.

### Удивительные открытия Малдасены

Хуан Малдасена – полная противоположность Клаудио Тейтельбойму. Он невысок и гораздо хладнокровнее. Я не могу себе представить его гоняющим на автомобиле по Сантьяго в поддельной военной форме. Но как у физика у него нет недостатка в храбрости. В 1977 году он поставил себя под удар, сделав невероятно смелое заявление, которое казалось почти таким же сумасшедшим, как моя дикая поездка с Клаудио. Фактически Малдасена доказывал, что два математических мира, которые кажутся совершенно непохожими, на самом деле являются в точности и одним и тем же. Один мир имел четыре пространственных измерения и одно временное ( $4 + 1$ ), другой был ( $3 + 1$ ) – мерным и больше напоминал мир нашего повседневного опыта. Я возьму на себя смелость упростить эту историю, с тем чтобы ее было проще визуализировать, и в каждом случае уменьшу количество измерений на одно. Поэтому я буду говорить, что некоторая воображаемая версия Флэтландии – ( $2 + 1$ ) – мерного мира – в определенном смысле эквивалентна антидеситтеровскому миру с ( $3 + 1$ ) измерениями.

Как такое вообще возможно? Самое явное свойство пространства – это количество его измерений. Неспособность распознавать размерность пространства означала бы крайне опасную степень нарушения восприятия. Безусловно, нельзя перепутать два измерения с тремя, находясь в здравом уме. По крайней мере, так кажется. Путь, который привел Малдасену к его открытию, был запутанной и извилистой тропинкой, которая проходила через экстремальные черные дыры, D-браны и нечто, называемое матричной теорией<sup>151</sup>, и в конце приводила к голографическому принципу.

Отправной точкой были D-браны Полчински. Напомню, что D-брана – это материальный объект, который в зависимости от размерности может быть точкой, линией, поверхностью или объемом, заполняющим пространство. Главное свойство, отличающее D-браны от всего остального, состоит в том, что на них могут заканчиваться фундаментальные струны. Для определенности давайте сосредоточимся на D2-бранах<sup>152</sup>.

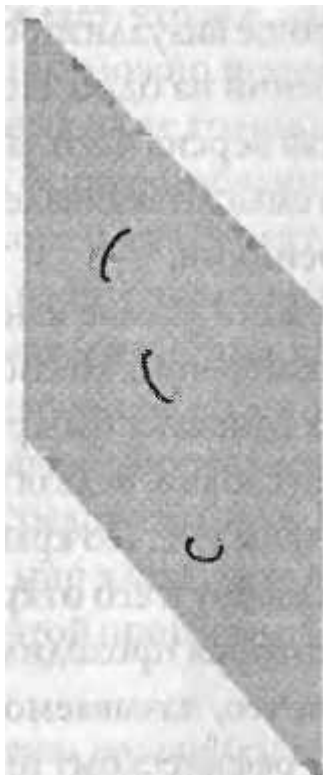
---

<sup>151</sup> Матричная теория в этом контексте не имеет ничего общего с S-матрицей. Это теория предшествовала открытию Малдасены и была с ним тесно связана, и она тоже включала загадочный рост размерностей. Это был первый пример математической связи, подтверждающий голографический принцип. Матричная теория была открыта Томом Бэнксом, Вилли Фишлером, Стивом Шейкером и мной в 1996 году.

<sup>152</sup> В своей оригинальной работе Малдасена концентрировался на случае с четырехмерным пространством. Его можно назвать ( $4 + 1$ ) – мерным АДС. Причина выбора четырехмерного пространства вместо обычных трех измерений – чисто техническая и не важна для этой главы. Но она имеет отношение к части эпилога.



Представьте себе плоскую двумерную поверхность, плавающую в трехмерном пространстве, подобно магическому паркету. Открытые струны могут присоединяться к этой D-бране обоими своими концами. Они способны скользить вдоль D-браны, но не могут свободно перепрыгивать в третье измерение. Кусочки струн, словно на коньках без трения, катятся по метафорическому льду, будучи неспособным оторвать от него ноги. Издали каждый кусочек струны выглядит как частица, движущаяся в двумерном мире. Если струн больше одной, они могут сталкиваться, рассеиваться друг на друге и даже сливаться в более сложные объекты.



D-браны могут существовать по отдельности, но они липкие. Если аккуратно их сблизить, они сцепятся и образуют составную брану из нескольких слоев, как на следующем рисунке.

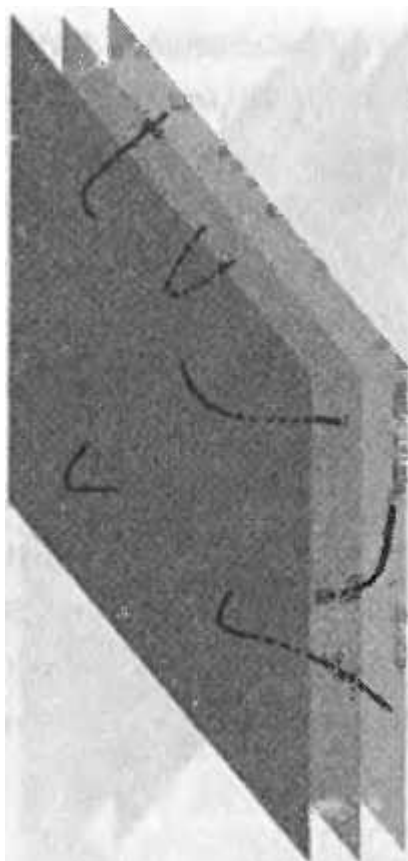


Я нарисовал D-браны на некотором расстоянии друг от друга. Но когда они сливаются, промежуток исчезает. Группу слипшихся вместе D-бран называют D-бранной стопкой.

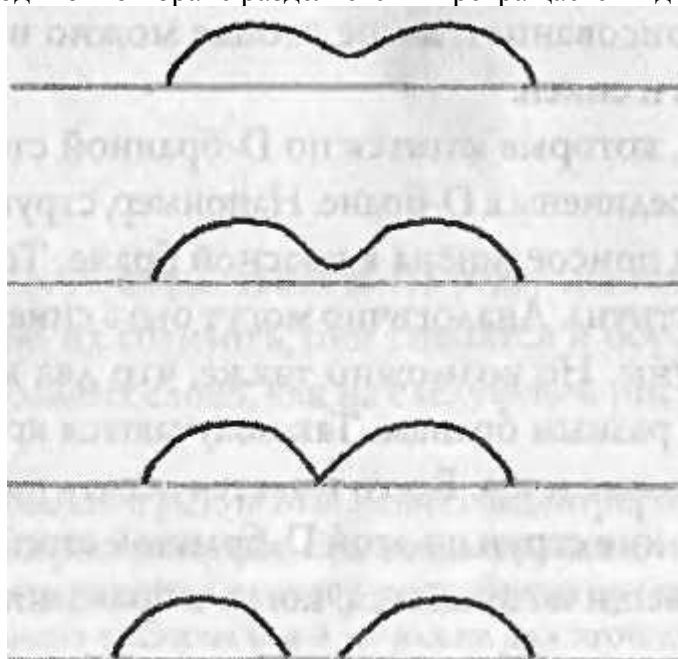
Свойства открытых струн, движущихся по D-бранной стопке, богаче и разнообразнее, чем у струн, движущихся по одиночной D-бране. Два конца струны могут присоединиться к разным элементам стопки, как если бы два конька двигались по двум немного разным уровням. Чтобы различать браны, им можно дать имена. Например, в нарисованной выше стопке можно назвать браны красной, зеленой и синей.

Концы струн, которые катятся по D-бранной стопке, должны быть всегда присоединены к D-бране. Например, струна может быть обоими концами присоединена к красной бране. Тогда это будет красно-красная струна. Аналогично могут быть сине-синие и зелено-зеленые струны. Но возможно также, что два конца струны присоединены к разным бранам. Так получаются красно-зеленые струны, красно-синие и т. д. Всего имеется девять разных возможностей для движения струн по этой D-бранной стопке.

Интересные вещи начинаются, когда к бранам присоединено несколько струн.



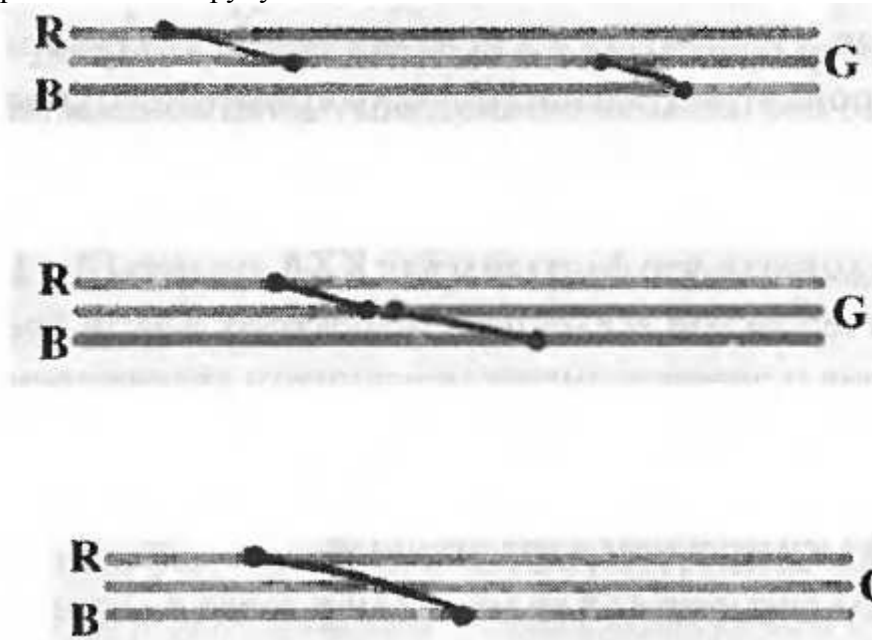
Струны на Б2-бранной стопке очень похожи на обычные частицы, но только в мире, имеющем два пространственных измерения. Они взаимодействуют друг с другом, рассеиваются при столкновениях и оказывают силовое воздействие на находящиеся поблизости струны. Одна струна может распасться на две. На следующей серии рисунков показано, как струна на одиночной бране разделяется и превращается в две струны.



Точка на исходной струне соприкасается с браной, что позволяет струне разделиться, но непременно так, чтобы все концы были присоединены к бранам. Предыдущий рисунок можно также просматривать снизу вверх, и тогда получится, что пара струн сливается и образует одну.

А вот последовательность кадров со струнами на стопке из трех D-бран. Здесь показано, как красно-зеленая струна сталкивается с зелено-синей. Две струны сливаются и

образуют одну красносинюю струну.



Красно-красная струна не может слиться с зелено-зеленой, поскольку их концы никогда не соприкоснутся.

