

Стивен Габсер
Франс Преториус

МАЛЕНЬКАЯ КНИГА



ЧЕРНЫХ
ДЫРАХ



ТРАЕКТОРИЯ



Annotation

Несмотря на сложность рассматриваемой темы, профессор Принстонского университета Стивен Габсер предлагает емкое, доступное и занимательное введение в эту одну из наиболее обсуждаемых сегодня областей физики. Черные дыры – это реальные объекты, а не просто мысленный эксперимент! Черные дыры исключительно удобны с точки зрения теории, так как математически они гораздо проще большинства астрофизических объектов, например звезд. Странности начинаются, когда выясняется, что черные дыры в действительности не такие уж черные.

Что же в действительности находится внутри них? Как можно представить себе падение в черную дыру? А может быть, мы уже падаем в нее и просто еще не знаем об этом?

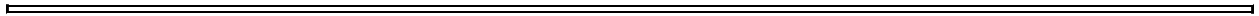
- [Стивен Габсер, Франс Преториус](#)

-
- [Предисловие](#)
- [Глава 1](#)
- [Глава 2](#)
- [Глава 3](#)
- [Глава 4](#)
- [Глава 5](#)
- [Глава 6](#)
- [Глава 7](#)
- [Эпилог](#)

- [notes](#)

- [1](#)
- [2](#)
- [3](#)
- [4](#)
- [5](#)
- [6](#)
- [7](#)
- [8](#)
- [9](#)
- [10](#)
- [11](#)

- [12](#)
- [13](#)
- [14](#)
- [15](#)
- [16](#)
- [17](#)
- [18](#)
- [19](#)
- [20](#)
- [21](#)
- [22](#)



Стивен Габсер, Франс Преториус

Маленькая книга о черных дырах

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н. В. Каторжнова).

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

© 2017 by Steven S. Gubser and Frans Pretorius
© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2019
© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2019
© Серия «New Science», 2019
© Масленников К. Л., пер. с англ. яз., 2018
© Стивен Габсер, 2019

* * *

Предисловие

Это произошло 14 сентября 2015 года, почти ровно через 100 лет после того, как Альберт Эйнштейн сформулировал свою общую теорию относительности. Два огромных приемника – один в штате Луизиана, другой в штате Вашингтон – проходили последнее тестирование перед научным экспериментом, результатом которого должна была стать регистрация гравитационных волн. Совершенно неожиданно записывающие устройства приемников зарегистрировали необычный сигнал. Если бы этот сигнал можно было услышать, он прозвучал бы как слабый глуховатый стук.

Спустя пять месяцев, после тщательного исследования данных, зафиксированных в тот день приемниками, сотрудники лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) опубликовали свое открытие. Оказалось, что зарегистрированный во время испытаний импульс и был именно одним из тех сигналов, ради приема которых была построена гигантская установка и который физики так надеялись принять в результате наблюдений, – далеким эхом слияния двух черных дыр в одну, более массивную. Мировое физическое сообщество было взволновано. Представьте, если бы мы всю жизнь жили, не воспринимая красного цвета, и вдруг пелена упала с наших глаз и мы в первый раз увидели розу.

И какую розу! Количественные оценки, выполненные по данным LIGO, показали, что слабый «стук», записанный приемниками, был порожден происшедшим более миллиарда лет назад слиянием двух черных дыр, каждая из которых была раз в тридцать массивнее Солнца. Во время столкновения в форме гравитационного излучения выделилась энергия, соответствующая примерно трем солнечным массам.

И черные дыры, и гравитационные волны давно уже были предсказаны общей теорией относительности Эйнштейна. На регистрацию именно таких гравитационных волн, какие теория предсказывает в случае слияния черных дыр, был настроен детектор LIGO, и именно им соответствовал сигнал, записанный 14 сентября. Но то, что произошло, было не просто доказательством правильности долго вынашиваемых теоретических идей. Первая регистрация гравитационных волн открыла эру гравитационно-волновой астрономии. Детектору LIGO посчастливилось «увидеть» событие, о котором физики грезили

десятилетиями. Теперь мы будем исследовать открывшийся нам чудесный сад гравитационно-волновых явлений.

