

НАУКА  
ЗА КАДРОМ  
ИНТЕРСТЕЛЛАР

---

КИП ТОРН

ПРЕДИСЛОВИЕ КРИСТОФЕРА НОЛАНА.

## Червоточины

### Откуда взялось название «червоточина»

И

Название астрофизическим червоточинам придумал мой научный руководитель Джон Уилер. Он использовал сравнение с червоточинами в яблоках (рис. 14.1). Для муравья, который ползает по яблоку, поверхность яблока — это целая вселенная. Если плод насквозь проеден червем, муравей может попасть с верхней части яблока на нижнюю двумя способами: проползти снаружи (через свою вселенную) или спустившись по червоточине. Путь через червоточину короче, это способ срезать дорогу, быстрее попав с одной стороны муравьиной вселенной на другую.

Аппетитная мякоть яблока, через которую проходит червоточина, не относится к муравьиной вселенной. Это трехмерный балк, или гиперпространство (см. главу 4). С одной стороны, стенки червоточки можно считать частью муравьиной вселенной — их поверхности имеют одну и ту же мерность (два измерения) и смыкаются со вселенной (с поверхностью яблока) на входе в червоточину. Но с другой — стенки червоточки не принадлежат муравьиной вселенной, это просто короткий путь через балк, по которому муравей может попасть из одной точки своей вселенной в другую.

Рис. 14.1. Муравей исследует яблоко с червоточиной



## Червоточина Фламма

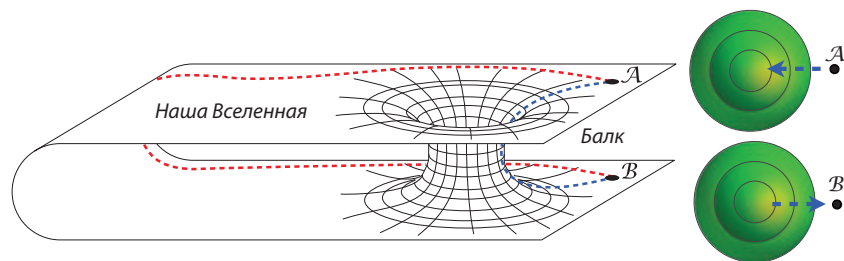
И

В 1916 году, всего через год после того, как Эйнштейн сформулировал законы общей теории относительности, Людвиг Фламм из Вены нашел решение уравнений Эйнштейна, которое описывает червоточину (хоть Фламм ее так и не называл). Сейчас мы знаем, что уравнения Эйнштейна допускают существование червоточин разной формы и разных свойств, но червоточина Фламма — единственная из них в точности сферическая и не содержащая гравитирующей материи\*. Если мы сделаем экваториальный срез червоточины Фламма, так чтобы и она, и наша Вселенная (наша брана) имели два измерения вместо трех, а затем посмотрим на нашу Вселенную и на червоточину из балка, то они будут выглядеть как показано на левой части рис. 14.2.

Поскольку одно из измерений нашей Вселенной на этом рисунке отсутствует, вам следует думать о себе как о двумерном существе, перемещения которого ограничены поверхностью изогнутого «листа» или двумерных стенок червоточины. Есть два способа попасть из пункта *A* нашей Вселенной в пункт *B*: короткий путь (синий пунктир) по стенке червоточины и длинный путь (красный пунктир) по поверхности «листа» нашей Вселенной.

Разумеется, пространство нашей Вселенной трехмерно, а не двумерно. И концентрические окружности на левой части рис. 14.2 — это на самом деле вложенные одна в другую зеленые сферы, показанные на правой части рисунка. Войдя в червоточину и двигаясь по идущему от точки *A* синему пунктиру, вы будете проходить через сферы всё меньшего и меньшего размера. Затем сферы, хоть они и вложены одна в другую, перестанут менять размер. А потом, по мере того как вы будете выбираться из червоточины, приближаясь к точке *B*, величина сфер начнет расти.

Рис. 14.2. Червоточина Фламма



\* То есть материи, которая обладает гравитационной массой, создающей вокруг себя гравитационное поле. *Прим. перев.*

В течение девятнадцати лет физики почти не обращали внимания на экстравагантный вывод из уравнений Эйнштейна, предложенный Фламмом, — на его червоточину. Затем в 1935 году сам Эйнштейн и его коллега, физик Натан Розен, не зная о работах Фламма, самостоятельно пришли к тому же выводу, в подробностях исследовали его и принялись размышлять о его значимости для реального мира. Другие физики, также не зная о решении Фламма, стали называть его червоточину мостом Эйнштейна — Розена.