Не правда ли, мы уже видели нечто подобное? Ну конечно, если вы прочли главу 19. Правила, управляющие поведением струн, присоединенных к стопке D-бран, в точности такие же, что управляют глюонами в квантовой хромодинамике (КХД). В главе 19 я объяснял, что глюон подобен небольшому линейному магниту с двумя концами, каждый из которых помечен своим цветом. Сходство на этом не заканчивается. Приведенный выше рисунок, показывающий соединение двух струн в одну, очень похож на диаграмму глюонного узла в КХД.

Эта параллель между «физикой на D-бране» и обычным миром элементарных частиц – замечательный факт, который, как мы увидим в следующей главе, оказался чрезвычайно полезным. Когда физики находят два разных способа описания одной системы, они называют такие два описания «дуальными». Пример тому дуальное описание света как волн или частиц. Физика полна *дуальностей*, и не было ничего особенно неожиданного или нового в самом факте, что Малдасена открыл два дуальных описания струн на D-бране. Что было новым, почти несслыханным<sup>153</sup>, так это то, что эти две картины описывали миры с *разным числом пространственных измерений*.

Я уже намекал на одно такое описание: (2-1-1) – мерная флэтландская версия КХД. Она описывает плоские протоны, мезоны и глюболы, но, как и настоящая КХД, не содержит и следа гравитации. Другая сторона этой дуальности – альтернативного способа представления одних и тех же вещей – описывает мир трехмерного пространства, причем не любого, а именно антидесситтеровского. Малдасена доказал, что флэтландская КХД дуальна (3 + 1) – мерной антидесситтеровской вселенной. Более того, в этом трехмерном мире материя и энергия служат источником гравитационных сил, так же как и в реальном мире. Другими словами, мир (2 + 1) измерений, включающий КХД, но без гравитации, эквивалентен вселенной с (3 + 1) измерением и гравитацией.

Как такое возможно? Как может мир всего с двумя измерениями быть в точности таким же, как трехмерный? Откуда появляются дополнительные измерения пространства? Ответ кроется в искажениях антидесситтеровского пространства, заставляющих объекты вблизи границы выглядеть маленькими по сравнению с такими же объектами во внутренней части пространства. Эти искажения воздействуют на воображаемых демонов, но также и на реальные объекты при их движении в пространстве. Например, если взять букву «А»

---

<sup>153</sup> Почти несслыханным, но не совсем. Матричная теория дает более ранний подобный пример.

метрового размера и заставить ее отбрасывать тень на границу, то получаемое изображение будет сжиматься или увеличиваться по мере приближения и удаления объекта от границы.



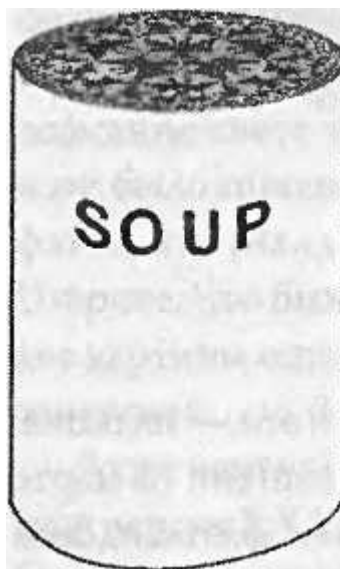
С точки зрения трехмерной внутренней области это – иллюзия, не более реальная, чем огромные размеры Гренландии на карте в проекции Меркатора. Но в дуальном описании – флэтландской теории – нет понятия расстояния в перпендикулярном, третьем измерении, заменой ему служит понятие размера. Это очень неожиданная математическая связь: рост и уменьшение размеров во флэтландской половине дуальности – это в точности то же самое, что движение вперед и назад вдоль третьего измерения в другой составляющей этой дуальности.

И вновь мы видим нечто знакомое, на этот раз из главы 18, где мы открыли, что наш мир – это что-то вроде голограммы. Два дуальных описания Малдасены являли собой голографический принцип в действии. Все, что происходит во внутренней области антидеситтеровского пространства, – «это голограмма, образ реальности, закодированной на далекой двумерной поверхности». Трехмерный мир с гравитацией – это эквивалент двумерной квантовой голограммы на границе пространства.

Я не знаю, провел ли Малдасена параллель между своим открытием и голографическим принципом, но Эд Виттен вскоре ее заметил. Всего через два месяца после статьи Малдасены Виттен опубликовал в Интернете свою собственную статью под заголовком «Антидеситтеровское пространство и голография».

Из всего содержания виттеновской статьи мое особое внимание привлек раздел о черных дырах. Антидеситтеровское пространство, его оригинальная версия, а не уплощенная стена из кирпичей, – подобно консервной банке с супом. Горизонтальные срезы банки представляют пространство; вертикальная ось банки – это время. Этикетка на ее внешней поверхности – это граница, а внутренняя область – это сам пространственно-временной континуум.

Чистое АДС-пространство подобно пустой консервной банке, но его можно сделать интереснее, наполнив «супом», то есть материей и энергией. Виттен объяснял, что, закачав в банку достаточное количество массы и энергии, можно создать черную дыру. Отсюда возникает вопрос. Согласно Малдасене, должно быть и второе – дуальное – описание, которое не упоминает о том, что содержится внутри банки. Это альтернативное описание формулируется в терминах двумерной квантовой теории поля для частиц, подобных глюонам, которые движутся по этикетке. Наличие черной дыры в супе может быть эквивалентно определенной особенности граничной голограммы, но что это за особенность? В граничной теории Виттен доказал, что черная дыра в супе эквивалентна обычной горячей жидкости из элементарных частиц – в сущности, просто глюонов.



В момент, когда я увидел статью Виттена, я понял, что Битва при черной дыре окончена. Квантовая теория поля – это частный случай квантовой механики, а информация в квантовой механике никогда не уничтожается. Что еще сделали Малдасена и Виттен, так это доказали, не оставив ни тени сомнения, что информация никогда не должна теряться за горизонтом черной дыры. Струнные теоретики могли понять это сразу; релятивистам понадобилось немного больше времени. Но война завершилась.

Хотя Битва при черной дыре должна была закончиться еще в начале 1998 года, Стивен Хокинг уподобился тем несчастным солдатам, которые годами скрывались в джунглях, не зная, что военные действия прекратились. Но на этот раз он стал трагической фигурой. Пятидесятишестилетний, уже прошедший пик своей интеллектуальной формы и почти неспособный общаться, Стивен не улавливал сути дела. Уверен, что это не было связано с ограниченностью его интеллекта. Из тех контактов, которые у меня были с ним после 1998 года, стало ясно, что его разум остается исключительно острым. Но его физические возможности настолько ослабли, что он оказался почти полностью замкнут в собственной голове. Не имея возможности записывать уравнения и испытывая колоссальные трудности при общении с коллегами, он должен был столкнуться с тем, что не может проделать те вещи, которые обычно выполняют физики, чтобы разобраться в новой, незнакомой им работе. Поэтому Стивен еще некоторое время продолжал борьбу.

Вскоре после публикации статьи Виттена в Санта-Барбаре состоялась еще одна конференция, на этот раз чтобы отметить голографический принцип и открытие Малдасены. Послеобеденным докладчиком был Джефф Харвей (Н из CGHS), однако вместо речи он призвал всех исполнить победную песню «Малдасена», которая поется и танцуется на манер «Макарены»<sup>154</sup>.

*Начав со странных вран подвида BPS<sup>155</sup>,  
Он шел вперед, попал в пространство ADS,  
И где он только накопал таких чудес?  
Э-э-э, Малдасена!*

*Супер Янг – Миллс стоит, и N его крутая,  
А гравитация на сфере как живая,  
Но голография теперь все уравнивает.  
Э-э-э, Малдасена!*

---

<sup>154</sup> «Макарена» – популярная в середине 1990-х латиноамериканская танцевальная мелодия.

<sup>155</sup> BPS – особое свойство D-бран, названное по инициалам его первооткрывателей – Богомольного, Прасада и Зоммерфильда.

*Черна дыра, загадка зла... Где энтропия? Где?  
Теперь D-бран подсчет ведем и энтропии D.  
А если врана горяча, еще и D-free-E.  
Э-э-э, Малдасена!*

*Виват, Хуан, готова M-теория вполне,  
Дыру собрали мы из струн – фурунит КХД,  
Глюболов спектр только плох, – нас мучает во сне.  
Э-э-э, Малдасена!*

## 23

### Ядерная физика? Вы шутите!

Скептики отметят, что все рассказанное мной о свойствах черных дыр – от энтропии, температуры и хокинговского излучения до дополнительности черных дыр и голографического принципа – это чистая теория без единого грана подтверждающих ее экспериментальных данных. Увы, скептики еще очень долго могут оставаться правы.

Но тут надо сказать, что совершенно неожиданная взаимосвязь между черными дырами, квантовой гравитацией, голографическим принципом, с одной стороны, и экспериментальной ядерной физикой – с другой, может раз и навсегда опровергнуть утверждение о том, что эти теории лежат за рамками возможного научного подтверждения. На первый взгляд ядерная физика кажется совершенно бесперспективным местом для проверки таких идей, как голографический принцип и дополнительность черных дыр. Ядерная физика давно не находится на переднем краю исследований. Большинство физиков, и я в их числе, полагали, что эта старая область науки исчерпала свой потенциал и уже не сможет научить нас чему-то новому относительно фундаментальных законов природы. С точки зрения современной физики ядра – это что-то вроде зефира: большие рыхлые шары, по большей части пустые внутри. Что они могут нам сказать о физике планковского масштаба? Совершенно неожиданно оказалось, что довольно много.

Струнные теоретики всегда интересовались ядрами. Вся предыстория теории струн была связана с адронами: протонами, нейтронами, мезонами и глюболами. Подобно ядрам, эти частицы большие, рыхлые и состоят из кварков и глюонов. Похоже, что на масштабе, в сто миллиардов миллиардов раз крупнее планковского, природа повторяет саму себя. Математика адронной физики оказалась почти такой же, как математика теории струн. Это кажется совершенно удивительным, если принять во внимание огромную разницу в масштабах: нуклоны могут быть в  $10^{20}$  раз больше фундаментальных струн и колеблются в  $10^{20}$  раз медленнее. Как могут эти теории быть одинаковыми или даже отдаленно похожими? Тем не менее в определенном смысле это именно так. И если обычные субатомные частицы в самом деле похожи на фундаментальные струны, почему бы нам не проверять идеи теории струн в ядерных лабораториях? В действительности это уже делается почти сорок лет.

Связь между адронами и струнами – это одна из основ современной физики элементарных частиц, но до самого недавнего времени было невозможно проэкспериментировать с ядерным аналогом физики черных дыр. Сейчас ситуация меняется.