Большие события в науке редко бывают однозначными, поэтому сначала следует спросить: а насколько мы убеждены, что группа LIGO правильно истолковала принятый слабый импульс как дальнейшее эхо слияния черных дыр, случившегося миллиард лет назад? Если говорить коротко, то ответ будет: «На сто процентов». Сходится все. Сигнал зарегистрировали оба детектора. Поблизости не происходило ничего такого, что могло бы позволить объяснить его как-то иначе. Он был достаточно сильным, чтобы новый детектор LIGO смог его почувствовать, и при этом слишком слабым, чтобы он мог наблюдаться прежней аппаратурой. Гипотеза слияния черных дыр, случившегося миллиард лет назад, не противоречит общим представлениям астрофизики и космологии. И главное: вскоре подтвердились надежды на то, что и другие такие же события не заставят себя ждать. На рождество 2015 года LIGO объявила о регистрации второго сигнала, а 4 января 2017 года – третьего. В целом эти новые события похожи на первое, и это укрепляет нашу уверенность в том, что LIGO действительно наблюдает слияния черных дыр. В общем, мы полны уверенности, что находимся на пороге новой эры наблюдательной астрофизики – эры, в которой черные дыры будут играть первую скрипку.

В этой книге мы описываем черные дыры и как астрофизические объекты, существование которых уже почти не вызывает сомнений, и как лаборатории для теоретиков, где последние могут отточить свое понимание не только тяготения, но также и квантовой механики, и теплофизики. В главах 1 и 2 мы поговорим о специальной и общей теории относительности. В последующих главах мы продолжим наше изложение: обсудим шварцшильдовские черные дыры, вращающиеся черные дыры, столкновения черных дыр, гравитационное излучение, излучение Хокинга и потерю информации в черной дыре.

Что же такое черная дыра? В сущности, это область пространства-времени, которая стягивает в себя вещество и из которой невозможно выбраться. Сначала мы сосредоточим обсуждение на самых простых черных дырах, называемых шварцшильдовскими в честь их первооткрывателя Карла Шварцшильда. Есть старая поговорка: «Чем выше поднимаешься, тем больше падаешь». Внутри шварцшильдовской черной дыры действует более сильное утверждение: подниматься некуда, можно только падать. Мы, правда, не вполне уверены, куда мы в конце концов упадем. Самая простая гипотеза, соответствующая математическим уравнениям, которые описывают шварцшильдовскую черную дыру,

заключается в том, что в ее центре лежит чудовищно плотное, бесконечно сжатое материальное ядро. Столкновение с ним означает конец всего, даже времени. Проверить эту гипотезу довольно трудно, так как ни один наблюдатель, который рискнул бы отправиться в черную дыру, не мог бы даже сообщить нам о том, что он видит.

Но прежде, чем мы продолжим исследовать черные дыры Шварцшильда более глубоко, давайте сделаем шаг назад и рассмотрим тяготение в более слабых формах. Например, если мы запустим с поверхности Земли объект с достаточно большой вертикальной скоростью, он сможет двигаться вверх вечно. Минимальная скорость, для которой это верно, называется скоростью убегания, или второй космической скоростью, и если пренебречь трением о воздух, она составляет примерно 11,2 километра в секунду. Для сравнения вспомним, что человек вряд ли способен бросить мяч со скоростью большей, чем 45 метров в секунду, а это меньше, чем полпроцента скорости убегания. Скорость пули, вылетающей из боевого ружья, примерно 1,2 километра в секунду, что немного выше 10 % скорости убегания. Так что, говоря: «Чем выше поднимаешься, тем больше падать», мы обычно имеем в виду, что, швыряя объект вверх обычными средствами, притяжение Земли мы вряд ли преодолеем.

Современное средство, способное бесповоротно победить земное притяжение и отправиться в космическое пространство, – это космическая ракета. Чтобы вырваться из объятий тяготения Земли, ракете не обязательно лететь со скоростью выше 11,2 километра в секунду (хотя некоторые из них на это способны). Ракета может лететь медленнее, но должна нести достаточно горючего, чтобы подняться до такой высоты, на которой гравитационное поле Земли существенно слабее, а скорость убегания, соответственно, меньше. Другими словами, если ракета должна полностью выйти за пределы действия гравитационного поля Земли, то в точке, где ее двигатели перестают работать, она должна иметь скорость большую, чем скорость убегания.