## Схлопывание червоточины



Зачастую из уравнений эйнштейновской теории сложно понять, что, собственно, из них следует. Червоточина Фламма — хороший тому пример. С 1916 до 1962 года, почти полвека, физики считали, что червоточины статичны, никогда не меняются. Затем Джон Уилер и его студент Роберт Фуллер выяснили, что это не так. Пристально изучив уравнения, они обнаружили, что червоточины рождаются, расширяются и умирают, как показано на рис. 14.3.

Сначала (а) в нашей Вселенной есть две сингулярности. Со временем сингулярности сближаются через балк и, встретившись, образуют червоточину (b). Червоточина расширяется (c, d), а потом сжимается (e) до тех пор, пока не схлопнется, разделившись на две сингулярности (f). Рождение, расширение, сжатие и схлопывание происходят очень быстро, и ничто — даже свет — не успевает проникнуть по червоточине с одной стороны на другую.

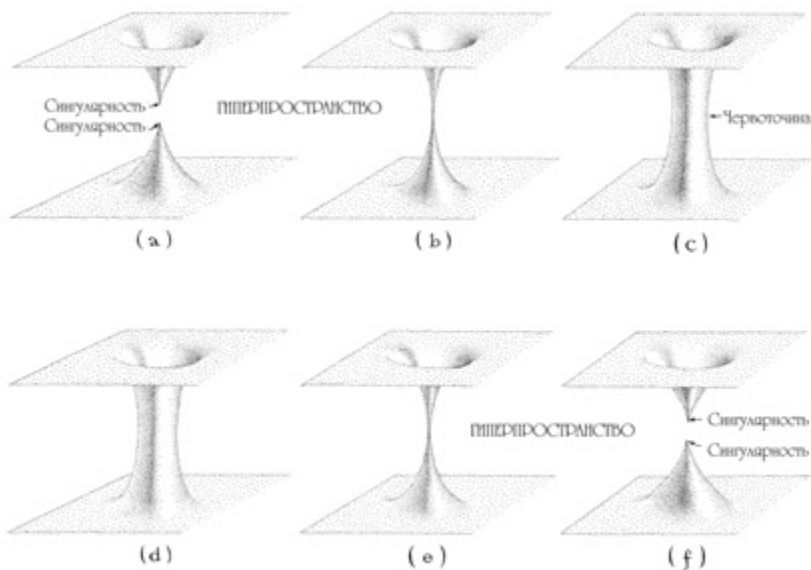


Рис. 14.3. Динамика червоточины Фламма (моста Эйнштейна — Розена) (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из книги [Торн 2009].)

Такой ход событий неизбежен. Если бы во Вселенной когда-либо, каким-либо образом возникла сферическая червоточина, не содержащая гравитирующей материи, она, согласно законам теории относительности, вела бы себя именно так.

Уилер не испугался этих выводов. Напротив, он был доволен, поскольку считал сингулярности (места, где пространство — время — кажется бесконечно) «кризисом законов физики». А кризисы многому учат: внимательно их исследуя, можно узнать много ценного.

## «Контакт»



Перенесемся на четверть века вперед. В мае 1985 года мне позвонил Карл Саган и попросил дать отзыв о его готовящемся к выходу в печать романе «Контакт»\* в плане соблюдения законов теории относительности. Я с радостью согласился (мы с Карлом близкие друзья, само задание казалось интересным, и к тому же я чувствовал себя обязанным за то, что он познакомил меня с Линдой Обст).

Карл прислал мне рукопись, я прочитал ее, и мне очень понравилось. Но обнаружилась одна проблема: он отправил свою героиню, доктора Элиноэр Эрроузэй, из Солнечной системы к звезде Вега через черную дыру. Я знал, что недра черной дыры не могут стать дорогой к Веге, как и к любому другому пункту в нашей Вселенной. Проникнув за горизонт черной дыры, доктор Эрроузэй погибла бы — ее бы убила сингулярность. Чтобы быстро добраться до Веги, требовалась червоточина, а не черная дыра. Но это должна была быть червоточина, которая не схлопывается; проходимая червоточина.