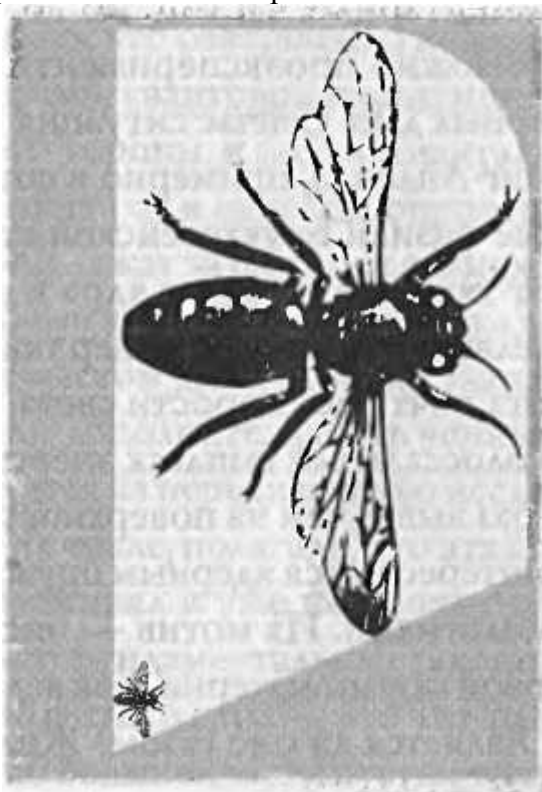
За пределами Лонг-Айленда, примерно в сотне километров от Манхэттена, ядерные физики Брукхевенской национальной лаборатории сталкивают тяжелые атомные ядра и смотрят, что получится в результате. Релятивистский коллайдер тяжелых ионов RHIC<sup>156</sup> разгоняет ядра золота почти до скорости света, так что при столкновении они дают колоссальный выплеск энергии с температурой в сотни миллионов раз выше, чем на поверхности Солнца. Брукхевенские физики не интересуются ядерным оружием или какими-то еще ядерными технологиями. Их мотив – чистое любопытство, изучение свойств

---

156 Полное англоязычное название: Relativistic Heavy Ion Collider. – Примеч. перев.

новой формы материи. Как ведет себя это горячее ядерное вещество? Является ли оно газом? Жидкостью? Остается ли оно в связанном состоянии или немедленно испаряется, распадаясь на отдельные частицы? Вылетают ли оттуда струи чрезвычайно энергичных частиц?

Как я уже сказал, ядерная физика и квантовая гравитация действуют в совершенно несопоставимых масштабах, но какая же тогда между ними может быть взаимосвязь? Лучшая известная мне аналогия связана с одним из худших фильмов, старым ужасником эпохи драйв-ин кинотеатров<sup>157</sup>. В центре сюжета были мухи-монстры. Я не знаю, как делался этот фильм, но предполагаю, что снималась обычная домашняя муха, которую потом увеличивали так, чтобы она занимала весь экран. Изображение воспроизводилось в замедленном показе, из-за чего муха воспринималась как отвратительная огромная птица. Результат был ужасен, но если вернуться к нашей теме, то это почти идеальная иллюстрация связи между гравитонами и глюболами. И те и другие – замкнутые струны, но гравитон гораздо меньше и быстрее глюбола – примерно в  $10^{20}$  раз меньше и быстрее. Кажется, адроны очень похожи на образы фундаментальных струн, только раздутые и замедленные, – не в сотни раз, как мухи, а в фантастические  $10^{20}$  раз.



Так что если мы не можем для порождения черных дыр сталкивать с колоссальной энергией частицы планковского размера, то, возможно, у нас получится сталкивать их раздутые версии – глюболы, мезоны или нуклоны, – так чтобы создать увеличенную версию черной дыры. Но погодите, не потребуется ли для этого громадное количество энергии? Нет, не потребуется, а чтобы понять почему, надо вспомнить описанную в главе 16 контринтуитивную связь между размером и массой: *маленькое – тяжелое, большое – легкое*. Тот факт, что явления ядерной физики протекают в несопоставимо больших масштабах, чем те, что характерны для теории фундаментальных струн, означает, что эти явления нуждаются в гораздо менее концентрированной энергии, занимающей гораздо больший объем. Если подставить числа и выполнить расчеты, то нечто, очень похожее на раздутую и заторможенную черную дыру, должно, оказывается, возникать при обычном столкновении ядер на RHIC.

Чтобы понять, в каком смысле можно говорить о создании черных дыр на RHIC, нам надо вернуться к голографическому принципу и открытию Хуана Малдасены. Совершенно

---

<sup>157</sup> Драйв-ин – кинотеатры на открытом воздухе, где фильмы смотрят прямо из припаркованной машины. – Примеч. перев.



неожиданным для всех способом Малдасена обнаружил, что две разные математические теории в действительности были одной и той же, то есть они оказались «дуальны друг другу», если пользоваться теоретическим жаргоном. Одна из теорий была собственно теорией струн с гравитонами и черными дырами, но только в  $(4 + 1)$ -мерном антидеситтеровском пространстве (АДС). (В той главе для простоты иллюстрирования я позволил себе вольность и уменьшил число пространственных измерений. В этой главе я восстанавливаю недостающие измерения.)

Четырех пространственных измерений для ядерной физики многовато, но вспомните голографический принцип: все, что происходит в АДС, должно полностью описываться математической теорией с пространственной размерностью на единицу меньше. Поскольку Малдасена начал с четырех пространственных измерений, дуальная голографическая теория имеет только три измерения – столько же, сколько и наше обычное пространство. Может ли это голографическое описание быть похожим на теории, которые мы используем в обычной физике?

Ответ оказывается утвердительным: голографическое дуальное описание математически очень похоже на квантовую хромодинамику (КХД) – теорию кварков, глюонов, адронов и ядер.

Квантовая гравитация в АДС  $\leftrightarrow$  КХД

Для меня самым интересным в работе Малдасены было то, каким образом она подтвердила голографический принцип, пролив свет на работу квантовой гравитации. Но Малдасена и Виттен увидели другую возможность. Их догадка, надо сказать – совершенно блестящая, состояла в том, что голографический принцип – это улица с двусторонним движением. Почему бы не применить его в обратном направлении? То есть использовать наши знания о гравитации – в данном случае о гравитации в  $(4 + 1)$ -мерном АДС-пространстве, – чтобы узнать нечто новое о привычной квантовой теории поля. Для меня это был совершенно неожиданный поворот, бонус к голографическому принципу, о котором я никогда не задумывался.

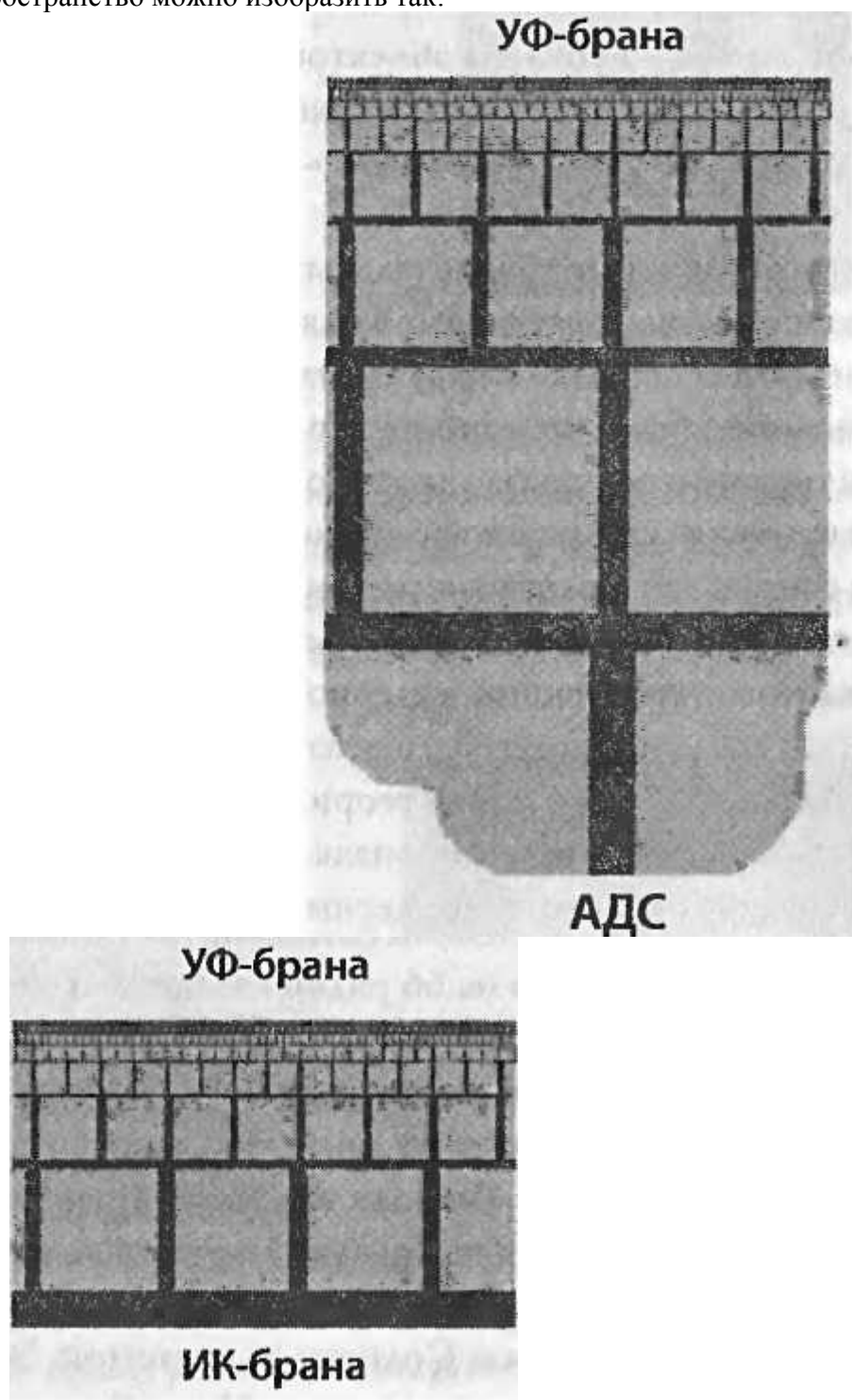
Для выполнения этой программы не понадобилось больших усилий. КХД – не совсем то же самое, что теория Малдасены, но главное отличие легко можно устранить нехитрой модификацией АДС. Давайте взглянем на АДС, как оно выглядит из точки, находящейся очень близко к границе (где последний видимый демон сжимается до нулевых размеров). Я называю эту границу УФ-браной<sup>158</sup>. «УФ» здесь означает ультрафиолет – тот же термин, который применяется для очень коротковолнового света. (С годами термин «ультрафиолет» стал применяться для любых явлений, происходящих в малых масштабах. В данном контексте это слово отсылает к тому факту, что ангелы и демоны вблизи границы эшеровского рисунка сжимаются до бесконечно малых размеров.) Слово «брана» в термине «УФ-брана» – это на самом деле терминологическая ошибка, но поскольку такое словоупотребление устоялось, я буду его придерживаться. УФ-брана – это поверхность, близкая к границе.