Интересно, а что, если бы Земля была гораздо плотнее? Тогда скорость убегания с ее поверхности была бы больше, ведь гравитационное поле Земли было бы гораздо сильнее. Если говорить об устойчивых формах вещества, то во Вселенной самая большая плотность его встречается в нейтронных звездах. Примерно полторы массы Солнца помещаются внутри сферы радиусом всего в 12 километров, хотя радиусы нейтронных звезд пока измерены с не очень высокой точностью. Обычное вещество будет полностью расплющено по поверхности такой звезды ее чудовищной

гравитационной силой, примерно в 100 миллиардов раз превышающей силу тяжести на Земле. При радиусе в 12 километров скорость убегания составит примерно 60 % скорости света. Но не будем останавливаться – представим себе, что нам удалось сжать нейтронную звезду еще сильнее. Если мы доведем ее радиус до 4,5 километра, скорость убегания достигнет скорости света. Продолжим сжатие, и характер поля тяготения полностью изменится. Никакая форма материи уже не сможет преодолеть силу гравитации. Двигаться во времени – будет означать неизбежно и бесповоротно стремиться внутрь сферы вдоль ее радиуса. Вырваться будет невозможно. Это и будет черная дыра.

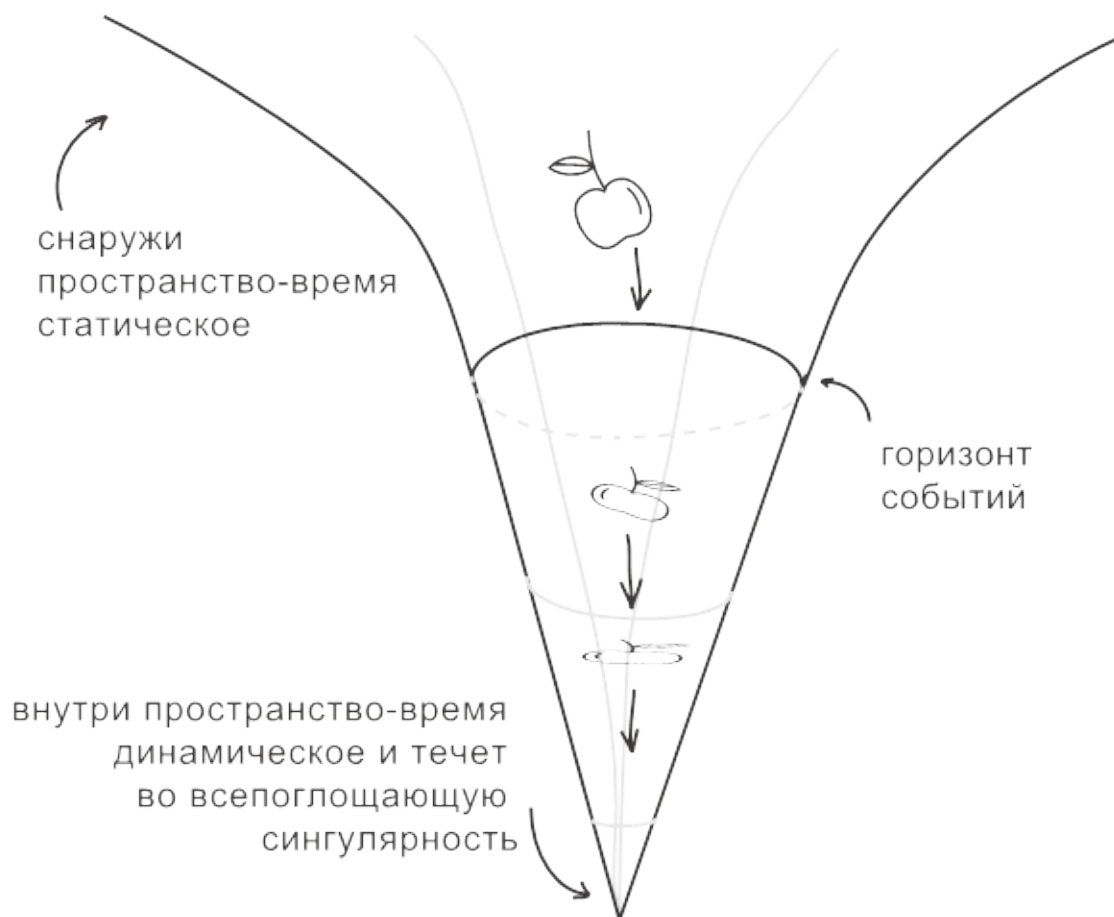


Рис. 0.1. Схематическое представление геометрии черной дыры. Вдалеке от горизонта пространство-время плоское. С приближением к горизонту оно становится все более искривленным, но при этом остается независимым от времени, или статическим. Однако после пересечения горизонта пространство-время становится динамическим: с течением времени два из пространственных измерений (имеющих сферическую геометрию) сжимаются, а третье (не показанное на рисунке) удлиняется, и