Поэтому я спросил себя: что я должен сделать с червоточиной Фламма, чтобы она не схлопывалась, а оставалась открытой и через нее можно было пройти? Ответ подсказал мне несложный мысленный эксперимент. Положим, у нас есть червоточина — сферическая, как червоточина Фламма, но при этом не схлопывающаяся. Пошлем туда, в радиальном направлении, пучок света. Поскольку все лучи света в пучке направлены радиально, форма этого пучка будет такой, как на рис. 14.4. Он сходится (сужается в поперечнике) при входе в червоточину и расходится (расширяется в поперечнике) при выходе из нее. На выходе червоточина рассеивает лучи, словно линза.

Гравитирующие тела, вроде Солнца или черной дыры, сводят лучи (рис. 14.5). Они не могут разводить лучи, поскольку для этого

---

\* Саган К. Э. Контакт. — СПб. : Ред. Фиш; Амфора, 2005. Прим. ред.

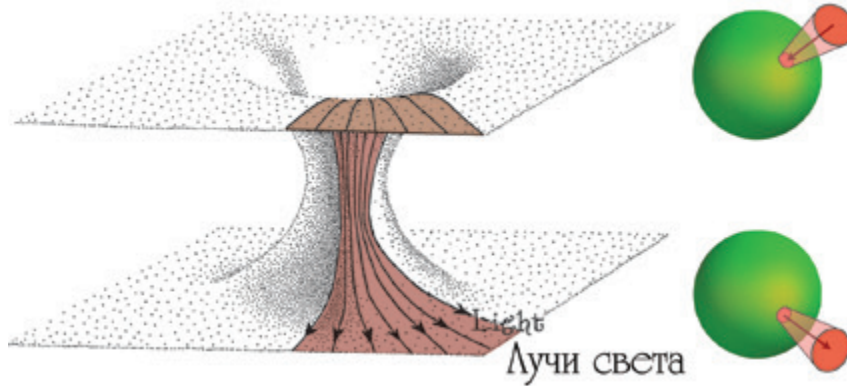


Рис. 14.4. Путь радиального пучка света через проходимую сферическую червоточину. Слева: вид из балка, одно пространственное измерение опущено. Справа: вид из нашей Вселенной (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

тело должно обладать отрицательной массой (или отрицательной энергией; вспомните, что, по Эйнштейну, масса и энергия эквивалентны). Исходя из этого я сделал вывод, что любая проходимая сферическая червоточина должна быть пронизана неким веществом, которое обладает отрицательной энергией. Как минимум энергия этого вещества должна быть отрицательной относительно пучка света или чего угодно еще, что путешествует сквозь червоточину с околосветовой скоростью\*. Я называю такое вещество «экзотической материей». (Позже я выяснил, что, согласно законам теории относительности, экзотической материей должна быть пронизана любая червоточина, сферическая или нет. Это следует из теоремы, которую в 1975 году доказал Дэннис Гэннон из Калифорнийского университета в Дэвисе и о которой я, увы, не знал.)

Поразительно, что экзотическая материя — благодаря странностям законов квантовой физики — может существовать в действительности. Небольшие ее количества даже можно получить

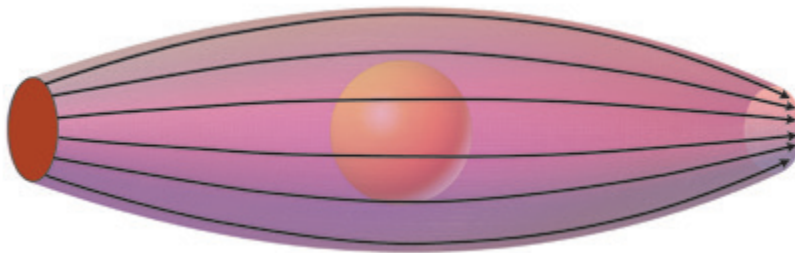


Рис. 14.5. Солнце (или черная дыра) сводит лучи света

\* Энергия в релятивистской физике — штука странная: ее величина, измеренная наблюдателем, зависит от того, с какой скоростью и в каком направлении наблюдатель движется. *Прим. автора.*

То есть определяется системой отсчета и при переходе к другой системе преобразуется как компонента четырехмерного вектора. *Прим. науч. ред.*

в лабораторных условиях, между двух близко расположенных электропроводящих пластин. Это называется эффектом Казимира. Однако в 1985 году мне было совершенно непонятно, может ли червоточина содержать достаточно экзотической материи, чтобы оставаться открытой. Поэтому я сделал две вещи.