Представьте себе движение от УФ-браны внутрь, туда, где квадратные демоны расширяются, а часы безгранично замедляются. Маленькие и быстрые объекты, находящиеся вблизи УФ-браны, становятся большими и медленными по мере погружения в глубь АДС. Но АДС не совсем подходит для описания КХД. Модифицированное пространство заслуживает собственного названия, хотя его отличие и невелико; назовем его *Q-пространством*. Как и АДС, Q-пространство имеет УФ-брану, у которой все предметы сжимаются и ускоряются, но, в отличие от АДС, здесь есть вторая граница, называемая *ИК-браной*. («ИК» означает «инфракрасный», это термин, используемый для очень длинноволнового света.) ИК-брана – это вторая граница, своего рода непроницаемый барьер, где ангелы и демоны достигают максимального размера. Если УФ-брана – это потолок над бездонным ущельем, то Q-пространство – это обычная комната с потолком и полом. Если

---

158 Большая часть того, о чем я рассказываю в этих нескольких абзацах, гораздо более ясно описана в замечательной книге Лизы Рэнделл «Закрученные пассажи».

пренебречь временным измерением и нарисовать только два пространственных, то АДС и Q-пространство можно изобразить так:



### ***Q-пространство***

Представьте себе струноподобную частицу, помещенную в Q-пространство вблизи УФ-браны. Подобно окружающим ее ангелам и демонам, она станет выглядеть очень маленькой, возможно, планковского размера, и очень быстро колеблющейся. Но, если ту же частицу переместить к ИК-бране, будет казаться, что она выросла, как если бы ее спроецировали на удаляющийся экран. Теперь обратим внимание на колебания струны. Они служат своего рода часами и, как всякие часы, идут быстрее, когда находятся вблизи УФ-браны, и замедляются по мере движения к ИК-краю

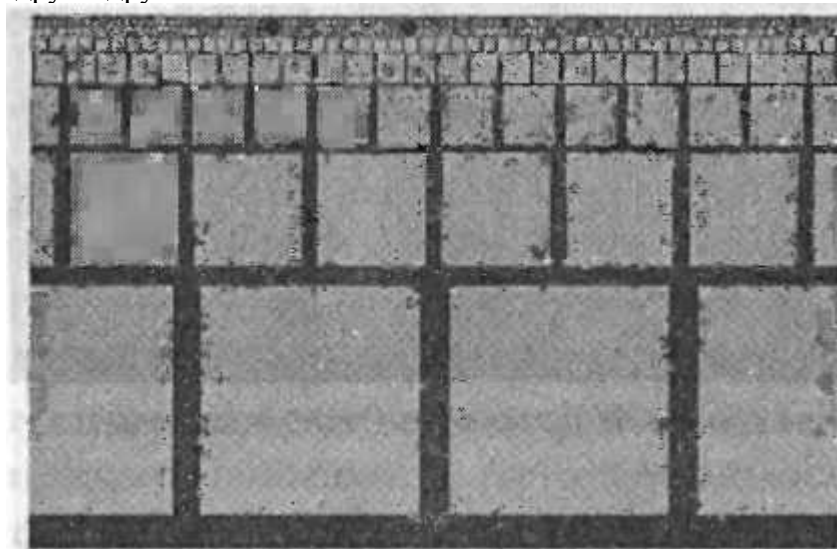
пространства не только станет выглядеть огромной запутанной версией самой себя ультрафиолетовой, но она также будет крайне медленно колебаться. Это различие очень похоже на разницу между реальной мухой и ее киношным образом или между фундаментальными струнами и их ядерными двойниками.

Если крайне малые, планковского размера, частицы теории струн «живут» вблизи УФ-браны, а их раздутые версии – адроны – вблизи ИК-браны, насколько же они отстоят друг от друга? В определенном смысле не так уж далеко; достаточно спуститься примерно на 66 рядов квадратных демонов, чтобы из области объектов планковского размера добраться до адронов. Но учтите, что каждый это то же самое, что расширение в  $10^{20}$  раз.

Есть два взгляда на сходство между теорией фундаментальных струн и ядерной физикой. Согласно более консервативному взгляду, это случайное совпадение, примерно как сходство между атомами и Солнечной системой. Это подобие было полезно на заре атомной физики. Нильс Бор в своей теории использовал для атомов ту же математику, которую Ньютон применял к Солнечной системе. Но ни Бор, ни кто-либо другой не считал, что Солнечная система действительно является раздутой версией атома. С этой консервативной точки зрения связь между квантовой гравитацией и ядерной физикой – тоже лишь математическая аналогия, полезная, однако, тем, что дает нам возможность использовать математику теории гравитации для объяснения некоторых явлений в ядерной физике.

Более воодушевляющая точка зрения состоит в том, что ядерные струны – это в действительности те же самые объекты, что и фундаментальные струны, но только наблюдаемые через искажающую линзу, которая растягивает их изображения и замедляет движения. Согласно этому взгляду, когда частица (или струна) находится вблизи УФ-браны, она кажется маленькой, энергичной и быстро колеблющейся. То есть она выглядит как фундаментальная струна, ведет себя как фундаментальная струна, а значит, это и есть фундаментальная струна. Например, замкнутая струна, расположенная на УФ-бране, – это гравитон. Но та же струна, переместившись на ИК-брану, смотрится и ведет себя как глюбол. С этой точки зрения, гравитоны и глюболы – это в точности одни и те же объекты, за исключением их положения на сэндвиче бран.

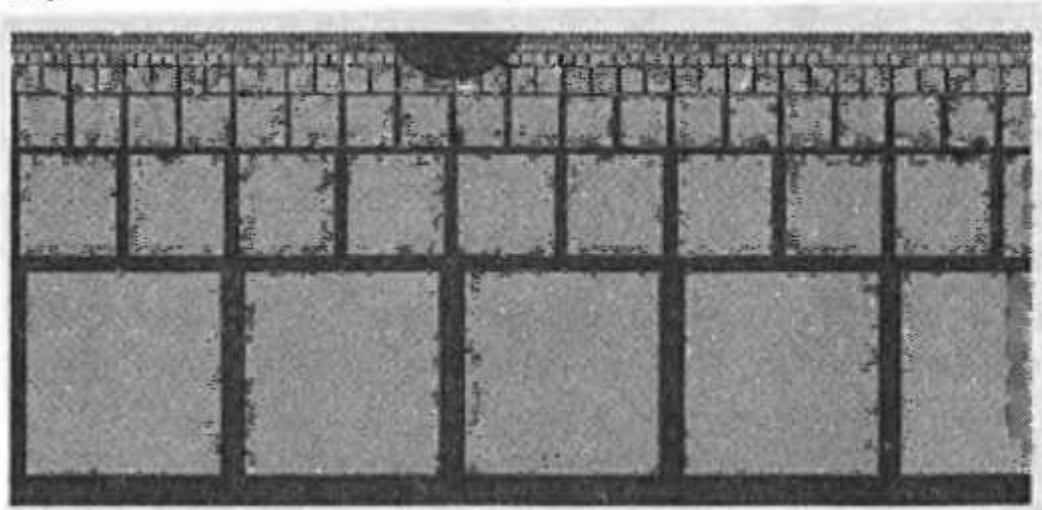
Представьте себе пару гравитонов (струн, находящихся вблизи УФ-браны), которые вот-вот столкнутся друг с другом.



### ***Две частицы вблизи УФ-браны перед столкновением***

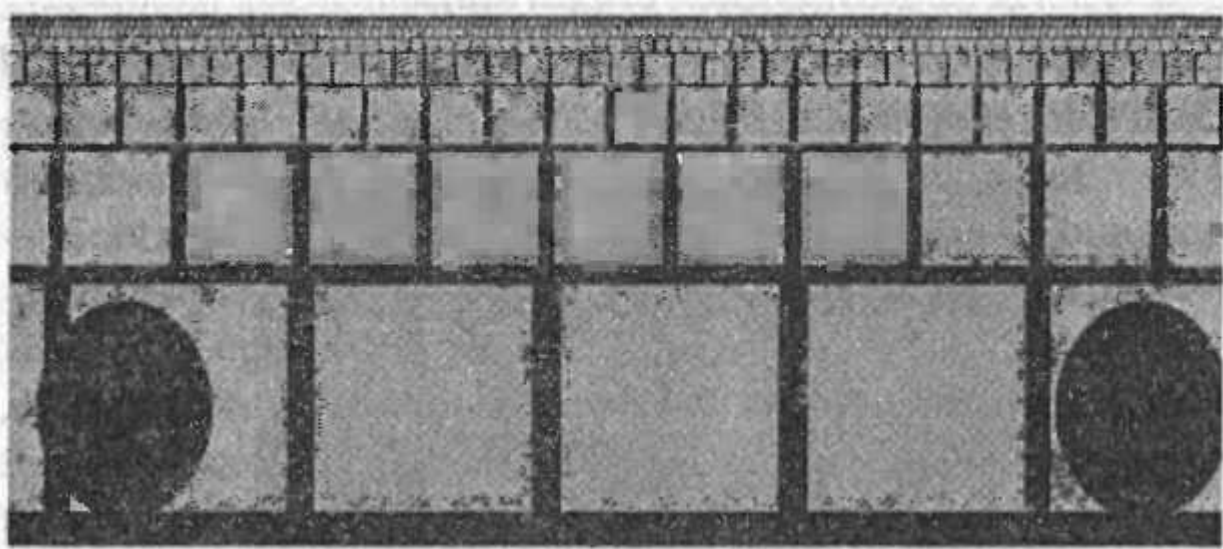
Если к моменту встречи возле УФ-браны у них будет достаточно энергии, возникнет обычная черная дыра: комок энергии, прилепленный к УФ-бране. Воспринимайте его как каплю жидкости, висящую на потолке. Биты информации, составляющие ее горизонт, имеют планковский размер.