это происходит до тех пор, пока все пространство не вытянется и не сожмется в бесконечно длинную и тонкую сингулярность.

Главная цель первых глав этой книги – уточнить, что же такое «черная дыра». Здесь ключевой будет идея «горизонта событий», который можно назвать поверхностью черной дыры. В геометрическом смысле эта поверхность является двумерной областью в трехмерном пространстве. Например, в простейшем случае шварцшильдовской черной дыры ее горизонт представляет собой идеальную сферу, радиус которой называют радиусом Шварцшильда. Но у горизонта черной дыры есть одна странность (по крайней мере, в привычном для нас смысле): он не является поверхностью чего-то конкретного. Пролетая сквозь него, вы не заметите ничего особенного. Вот только если вы захотите повернуть обратно и выйти наружу, ничего не получится. Неважно, какие усилия вы будете для этого прикладывать – пользоваться ракетой, лазерной пушкой или чем-нибудь еще. Неважно, какую помощь будут пытаться вам оказать снаружи. Снова оказаться на внешней стороне горизонта или хотя бы послать наружу сигнал SOS невозможно. Образно говоря, на горизонте черной дыры вы будто на кромке водопада, с которой пространство-время мощным потоком неотвратимо низвергается в сингулярность – а в ней разрушается все.

Черные дыры – это реальные объекты, а не просто мысленный эксперимент! Считается, что во Вселенной они возникают по крайней мере в двух ситуациях. По поводу первой из них вспомним, что мы чуть выше узнали о нейтронных звездах. Когда в недрах мас сивных звезд заканчивается ядерное горючее, они коллапсируют – обрушиваются внутрь самих себя. В процессе коллапса большая часть вещества звезды выбрасывается в окружающее пространство в результате взрыва, называемого вспышкой сверхновой. (Кстати, обычно считается, что именно взрывы сверхновых играют главную роль в распространении металлов и других сравнительно тяжелых элементов по всей Вселенной.) Но на месте взрыва все же может остаться слишком много вещества, чтобы из него могла образоваться устойчивая нейтронная звезда: сколлапсировав, это оставшееся вещество образует черную дыру массой по крайней мере в несколько масс Солнца. Черные дыры, слияния которых наблюдались детектором LIGO, еще массивнее, но все равно укладываются в модель звездного коллапса.

А вот черные дыры в центрах галактик, по-видимому, гораздо больше. Подробности процесса образования таких черных дыр таинственны – возможно, они связаны с существованием темного вещества, с физикой

очень ранней Вселенной или и с тем и с другим. Черные дыры в центрах галактик имеют невероятно большие массы: от тысяч до миллиардов масс Солнца. Одно такое чудовище, по-видимому, находится в центре Млечного Пути: в нем около 4 миллионов солнечных масс. Мы могли бы спросить: как можно быть уверенными в присутствии черной дыры, если никакой сигнал не в состоянии выскользнуть из-под ее горизонта? Ответ состоит в том, что гравитационное притяжение черной дыры воздействует на окружающие ее объекты. Отслеживая движения звезд в окрестности центра Млечного Пути, мы убеждаемся в том, что там находится какой-то очень массивный и очень плотный объект. Он, конечно, не обязан быть именно черной дырой, но можно точно сказать, что если это не черная дыра, то что-то гораздо более странное. Иными словами, черная дыра в этой ситуации является самым простым из всех возможных объектов, и поэтому все сходится на том, что в центрах многих, если не большинства, галактик действительно находятся сверхмассивные черные дыры.