Во-первых, я написал Карлу письмо, где предложил отправить Элинор Эрроуэй на Вегу с помощью червоточины, а не черной дыры. К письму я приложил копию вычислений, показывающих, что эта червоточина должна быть пронизана экзотической материей. Карл принял мое предложение (и упомянул о моих расчетах в «Благодарностях» к роману). Так червоточины и проникли в современную научную фантастику — в книги, фильмы и на телевидение.

Во-вторых, я в соавторстве со своими студентами, Марком Моррисом и Улви Яртсевером, опубликовал пару научных статей о проходимых червоточинах. В этих статьях мы предложили нашим коллегам выяснить, допускают ли квантовые и релятивистские законы возможность (для высокоразвитой цивилизации) поместить в червоточину достаточно экзотической материи, чтобы червоточина оставалась открытой. Это дало толчок для всевозможных исследований многих физиков, однако и сегодня, почти тридцать лет спустя, ответ все еще не найден. Многие указывают на то, что ответ отрицательный и проходимых червоточин не может быть. Но мы все еще далеки от окончательного решения. Подробнее об этом рассказано в книге Аллена Эверетта и Томаса Романа «Путешествия во времени и варп-двигатели» [Everett, Roman 2012].

## Как выглядит проходимая червоточина



Как выглядит проходимая червоточина для нас с вами, для людей этой Вселенной? Я не могу ответить наверняка. Если червоточину возможно удерживать открытой, точный способ это сделать остается загадкой, поэтому про форму червоточины ничего определенного не скажешь. Другое дело черная дыра. Ее свойства описал Рой Керр, поэтому я и могу сказать о ее виде что-то конкретное (см. главу 8).

Что же касается червоточин, я могу лишь строить обоснованные предположения. Поэтому в заголовке этого параграфа стоит значок

Представьте, что здесь, у нас, на Земле, есть червоточина, которая тянется через балк от Графтон-стрит в Дублине, Ирландия,



Устье в пустыне Калифорнии

Устье в Дублине


Рис. 14.6. Изображения, видимые через устья червоточины (Слева — работа Кэтрин Макбрайд, справа — Марка Интерранте.)

до пустыни в Южной Калифорнии. Длина пути через червоточину может составить несколько метров.

Вход в червоточину называется устьем. И вот вы сидите в придорожном кафе неподалеку от дублинского устья, а я стою напротив устья в калифорнийской пустыне. Оба устья напоминают хрустальные шары: глядя в калифорнийское устье, я вижу искаженное изображение Графтон-стрит (рис. 14.6). Это изображение сформировано лучами света, прошедшими через червоточину из Дублина в Калифорнию, подобно тому как свет передается по оптоволокну. А вы, посмотрев в дублинское устье, увидите искаженное изображение зарослей гигантской юкки в калифорнийской пустыне.

### Могут ли червоточины возникать естественным путем



В «Интерстеллар» Купер говорит: «Червоточины не возникают естественным образом», и я полностью с ним согласен! Если проходимые червоточины и допустимы с точки зрения законов физики, я считаю их естественное возникновение в реальной Вселенной крайне маловероятным. Впрочем, это мое мнение является лишь чуть большим, чем домысел, это даже не обоснованное предположение. Быть может, это, так сказать, обоснованный домысел, но все-таки домысел, поэтому я пометил этот параграф символом .

Почему же я не верю в естественные червоточины?

Нам неизвестны объекты в нашей Вселенной, которые, старея, становятся червоточинами. С черными дырами все наоборот —



астрономы наблюдают множество массивных звезд, которые, когда иссякнет их ядерное топливо, коллапсируют с образованием черных дыр.