УФ



ИК

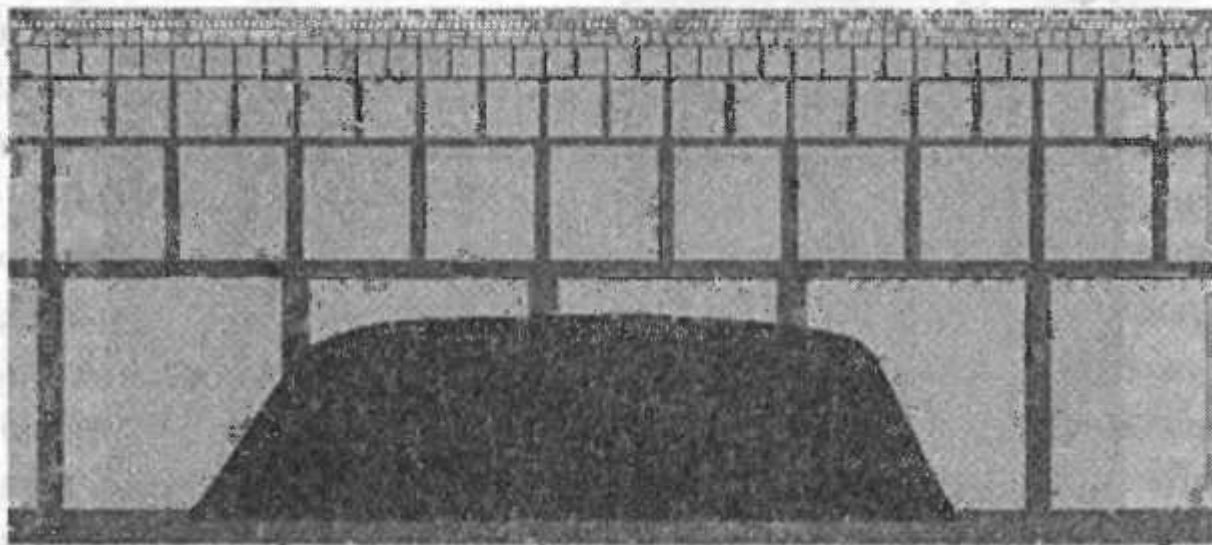
Вот это уж точно эксперимент, который мы вряд ли когда-нибудь сможем осуществить. Но теперь заменим гравитоны двумя ядрами (вблизи ИК-браны) и столкнем *их*.



***Два ядра вблизи ИК-браны перед столкновением***

Вот тут-то и проявляется вся мощь дуальности. Можно рассматривать это явление в четырехмерной версии, в которой два объекта сталкиваются и образуют черную дыру. На этот раз черная дыра будет находиться вблизи ИК-браны, словно большая лужа на полу. Сколько энергии на это потребуется? Гораздо меньше, чем для формирования черной дыры вблизи УФ-браны. На самом деле эта энергия легко достижима на RHIC.

УФ



ИК

Но можно также рассматривать процесс с трехмерной точки зрения. В этом случае адроны или ядра сталкиваются и порождают брызги из кварков и глюонов.

Поначалу, пока никто не понимал потенциальной связи КХД с физикой черных дыр, эксперты по КХД ожидали, что энергия столкновения породит газ из частиц, которые быстро разлетятся без всякого сопротивления. Но увидели они нечто совершенно иное: энергия удерживалась в форме, напоминавшей каплю жидкости, — так называемый *горячий кварковый суп*. Этот суп не похож на другие жидкости; у его потоков есть совершенно удивительные свойства, очень напоминающие не что иное, как горизонт черной дыры.

Все жидкости обладают вязкостью. Это разновидность трения, действующего между слоями жидкости, когда они скользят друг по другу. Именно по вязкости различаются очень густые жидкости вроде меда и гораздо более текучие, такие как вода. Вязкость — это не просто качественное понятие. Для любой жидкости можно определить точное числовое значение так называемой *сдвиговой вязкости*<sup>159</sup>.

Теоретики первоначально обратились к стандартному методу приближений и заключили, что горячий кварковый суп должен иметь очень высокую вязкость. Когда оказалось, что его вязкость поразительно мала<sup>160</sup>, все были крайне удивлены — все, за исключением нескольких струнных теоретиков.

Если использовать количественные оценки, то вязкость горячего кваркового супа оказывается самой низкой среди всех известных жидкостей и гораздо ниже, чем у воды. Даже сверхтекучий жидкий гелий (прежний чемпион по этому параметру) является значительно более вязким.

Встречается ли хоть где-то в природе столь низкая вязкость, как у горячего кваркового супа? Да, но не у обычных жидкостей. Горизонт черной дыры, если его возмутить, ведет себя подобно жидкости. Например, если маленькая черная дыра падает в черную дыру большего размера, она на время создает выступ на горизонте, подобно капле меда, упавшей на ровную поверхность наполненной медом тарелки. Выступ, возникший на горизонте, растекается как раз так, как это происходило бы с жидкостью, имеющей вязкость. Физики уже давно подсчитали вязкость горизонта, и если сопоставить ее с обычными жидкостями, то она оказывается значительно ниже, чем у сверхтекучего гелия. Когда струнные теоретики начали догадываться о связи между черными дырами и столкновениями ядер<sup>161</sup>, они поняли, что

<sup>159</sup> Слово «сдвиговая» относится к проскальзыванию одного слоя по другому.

<sup>160</sup> Строго говоря, так мала была его вязкость, деленная на энтропию жидкости.

<sup>161</sup> Павел Ковтун, Дэм Т. Сан и Андрей О. Старинец — трое теоретиков из Вашингтонского университета в Сиэтле, которые первыми обнаружили, какие свойства горячего квантового супа вытекают из голографического

среди всего прочего горячий кварковый суп больше всего похож на горизонт черной дыры.

Что в итоге происходит с каплей жидкости? Как и черная дыра, она испаряется – превращается в разнообразные частицы, включая нуклоны, мезоны, фотоны, электроны и нейтрино. Вязкость и испарение – всего лишь два из ряда свойств, которые объединяют горизонты и горячий кварковый суп.

Ядерная жидкость сейчас активно исследуется, чтобы понять, связаны ли аналогичным образом другие ее свойства с физикой черных дыр. Вели данная тенденция сохранится, то перед нами откроется удивительное окно в мир квантовой гравитации, раздутый в размерах и замедленный по частоте так, что планковская длина становится ненамного меньше протона, благодаря чему появится замечательная возможность подтвердить теории Хокинга и Бекенштейна, а также дополнительность черных дыр и голографический принцип.

Говорят, что мир – это лишь краткая интерлюдия между войнами. Но в науке, как справедливо отметил Томас Кун, верно обратное: большая часть «нормальной науки» делается в долгие мирные однообразные периоды между переворотами. Битва при черной дыре грозила полной реструктуризацией физических законов, но теперь мы видим, что она прокладывает свой путь для нормальной каждодневной исследовательской работы в области физики. Как и многие прежние революционные идеи, голографический принцип эволюционировал от радикального сдвига парадигмы до повседневного рабочего инструмента, причем, что удивительно, физиков-ядерщиков.

## 24

### Смирение

*Мы всего лишь усовершенствованная порода обезьян на малозначительной планете возле самой заурядной звезды. Но мы понимаем Вселенную. И это делает нас чем-то особенным.*

*– Стивен Хокинг*

Перепрошить свой мозг релятивистскими идеями весьма непросто, а квантово-механическими представлениями – еще труднее. Предсказуемость и детерминизм ушли, а не оправдавшие ожиданий классические законы логики были заменены квантовой логикой. Неопределенность и дополнительность были выражены на языке бесконечномерных гильбертовых пространств, математических отношений коммутативности и других странных порождений разума.

Но, несмотря на все перепрошивки XX века, по крайней мере до середины 1990-х годов реальность пространства-времени и объективность событий не подвергались сомнению. Всеми предполагалось, что квантовая гравитация не играет никакой роли, когда речь идет о крупномасштабных свойствах пространства-времени. Стивен Хокинг со своим информационным парадоксом непреднамеренно и даже против своей воли вынудил нас отбросить это предубеждение.

Новые представления о физическом мире, сформировавшиеся чуть более чем за десятилетие, включали новый тип релятивизма и новый тип квантовой дополнительности. Объективный смысл понятия одновременности (двух событий) был утрачен в 1905 году, но сама концепция события оставалась твердой как скала. Если внутри Солнца идет ядерная реакция, все наблюдатели согласятся, что это происходит именно внутри Солнца. Никто не регистрирует, что она протекает на Земле. Но в мощном гравитационном поле черной дыры происходит нечто новое, подрывающее саму объективность событий. События, которые падающий наблюдатель сочтет произошедшими глубоко внутри огромной черной дыры, другой наблюдатель регистрирует вне горизонта растворенными в шуме фотонов хокинговского излучения. Событие не может быть сразу *и* за горизонтом, *и* перед ним. Одно и то же событие располагается *или* за горизонтом, *или* перед ним в зависимости от

того, какой эксперимент ставит наблюдатель. Но даже крайняя странность дополнительности теряется рядом с удивительным голографическим принципом. Похоже, что крепкий трехмерный мир – это своего рода иллюзия, а реальные события происходят на границах пространства.

Для большинства из нас крах таких концепций, как одновременность (в специальной теории относительности) и детерминизм (в квантовой механике), – это какие-то темные парадоксы, которыми интересуются лишь немногие физики. Но в действительности верно обратное: это мучительная медлительность человеческих движений и неповоротливость человеческого тела массой  $10^{28}$  атомов являются странными природными аномалиями. Во Вселенной на каждого человека приходится около  $10^{80}$  элементарной частиц. Большинство из них движется со скоростью, близкой к световой, и крайне неопределенны – если не по своему местонахождению, то по скорости своего движения.

Слабость гравитации, испытываемой нами на Земле, – тоже исключение. Вселенная родилась в состоянии быстрого расширения; каждая точка пространства была со всех сторон окружена горизонтами, находящимися на расстоянии меньше размера протона. Самые заметные объекты Вселенной – галактики – построены вокруг гигантских черных дыр, которые постоянно заглатывают звезды и планеты. Из каждых 10 000 000 000 битов информации во Вселенной 9 999 999 999 связаны с горизонтами черных дыр. Должно быть ясно, что наши наивные идеи о пространстве, времени и информации совершенно негодны для понимания большей части природы.

Перепрошивка под квантовую гравитацию еще далека от завершения. Не думаю, что у нас уже есть подходящая концепция для замены старой парадигмы объективного пространства-времени. Мощная математика теории струн очень полезна. Она дает нам четкую структуру для проверки идей, которые в противном случае можно было бы обосновывать лишь философски. Но теория струн – это еще незавершенная работа. Мы не знаем ее первичных принципов, как и того, является она глубочайшим уровнем реальности или же лишь очередной временной теорией на нашем пути. Битва при черной дыре преподнесла нам несколько очень важных и неожиданных уроков, но они лишь намекают на то, сколь отлична реальность от наших ментальных моделей, даже после того, как они были перепрошиты релятивизмом и квантовой механикой.

### Космические горизонты

Битва при черной дыре окончена (это заявление может возмутить небольшую кучку людей, все еще продолжающих воевать), но сразу вслед за ее завершением природа, будучи великим мастером неожиданностей, совершила новый финт. Примерно в то же время, когда Малдасена сделал свое открытие, физики (с подачи космологов) стали приходить к выводу, что мы живем в мире с не исчезающе малой *космологической постоянной*. Эта поразительно малая фундаментальная константа<sup>162</sup> намного меньше всех других физических постоянных, но именно она главным образом определяет будущую историю Вселенной.