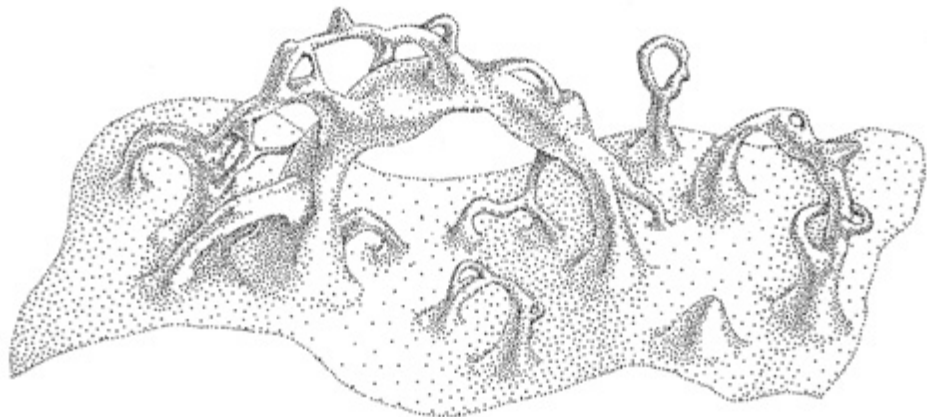
С другой стороны, есть причины надеяться, что естественные червоточины существуют на субмикроскопическом уровне в виде так называемой квантовой пены (рис. 14.7). Эта пена — гипотетическая сеть червоточин, беспрерывно появляющихся и исчезающих в соответствии с малоизученными законами квантовой гравитации (см. главу 26). Это вероятностная пена: в любой момент существует определенная вероятность, что пена имеет некоторую форму, и одновременно с этим существует вероятность, что пена имеет другую форму, и эти вероятности непрерывно изменяются. Масштабы этой пены действительно крошечные: типичная длина червоточины равна планковской длине,  $0,00000000000000000000000000000001$  доле сантиметра — сотая от миллиардной от миллиардной от размера атомного ядра. Меньше некуда!

Еще в пятидесятых Джон Уилер привел убедительные доводы в пользу существования квантовой пены, однако сейчас появились основания считать, что законы квантовой гравитации могут «гасить» пену и даже препятствовать ее возникновению.

Если квантовая пена существует, то есть шанс, что в результате какого-то естественного процесса некоторые из микроскопических червоточин могут самопроизвольно разрастаться до человеческих или бóльших масштабов и что это происходило даже во время невероятно быстрого «инфляционного» расширения Вселенной — когда Вселенная была очень-очень юна.

Однако нам, физикам, неизвестны какие-либо доказательства или хотя бы намеки на то, что такое естественное разрастание когда-либо происходило или в принципе может происходить.

Рис. 14.7. Квантовая пена  
(Рисунок Мэтта Зимета  
по моему наброску;  
из [Торн 2009].)



Есть еще одна слабая надежда на естественное образование червоточин. Возможно, хоть и очень маловероятно, что проходимые червоточины могли образоваться при Большом взрыве, в котором возникла Вселенная. Возможно это по той простой причине, что мы совершенно не понимаем природы Большого взрыва, а маловероятно — поскольку никакие имеющиеся у нас сведения о Большом взрыве не намекают на образование проходимых червоточин.

## Может ли сверхразвитая цивилизация создавать червоточины



Единственное, на что я уповаю касательно создания проходимых червоточин, — это вмешательство сверхразвитой цивилизации. Которой, однако, придется для этого преодолеть воистину грандиозные препятствия, так что я настроен пессимистично.

Один из способов создать червоточину — это извлечь ее из квантовой пены (если эта пена существует), увеличить до человеческих масштабов или больше и ввести в нее экзотическую материю, которая будет удерживать червоточину открытой. Сложновато даже для сверхразвитой цивилизации, хотя, возможно, нам так кажется лишь потому, что мы не знаем законов квантовой гравитации, управляющих пеной, извлечением червоточины и ее увеличением (см. главу 26). И, конечно, ясного представления об экзотической материи у нас тоже нет. На первый взгляд, создать червоточину несложно (рис. 14.8). Просто берешь и продавливаешь часть нашей браны (Вселенной) вниз в балк и получаешь вмятину, потом загибаешь брану в балке, протыкаешь в ней, точно под вмятиной, дырку, протыкаешь другую дырку на дне вмятины и наконец сшиваешь края дырок. Делов-то!

В «Интерстеллар» Ромилли иллюстрирует этот процесс с помощью листа бумаги и карандаша (рис. 14.9). Какими бы примитивными ни казались эти забавы с карандашом и бумагой, все становится

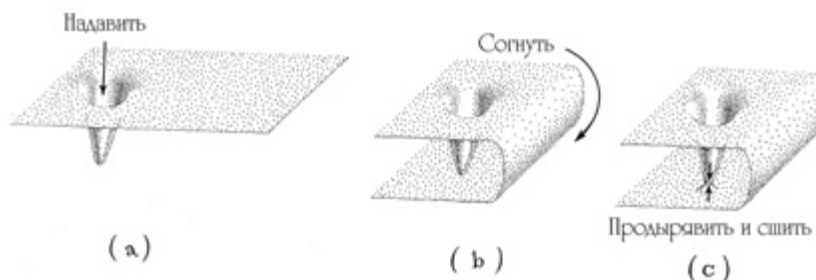


Рис. 14.8. Создание червоточины (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)



Рис. 14.9. Ромилли рассказывает о червоточинах. Слева: он сгибает лист бумаги. Справа: втыкает карандаш (червоточину) в лист, соединяя две дырки (Кадры из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

куда серьезней, если лист — это наша брана, а продемонстрированные манипуляции нужно производить из нашей браны усилиями обитающей в ней цивилизации. Говоря начистоту, я понятия не имею, как выполнить все эти операции из нашей браны. За исключением самой первой — создания вмятины (для этого нужно лишь плотное тело значительной массы, например нейтронная звезда). Что касается «дырки», то если проделать ее в нашей бране вообще возможно, это потребует применения законов квантовой гравитации. Теория относительности Эйнштейна не допускает разрывов в бране, так что единственный выход — разорвать брану там, где релятивистские законы не действуют, на почти неизведанной нами территории квантовой гравитации (рис. 3.2).

## Подводя итоги




Сомневаюсь, что законы физики допускают существование проходимых червоточин, но, возможно, я чего-то не понимаю. Я могу ошибаться. Если же такие червоточины все-таки могут существовать, то очень сомневаюсь в возможности их естественного зарождения в астрофизической Вселенной. Единственная надежда — искусственное создание червоточин силами сверхразвитой цивилизации. Но нам совершенно неясно, как такая цивилизация могла бы это сделать. И это выглядит более чем сложным предприятием (по крайней мере из нашей браны) даже для самой что ни на есть развитой цивилизации.

Однако в «Интерстеллар» считается, что червотчину создала, сохранила открытой и разместила возле Сатурна живущая в балке цивилизация, представители которой четырехмерны, как и сам балк.

Это для нас совершеннейшая *terra incognita*. Тем не менее я расскажу про обитателей балка в главе 22. А пока что давайте поговорим о червотчине в «Интерстеллар».

## Внешний вид червоточины в «Интерстеллар»



**В** «Интерстеллар» считается, что червоточину создала сверхразвитая цивилизация, скорее всего, обитающая в балке. Поэтому мы с Оливером Джеймсом\*, создавая инструментарий для компьютерного изображения червоточины, притворялись сверхразвитыми инженерами. Мы полагали, что червоточины допустимы с точки зрения законов физики и что создатели червоточины не испытывали недостатка в экзотической материи. Также мы полагали, что эти создатели могут изгибать пространство и время внутри и вокруг червоточины любым нужным образом. Это крайне смелые допущения, поэтому я отметил эту главу значком  — домысел.

### Гравитация червоточины и искривление времени

Кристофер Нолан хотел, чтобы червоточина обладала умеренной гравитацией. Достаточно сильной, чтобы удерживать «Эндюранс» на своей орбите, но достаточно слабой, чтобы «Эндюранс»,

---

\* Напомню, что Оливер Джеймс, специалист студии Double Negative, написал компьютерный код, лежащий в основе визуализации червоточин и черных дыр в «Интерстеллар», см. главы 1 и 8. *Прим. автора.*

замедлившись, мог безопасно упасть в червоточину. Это значит, что ее гравитационное притяжение гораздо слабее земного.

Из эйнштейновского закона искривления времени следует, что замедление времени внутри червоточины пропорционально силе ее гравитационного притяжения. Если притяжение слабее земного, то и замедление времени будет меньше, чем на Земле, — всего лишь одна миллиардная, то есть одна секунда на 30 лет. Это настолько мало, что мы с Оливером решили вообще не учитывать замедление времени.