Космологическая постоянная, известная также как темная энергия, почти столетие вызывала беспокойство в стане физиков. В 1917 году Эйнштейн размышлял о возможности существования особого типа антигравитации, которая будет заставлять все на свете взаимно отталкиваться, противодействуя обычной притягивающей гравитации. Это ни в коей мере не были досужие домыслы, – они надежно опирались на математику общей теории относительности. В ее уравнениях оставалось место для дополнительного члена, который Эйнштейн назвал космологическим. Величина новой силы была пропорциональна новой фундаментальной константе, так называемой космологической постоянной, обозначаемой

---

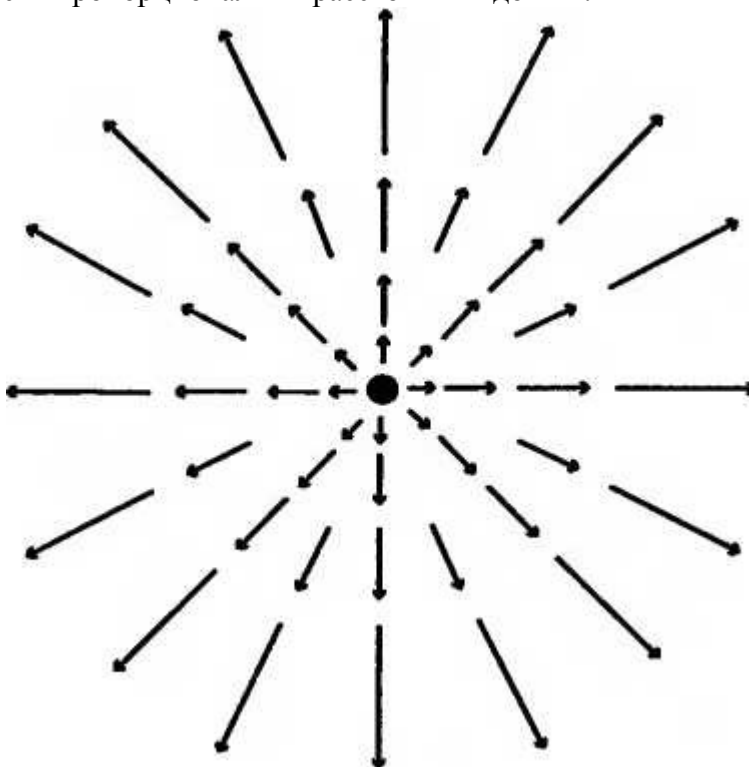
<sup>162</sup> Численное значение космологической постоянной в планковских единицах – примерно 10-123. Подозрение о том, что она отлична от нуля, возникло в середине 1980-х годов у некоторых космологов, внимательно изучавших астрономические данные. Но более десятилетия эти соображения не привлекали большого внимания физического сообщества. Невероятная малость значения космологической постоянной обманула почти всех физиков, полагавших, что ее просто не существует.

греческой буквой лямбда ( $\Lambda$ ). Если  $\Lambda$  положительна, космологический член порождает отталкивающую силу, увеличивающуюся с расстоянием; если она отрицательна, новая сила будет притягивающей; при нулевом значении  $\Lambda$  никакой силы нет и космологический член можно игнорировать.

Поначалу Эйнштейн предположил, что  $\Lambda$  должна быть положительной, но вскоре эта идея ему разонравилась, он назвал ее своей величайшей ошибкой, и это высказывание получило широкую известность. Всю дальнейшую жизнь он во всех своих уравнениях полагал  $\Lambda$  равной нулю. Большинство физиков соглашались с Эйнштейном, хотя они и не понимали, почему в уравнениях не должно быть  $\Lambda$ . Но в прошлом десятилетии появились убедительные астрономические аргументы в пользу небольшого положительного значения космологической постоянной.

Космологическая постоянная и все связанные с ней загадки и парадоксы стали предметом моей книги «Космический ландшафт». Здесь же я расскажу лишь о самом важном следствии: отталкивающая сила, действующая на космологических расстояниях, заставляет пространство *экспоненциально* расширяться. В расширении Вселенной нет ничего нового, но без космологической постоянной его скорость должна постепенно снижаться. На самом деле оно даже может обратиться вспять, сменившись сжатием, которое в конце концов, приведет к гигантскому космическому схлопыванию. Напротив, благодаря космологической постоянной Вселенная, похоже, удваивает свои размеры примерно каждые пятнадцать миллиардов лет, и все указывает на то, что так будет продолжаться бесконечно.

В расширяющейся Вселенной, или, коли на то пошло, на расширяющемся воздушном шаре, чем больше расстояние между двумя точками, тем быстрее они удаляются друг от друга. Связь между расстоянием и скоростью называется законом Хаббла, согласно которому скорость удаления любых двух точек пропорциональна разделяющему их расстоянию. Любой наблюдатель, где бы он ни располагался, видит, что далекие галактики удаляются, а их скорости пропорциональны расстояниям до них.



Если заглянуть достаточно далеко в такую расширяющуюся Вселенную, то можно найти точку, где галактики удаляются от вас со скоростью света. Одно из самых удивительных свойств экспоненциально расширяющейся Вселенной состоит в том, что расстояние до этой точки никогда не меняется. Похоже, что в нашей Вселенной на расстоянии около пятнадцати миллиардов световых лет объекты удаляются от нас со скоростью света, но что еще важнее – так будет вечно.



В этом есть что-то знакомое, хотя и в новом ракурсе. Вспоминается озеро с головастиками из главы 2. В определенной точке Алиса, если она плывет по течению, проходит мимо точки невозврата и удаляется от Боба со скоростью звука. Нечто подобное происходит во вселенском масштабе. Во всех направлениях, куда бы мы ни бросили взгляд, галактики пересекают точку невозврата, за которой они удаляются от нас быстрее света. Каждый из нас окружен *космологическим горизонтом* – сферой, на которой все предметы удаляются от нас со скоростью света, – и никакой сигнал не может прийти к нам из-под горизонта. Когда звезды проходят точку невозврата, они исчезают навсегда. Очень далеко, примерно в пятнадцати миллиардах световых лет, наш космологический горизонт проглатывает галактики, звезды и, возможно, даже жизнь. Как будто каждый из нас живет внутри своей собственной личной, вывернутой наизнанку черной дыры.



Существуют ли на самом деле миры, подобные нашему, которые давным-давно пересекли горизонт и потеряли всякую связь с тем, что мы когда-либо сможем наблюдать? Хуже того: неужели большая часть Вселенной навсегда останется недостижимой для нашего познания? Это очень тревожит некоторых физиков. Есть философская позиция, согласно которой, если нечто ненаблюдаемо – ненаблюдаемо в принципе, – это не может быть предметом науки. Если не существует способа опровергнуть или подтвердить гипотезу, то она принадлежит сфере метафизических спекуляций наряду с астрологией и спиритизмом. По таким стандартам придется признать, что большая часть Вселенной не обладает научной реальностью – это лишь порождение нашего воображения.

Но отбросить большую часть Вселенной как абсурд довольно затруднительно. Нет никаких признаков того, что галактики редуют или исчезают у горизонта. Согласно астрономическим наблюдениям, они есть всюду, куда можно заглянуть с помощью телескопа. Что нам делать в такой ситуации?

В прошлом уже бывали случаи, когда «ненаблюдаемые» вещи отбрасывались как ненаучные. Яркий пример – эмоции других людей. Целая психологическая школа – бихевиоризм – строится на том принципе, что эмоции и внутренние состояния сознания ненаблюдаемы, а потому никогда не должны упоминаться в научной дискуссии.

Бихевиористская психология признает полноценными фактами лишь наблюдаемое поведение подопытных – движения их тел, мимику, температуру, кровяное давление. Бихевиоризм имел огромное влияние в середине двадцатого века, но сегодня большинство людей считают его экстремальной точкой зрения. Возможно, нам просто следует относиться к мирам, находящимся за горизонтом, так же, как мы относимся к тому, что другие люди обладают недоступной нам внутренней жизнью.

Но возможен и более удачный ответ. Свойства космологических горизонтов, по-видимому, очень похожи на свойства горизонтов черных дыр. Математика ускоряющейся (экспоненциально расширяющейся) Вселенной говорит, что по мере приближения объекта к космологическому горизонту мы будем видеть, как он замедляется. Если бы мы могли отправить в окрестности космологического горизонта термометр, прикрепленный к концу длинного кабеля, то обнаружили бы, что температура возрастает и в конце концов достигает бесконечности на самом горизонте. Означает ли это, что все люди на далеких планетах поджарятся? Ответ: не в большей и не в меньшей степени, чем вблизи черной дыры. Для наблюдателей, движущихся вместе с потоком, пересечение космологического горизонта – это не-событие, а просто математическая точка невозврата. Но наши собственные наблюдения, дополненные математическим анализом, будут говорить, что эти наблюдатели приближаются к области невероятно высокой температуры.

Что случится с битами их информации? Те же аргументы, которые использовал Хокинг, доказывая, что черные дыры излучают, говорят нам, что и космологический горизонт тоже излучает. Но в данном случае излучение направлено не наружу, а внутрь, как если бы мы жили в комнате с теплыми излучающими стенами. С нашей точки зрения все выглядит так, как если бы предметы, приближаясь к горизонту, разогревались и начинали испускать фотоны. Может ли существовать принцип космологической дополненности?

*Для наблюдателя внутри космологического горизонта последний кажется состоящим из «атомов горизонта», которые поглощают, перемещивают и затем возвращают назад все биты информации. Для свободно движущегося наблюдателя, пересекающего космологический горизонт, этот момент не является событием.*

В настоящее время, однако, мы слишком плохо понимаем космологические горизонты. Смысл объектов, находящихся за горизонтом – реальны ли они и какую роль играют в нашем описании Вселенной, – может быть глубочайшим вопросом для космологии.

Что касается наследия Хокинга, то оно колоссально. Его предшественники знали, что провал между гравитацией и квантовой теорией рано или поздно будет преодолен, но Бекенштейн и Хокинг были первыми, кто достиг далекой страны и вернулся с золотом. Именно они положили этому начало, и я надеюсь, что будущие историки науки это признают.

Падающие камни и движущиеся по орбитам планеты – это лишь слабые намеки на то, что представляет собой гравитация. Черные дыры – это не просто чрезвычайно сильно сжатые звезды, скорее это конечные резервуары для информации, где все биты плотно упакованы, словно уложенные рядами пушечные ядра, но только меньше размером на тридцать четыре порядка. Именно вокруг этого – плотно упакованной информации и энтропии – и крутится вся квантовая гравитация.