### «Ручки настройки»

Последнее слово по поводу того, как будет выглядеть червоточина, оставалось за Кристофером Ноланом и Полом Франклином (главным по спецэффектам). От меня же требовалось дать Оливеру и его коллегам из Double Negative «ручки настройки», то есть параметры, изменяя которые, они могли влиять на вид червоточины. Затем они сгенерировали изображения червоточины для различных положений «ручек» и показали варианты Крису и Полу, и те выбрали самый привлекательный.

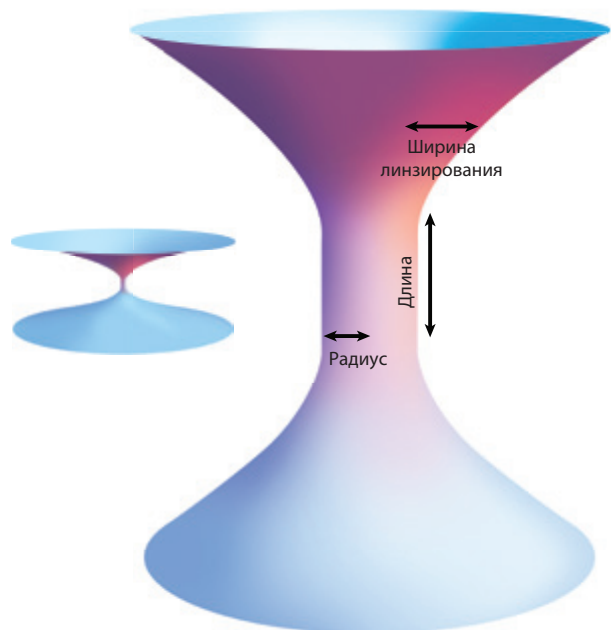
Я снабдил червоточину тремя «ручками» — тремя параметрами, влияющими на ее вид (рис. 15.1).

Первая «ручка» — это радиус червоточины, как мог бы его измерить обитатель балка (аналогично радиусу Гаргантюа). Умножив радиус на  $2\pi = 6,28318\dots$ , мы получим размер червоточины в окружности, как мог бы его измерить Купер, пилотируя «Эндюранс» вблизи червоточины или пролетая сквозь нее. Радиус был выбран Крисом заранее: он хотел, чтобы гравитационное линзирование звездного неба вблизи червоточины было едва заметно с Земли даже при использовании лучших телескопов, имевшихся на данный момент у NASA. Это определило величину радиуса — примерно километр.

Вторая «ручка» — длина червоточины, которая будет одинаковой и для Купера, и для обитателей балка.

Третья «ручка» определяет, насколько сильно червоточина линзирует свет от объектов позади нее. Особенности линзирования

Рис. 15.1. Червоточина при взгляде из балка и три «ручки настройки» (Слева — та же червоточина в балке, но на большем отдалении, благодаря чему видна ее «расширенная версия».)



определяются формой пространства вблизи устьев червоточины. Я сделал ее похожей на форму пространства снаружи горизонта невращающейся черной дыры, всего с одним регулируемым параметром — шириной области, в которой происходит сильное линзирование. Я назвал это шириной линзирования\* (см. рис. 15.11).

### Как «ручки настройки» влияют на внешний вид червоточины

Так же как в случае с Гаргантюа (см. главу 8), я воспользовался законами теории относительности, чтобы вывести уравнения для траекторий световых лучей, проходящих вблизи червоточины и сквозь нее, и разработал процедуру манипулирования моими уравнениями, позволяющую рассчитывать гравитационное линзирование и в итоге получать кадры, которые могла бы снять камера, вращающаяся по орбите вокруг червоточины или летящая сквозь нее. Убедившись, что изображения, полученные с помощью этой процедуры, соответствуют моим ожиданиям, я отослал их Оливеру, и он написал компьютерную программу для генерации высококачественных IMAX-изображений. Эжени фон Танзелманн добавила фоновое звездное поле и астрономические объекты, которые должна была линзировать червоточина. Затем Эжени, Оливер и Пол принялись изучать, как на изображение влияют мои «ручки настройки». Я же проводил собственные исследования, независимо от них.

Эжени любезно предоставила изображения (рис. 15.2 и 15.4), где показано, как выглядит Сатурн, если смотреть на него через червоточину. (Качество изображений Эжени гораздо выше, чем позволяют мои скромные возможности.)

### Длина червоточины

Сначала мы рассмотрим, как влияет на изображение длина червоточины с небольшим линзированием (маленькой шириной линзирования): см. рис. 15.2.

Если червоточина короткая (верхняя часть рисунка), камера видит в червоточине искаженное изображение Сатурна — первичное

---

\* Линзирование происходит преимущественно в области, где червоточина имеет сильно изогнутую форму (при взгляде из балка). Это область, где наклон стенок превышает 45 градусов, поэтому я определил ширину линзирования как радиальное расстояние от горловины червоточины до участка, где наклон стенок равен 45 градусам (рис. 15.1). *Прим. автора.*

изображение, расположенное в правой половине «хрустального шара». Можно разглядеть и очень тонкое, дугообразное вторичное изображение с другого края «хрустального шара». (Дуга справа внизу — не Сатурн, а искаженное изображение окружающей планеты Вселенной.)

По мере увеличения длины червотчины (рис. 15.2, посередине) первичное изображение уменьшается и сдвигается к центру, вторичное изображение также сдвигается к центру, а с правой стороны «хрустального шара» появляется очень тонкое дугообразное третичное изображение.

С дальнейшим увеличением длины (рис. 15.2, снизу) первичное изображение сжимается еще больше, все изображения сдвигаются

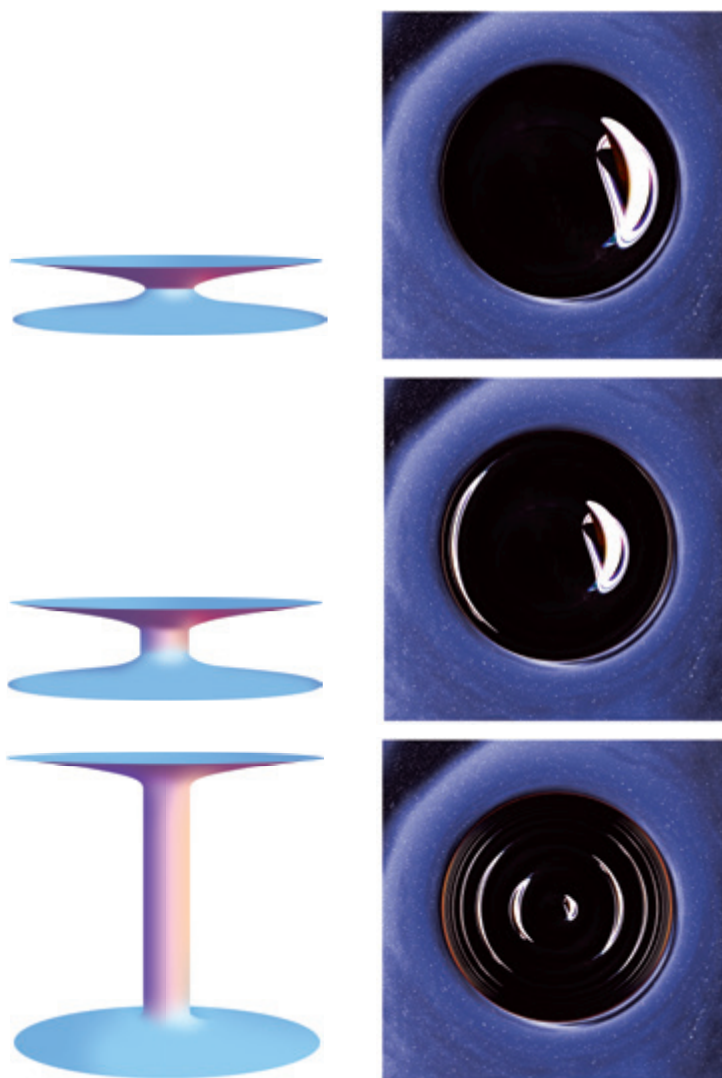


Рис. 15.2. Слева: три варианта червотчины с маленькой шириной линзирования (всего пять процентов от радиуса червотчины), вид из балка. Справа: то, что видит камера. Сверху вниз длина червотчины увеличивается: 0,01, 1 и 10 радиусов червотчины (Модели выполнены командой Эжени фон Танзелманн с помощью программы Оливера Джеймса, основанной на моих уравнениях.)