И пусть на собственный вопрос Хокинг дал ошибочный ответ, но сам его вопрос был одним из глубочайших в физике последнего времени. Возможно, его мозг был слишком классически прошит, слишком привержен представлению о пространстве и времени как о предзаданном, пусть и гибком холсте, на котором пишется физика, чтобы осознать глубокие следствия примирения квантового сохранения информации с гравитацией. Но сам вопрос смог открыть путь для следующей большой концептуальной революции в физике. Немногим физикам доводилось сделать такое утверждение.

Кто никогда ни в чем не терпел поражения, тот не может быть велик.

– Герман Мелвилл.

## Сущность физики

Воцаряются смущение и дезориентация; распадается связь причин и следствий; уверенность исчезает без следа; все старые законы перестают выполняться. Вот что случается, когда рушится доминирующая парадигма.

Но потом появляются новые схемы. Сперва в них нет смысла, но это схемы. Что делать? Бери эти схемы и классифицируй, квантифицируй, кодифицируй их с помощью новой математики и даже новой логики, если необходимо. Смени старую прошивку на новую и хорошенько с ней ознакомься. Это знакомство вызывает если не отвращение, то как минимум чувство смирения с неизбежным.

Весьма вероятно, что мы все равно останемся запутавшимися новичками с совершенно ошибочными умозрительными картинками, подлинная же реальность будет очень далека от нашего понимания. На ум приходит старый картографический термин *terra incognita*. Чем больше мы открываем, тем, кажется, меньше мы знаем. Это и есть сущность физики.

## Эпилог

В 2002 году Стивен Хокинг отметил свой шестидесятилетний юбилей. Мало кто на подобное надеялся, и меньше других – его доктора. Событие отмечалось как большой праздник, была поистине грандиозная вечеринка, так что я вновь оказался в Кембридже в окружении сотен людей – физиков, журналистов, рок-звезд, музыкантов, двойника Мэрилин Монро, танцовщиц кордебалета, – а также огромного количества еды, вина и ликеров. Это было гигантское медиасобытие, приуроченное к серьезной физической конференцией. Все, кто хоть что-то значил в научной жизни Стивена, выступали с речами, включая самого Стивена. Вот короткая выдержка из моего выступления.

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 глубоким вопросам, касающимся черных 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 волосатой.

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 чем я думал начиная с 1983 года, в том или ином смысле отвечало на его глубочайший вопрос о судьбе информации, падающей в черную дыру. Хотя я твердо убежден, что его ответ был ошибочным, сам вопрос Стивена вкупе с требованием убедительного ответа вынудил нас переосмыслить основания физики. Результатом стала совершенно новая парадигма, которая сегодня обретает форму. Я глубоко польщен возможностью отметить здесь монументальный вклад Стивена и особенно его блистательное упрямство.

Здесь мной было продумано каждое слово.

Я запомнил только три других выступления. Два из них – Роджера Пенроуза. Я не припомню, почему Роджер выступал дважды, но так уж случилось. В первый раз он доказывал, что информация должна теряться при испарении черной дыры. Аргументы были теми же, что приводил Стивен двадцать шесть лет назад, и Роджер подтвердил, что они со Стивеном по-прежнему в них верят. Я удивился: насколько было известно мне (и всякому, кто следил за последними научными результатами), матричная теория Малдасены и расчеты

энтропии Строминджера и Вафы поставили окончательную точку в этом вопросе.

Но в своем втором выступлении Роджер заявил, что голографический принцип и работа Малдасены основаны на ряде недоразумений. Попросту говоря, он заявил: «Как это возможно, чтобы физика большего числа измерений описывалась теорией в меньшем числе измерений?» Я счел, что он просто недостаточно над этим подумал. Мы с Роджером были друзьями сорок лет, и я знал его как бунтаря, вечно восстающего против общепринятого здравого смысла. Так что меня не должно было удивлять, что он встал в оппозицию.

А еще у меня в памяти засело выступление Стивена, но не из-за того, что он сказал, а из-за того, о чем умолчал. Он кратко напомнил о главных достижениях своей карьеры – космологии, хокинговском излучении, замечательных комиксах, но он ни единым словом не упомянул о потере информации. Быть может, он начинал колебаться? Я думаю, так и есть.

Позже, на пресс-конференции в 2004 году Хокинг объявил о том, что изменил свое мнение. Его новейшие исследования, сказал Стивен, наконец привели к разрешению его собственного парадокса: похоже, что, в конечном счете, информация все же утекает из черных дыр и уносится прочь продуктами испарения. По словам Стивена, этот механизм каким-то образом постоянно ускользал, но он наконец заметил его и сообщит о своих новых выводах на предстоящей конференции в Дублине. СМИ пришли в полную готовность и, затаив дыхание, ожидали конференции.

#### *Предсказуема ли квантовая гравитация ?*

*Дон Пейдж ставит против Стивена Хокинга один фунт стерлингов на то, что соблюдается квантовая космическая цензура, а именно что чистое начальное состояние, построенное целиком из обычных конфигураций поля на полной, асимптотически плоской гиперповерхности, будет описываться уникальной S-матрицей, которая по законам физики эволюционирует к чистому конечному состоянию, построенному целиком из обычных конфигураций поля на полной, асимптотически плоской гиперповерхности.*

*Стивен Хокинг ставит против Дона Пейджа \$1,00 на то, что в квантовой гравитации эволюция такого чистого начального состояния может описываться в общем случае только S-матрицей для смешанного конечного состояния и не всегда S-матрицей для чистого конечного состояния.*

*Дон Н. Пейдж*

*«Я сдаюсь ввиду ослабления \$»*

*Стивен Хокинг, 23 апреля 2007*

Газеты также сообщили, что Стивен рассчитается по пари с Джоном Прескиллом (который встревожил меня в Санта-Барбаре своим остроумным мысленным экспериментом). В 1997 году Джон побился об заклад со Стивеном, что информация *выходит* из черных дыр. Ставкой была бейсбольная энциклопедия.

Совсем недавно я узнал, что в 1980 году Дон Пейдж заключил со Стивеном похожее пари. Как я и заподозрил на основе доклада Дона в Санта-Барбаре, он уже давно скептически относился к утверждению Стивена. 23 апреля 2007 года, за два дня до того, как был написан этот абзац, Стивен формально сдался. Дон был столь любезен, что прислал мне фотокопию оригинального контракта – пари на один британский фунт против одного американского доллара – с подписью Стивена, подтверждающей поражение. Темное пятно в конце – это отпечаток пальца Стивена.

## How Predictable Is Quantum Gravity?

Don Page bets Stephen Hawking one pound Sterling that strong quantum cosmic censorship holds, namely, that a pure initial state composed entirely of regular field configurations on complete, asymptotically flat hypersurfaces will have a unique S-matrix evolution under the laws of physics to a pure final state composed entirely of regular field configurations on complete, asymptotically flat hypersurfaces.

Stephen Hawking bets Don Page \$1.00 that in quantum gravity the evolution of such a pure initial state can be given in general only by a  $\mathcal{H}$ -matrix to a mixed final state and not always by an S-matrix to a pure final state.

"I concede in light of the weariness of the \$"

Don N. Page

Superintendent

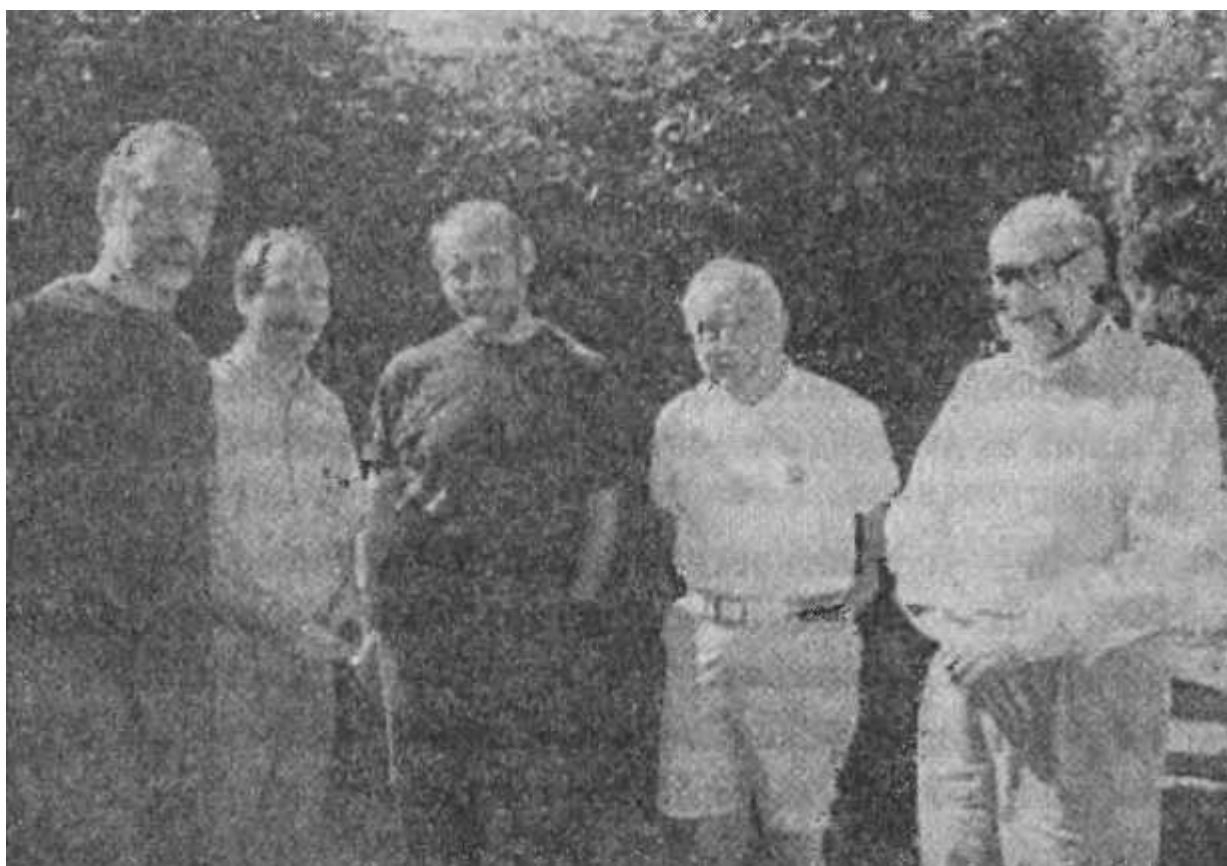
Stephen Hawking, 23 April 2007

Что сказал Стивен в своей лекции? Я не знаю, меня там не было. Но написанная через несколько месяцев статья дала некоторые подробности. Их было немного: краткая история парадокса, словесное изложение некоторых аргументов Малдасены и мучительное окончательное объяснение того, как все всё время были правы.

Но все не были правы.

В последние годы ряд очень спорных вопросов подавался под видом научных дискуссий, но реально это были политические баталии. Это и полемика о разумном замысле; и о том, происходит ли на самом деле глобальное потепление, и если да, то является ли оно антропогенным; и о пользе дорогой системы противоракетной обороны; и даже о теории струн. К счастью, не все научные дебаты вырождаются в полемику. Время от времени

появляется реальное различие в суждениях по важным вопросам, и это ведет к новым открытиям и даже к смене парадигм. Битва при черной дыре – это пример дискуссии, которая никогда не скатывалась до уровня полемики; она касалась подлинных расхождений во взглядах на противоречивые научные принципы. Хотя вопрос о том, теряется ли информация в черных дырах, поначалу, конечно, был спорным, научные представления о нем теперь в основном объединились вокруг новой парадигмы. Но хотя битва и окончена, я сомневаюсь, что мы полностью усвоили эти важные уроки. Самая большая проблема теории струн состоит в том, как применить ее к реальному миру. Голографический принцип ярко подтвержден малдасеновской теорией антидеситтеровского пространства. Мы живем в расширяющейся Вселенной, которая, если уж на то пошло, больше похожа на пространство де Ситтера с его космологическими горизонтами и пузырящимися вселенными-карманами. Сегодня никто не знает, как применить теорию струн, голографический принцип и другие наши знания о горизонтах черных дыр к космологическим горизонтам, но, скорее всего, между ними есть очень глубокие взаимосвязи. Лично я думаю, что эти связи лежат в основе многих космологических загадок. Надеюсь, когда-нибудь я еще напишу книгу, объясняющую, как тут все в конечном счете работает, но не думаю, что это случится очень скоро.



Клаудио Тейтельбойм, Герард т Хооф, автор книги, Джон Улер и Франсуа Энглер, Вальпараисо, 1994



Стивен и автор книги, Вальдивия, Чили, 2008

## Глоссарий

**D-брана** – поверхность в пространстве-времени, на которой могут оканчиваться фундаментальные струны.

**RHIC** – релятивистский коллайдер тяжелых ионов; ускоритель, разгоняющий тяжелые ядра почти до скорости света и сталкивающий их для создания сгустков очень горячего ядерного вещества.

**S-матрица** – математическое описание столкновения частиц; S-матрица – это список всех возможных исходных состояний и амплитуды вероятностей для всех возможных исходов.

**адроны** – частицы, тесно связанные с атомными ядрами: нуклоны, мезоны и глюболы; адроны состоят из кварков и глюонов, **антидеситтеровское пространство** – пространство-время с постоянной отрицательной кривизной, напоминающее сферическую шкатулку.

**белый карлик** – конечная стадия эволюции звезды малой массы: до солнечной или немного больше.

**бит** – фундаментальная единица информации.

**броуновское движение** – хаотическое движение частиц пылицы, помещенных в воду; оно вызвано постоянной бомбардировкой молекулами воды, находящимися в тепловом движении.

**второе начало термодинамики** – закон возрастания энтропии, вязкость – трение между слоями жидкости, когда они смещаются друг относительно друга.

**гамма-излучение** – самые короткие и самые энергичные электромагнитные волны.

**геодезическая** – наилучшее приближение к прямой линии в искривленном

пространстве; кратчайший путь между точками.

**герц** — единица частоты, применяемая для измерения количества колебаний, совершаемых в секунду.

**глухая дыра** — сточное отверстие, в котором скорость потока превышает скорость звука (в воде) вблизи самой дыры.

**глюбол** — адрон, состоящий только из глюонов, без кварков; глюболы представляют собой замкнутые струны.

**глюоны** — частицы, которые соединяются в струны, связывающие кварки.

**голограмма** — двумерное представление трехмерной информации; разновидность фотографии, по которой может быть восстановлено трехмерное изображение.

**голографический принцип** — принцип, утверждающий, что вся информация содержится на границе области пространства.

**горизонт** — поверхность, внутри которой ничто не может уйти от сингулярности черной дыры.

**граничная теория** — математическая теория о границе области пространства, которая описывает все, что находится внутри области.

**грок** — понимание чего-либо на глубоко интуитивном уровне, способность «нутром чувствовать» что-либо.

**детерминизм** — принцип классической физики, утверждающий, что будущее полностью предопределяется настоящим; подорван квантовой механикой.

**диаграмма вложения** — представление пространства-времени в определенный момент, построенное путем «нарезания» пространственно-временного континуума на тонкие слои.

**длина волны** — расстояние, приходящееся на один полный период волны, от гребня до гребня.

**доллар-матрица** — хокинговская попытка заменить S-матрицу.

**дополнительность черных дыр** — принцип дополнительности Бора, примененный к черным дырам.

**замкнутая струна** — струна, не имеющая концов, подобно резиновому кольцу.

**ИК** — инфракрасный; часто используется для указания на большие размеры.

**интерференция** — волновое явление, при котором волны от двух отдельных источников гасятся или усиливают друг друга в определенных местах.

**информация** — данные, которые отличают одно положение дел от другого; измеряется в битах.

**инфракрасное излучение** — электромагнитные волны с длиной несколько большей, чем у видимого света.

**квантовая гравитация** — теория, объединяющая квантовую механику с эйнштейновской теорией относительности, квантовая теория гравитации; в настоящее время еще не завершенная теория.

**квантовая теория поля** — математическая теория, которая объединяет корпускулярные и волновые свойства материи; основа физики элементарных частиц.

**квантовая хромодинамика** — квантовая теория поля, описывающая кварки и глюоны и то, как из них образуются адроны.

**классическая физика** — физика, которая не принимает в расчет квантовую механику; термин обычно означает детерминистическую физику.

**корпускулы** — ньютоновский термин для гипотетических частиц света.

**кривизна** — деформация пространства-времени.

**КХД** — квантовая хромодинамика.

**КХД-струны** — струны, состоящие из глюонов, которые связывают кварки в адроны.

**магнитное поле** — силовое поле, окружающее магниты и электрические токи.

**микроволны** — электромагнитные волны, длина которых несколько меньше, чем у радиоволн.



**мировая линия** — траектория частицы в пространстве-времени.

**нейтронная звезда** — конечное состояние звезды, слишком массивной, чтобы образовать белый карлик, но недостаточно большой, чтобы сколлапсировать в черную дыру.

**нуклон** — протон или нейтрон.

**нулевые колебания** — непрерывные движения квантовой системы, от которых невозможно избавиться в силу принципа неопределенности; также называются *квантовой дрожью*.

**общая теория относительности** — теория гравитации Эйнштейна, построенная на представлении о кривизне пространства-времени.

**одновременность** — совершение событий в одно и то же время. С момента появления специальной теории относительности одновременность больше не считается объективным явлением.

**основное состояние** — состояние квантовой системы с наименьшей возможной энергией; часто отождествляется с температурой абсолютного нуля.

**осциллятор** — любая система, подверженная периодическим колебаниям.

**открытая струна** — струна с двумя концами.

**резиновое кольцо** — это замкнутая струна, но если разрезать его ножницами, получится открытая струна.

**первое начало термодинамики** — закон сохранения энергии.

**планковская длина** — единица длины в системе единиц, в которой три фундаментальные постоянные  $c$ ,  $h$ , и  $G$  приравнены к единице; часто считается наименьшей осмысленной длиной,  $10^{-33}$  сантиметра.

**планковская масса** — единица массы в планковской системе единиц;  $10^{-8}$  килограмма.

**планковское время** — единица времени в планковской системе единиц;  $10^{-42}$  секунды.

**постоянная Ньютона** — числовая постоянная  $G$  в ньютоновском законе всемирного тяготения;  $G = 6,7 \times 10^{-11}$  в единицах системы Си.

**постоянная Планка** — числовая постоянная  $h$ , управляющая квантовыми явлениями.

**приливные силы** — деформирующие силы, связанные с изменением силы гравитации в разных частях пространства.

**принцип квантовой нескерокопируемости** — теорема квантовой механики, которая исключает возможность создания машины, которая идеально копирует квантовую информацию; другое название: *принцип неклонирования*.

**принцип неопределенности Гейзенберга** — принцип квантовой механики, который ограничивает возможность одновременного определения положения и скорости.

**принцип эквивалентности** — эйнштейновский принцип, утверждающий, что гравитация неотличима от ускорения, например, в лифте.

**радиоволны** — самые длинные электромагнитные волны.

**рентгеновское излучение** — электромагнитные волны, длина которых меньше, чем у ультрафиолетового излучения, но больше, чем у гамма-излучения.

**сингулярность** — бесконечно плотная точка в центре черной дыры, где приливные силы обращаются в бесконечность.

**скорость света** — скорость, с которой движется свет в вакууме; обозначается буквой  $c$  и составляет около 300 тысяч километров в секунду.

**скорость убегания** — минимальная скорость, с которой снаряд может вырваться из гравитационного притяжения массивного объекта.

**собственное время** — время, измеренное по движущимся часам; мера длины для мировой линии.

**событие** — точка в пространстве-времени.

**специальная теория относительности** — теория Эйнштейна 1905 года, имеющая дело с парадоксами скорости света; теория говорит, что время — это четвертое измерение.

**темная звезда** — звезда, настолько тяжелая и плотная, что свет не может от нее уйти; сегодня называется *черной дырой*.

**температура** — мера увеличения энергии системы при добавлении одного бита энтропии.

**теория струн** — математическая теория, в которой элементарные частицы — это микроскопические одномерные струны энергии; кандидат на роль квантовой гравитации.

**точка невозврата** — аналогия для горизонта черной дыры.

**туннелирование** — квантово-механическое явление, благодаря которому частицы преодолевают барьер, несмотря на то что у них недостаточно энергии, чтобы сделать это классически.

**ультрафиолетовое излучение** — электромагнитные волны, длина которых несколько меньше, чем у видимого света.

**УФ** — ультрафиолетовый; часто используется для указания на малые размеры.

**фотоны** — неделимые кванты (частицы) света.

**фундаментальные струны** — крошечные гибкие нити энергии, из которых состоят элементарные частицы, например гравитоны; считается, что размер фундаментальных струн ненамного превосходит планковскую длину.

**хокинговская температура** — температура черной дыры.

**хокинговское излучение** — чернотельное излучение, испускаемое черной дырой.

**черная дыра** — объект, настолько массивный и плотный, что из его притяжения невозможно вырваться.

**чернотельное излучение** — электромагнитное излучение, испускаемое неотражающим телом за счет своего собственного тепла.

**шварцшильдовский радиус** — радиус горизонта черной дыры.

**экстремальная черная дыра** — электрически заряженная черная дыра, которая обладает наименьшей возможной массой при данном заряде.

**электрическое поле** — силовое поле, окружающее электрические заряды.

**электромагнитные волны** — волнообразные возмущения пространства, состоящие из колеблющихся электрических и магнитных полей; световые и электромагнитные волны.

**энтропия** — мера скрытой информации; часто информация, сохраняющаяся в слишком малых и многочисленных для отслеживания объектах.