Черные дыры исключительно удобны с точки зрения теории, так как математически они гораздо проще большинства астрофизических объектов, например звезд. Энергию звезд обеспечивают ядерные реакции в их недрах. Вещество внутри звезд подвергается гигантскому давлению и участвует в гидродинамических движениях, которые мы можем промоделировать численно, но понимаем еще далеко не полностью. Динамика поверхности звезды, вероятно, столь же сложна, как и изменчивая погода на Земле. По сравнению со всем этим черная дыра отличается великолепной простотой. В отсутствие другого вещества черные дыры должны принимать одну из нескольких определенных форм, которые в явном виде описываются уравнениями общей теории относительности Эйнштейна в терминах неевклидовой геометрии. Конечно, вещество, падающее в черную дыру, усложняет картину, но и при этих условиях достигнуто вполне удовлетворительное понимание того, что будет происходить с обычным веществом. Существует даже подробное математическое описание того, как одна черная дыра сталкивается с другой. В главе 6 этой книги подробно объясняется, как строится это описание и что оно означает для интерпретации таких экспериментов, как наблюдения LIGO.

Странности начинаются, когда выясняется, что черные дыры в действительности не такие уж черные. Методами квантовой механики Стивен Хокинг доказал, что черные дыры имеют определенную температуру, связанную с их поверхностным тяготением. Фактически появилась целая научная дисциплина, известная как термодинамика черных

дыр; в ней их геометрические свойства ставятся в точное соответствие с характеристиками, описываемыми теорией теплоты, то есть температурой, энергией и энтропией. Существует даже предположение, что внутренние части черных дыр в удаленных областях Вселенной перекрываются, и это помогает объяснить такой квантовый эффект, как запутанность. Мы поговорим об этих проблемах в главе 7.

Черные дыры продолжают привлекать внимание ученых. Астрономы ищут все более точное описание свойств вращающихся черных дыр и поэтому ждут очень многого от сотрудничества с гравитационно-волновыми обсерваториями: есть надежда на основе наблюдений описать катаклизмические события, происходящие при слияниях черных дыр. Гравитационно-волновая астрономия находится в самом начале пути. Усилиями ученых всего мира строится сеть детекторов в Соединенных Штатах (два детектора LIGO: в Хэнфорде, штат Вашингтон, и в Ливингстоне, штат Луизиана), в Европе (Virgo и GEO600), в Японии (KAGRA) и в Индии (LIGO India). Одновременно специалисты в области теории струн изучают черные дыры в многомерных пространствах – не только для измерения квантовых эффектов в тяготении, но и для построения физических аналогий столь разнообразным процессам, как столкновения тяжелых ионов, вязкие жидкости, сверхпроводники. Наконец, существование черных дыр подталкивает нас к поистине странным вопросам: а не могут ли они когда-нибудь стать полезными человеку? Что же в действительности находится внутри них? Как можно представить себе падение в черную дыру? А может быть, мы уже падаем в нее и просто еще не знаем об этом?

Глава 1

Специальная теория относительности

Чтобы понять, что такое черные дыры, нам придется познакомиться с теорией относительности. Эта теория делится на две части: «специальную» и «общую» – их часто сокращенно обозначают СТО и ОТО. Специальную теорию относительности Альберт Эйнштейн предложил в 1905 году: он рассматривал движение объектов друг относительно друга и то, как движение наблюдателя влияет на восприятие им пространства и времени. Главные идеи специальной теории относительности можно сформулировать в рамках очень красивой геометрической концепции, которая называется «пространство-время Минковского».

Позже эта теория стала частью общей теории относительности, в которой центральным встал вопрос о природе тяготения. Общая теория относительности и понадобится нам, если мы хотим понять, что такое черная дыра. Эйнштейн разрабатывал эту теорию много лет и только в конце 1915 года подвел итог своих исследований в статье, главным в которой были так называемые уравнения гравитационного поля, – с тех пор они носят имя их автора. Уравнения Эйнштейна описывают, как искривляется пространство-время Минковского под влиянием тяготения. В результате с их помощью можно описать геометрию шварцшильдовской черной дыры – об этом мы поговорим подробно в главе 3. Из-за того, что в специальной теории относительности тяготение не принимается во внимание или считается настолько слабым, что им можно пренебречь, специальная теория относительности выглядит гораздо проще, чем общая. Именно в рамках специальной теории относительности была выведена формула $E = mc^2$, связывающая энергию тела E , его массу m и скорость света c , – одно из самых знаменитых уравнений во всей физической науке, а может, и вообще одна из главных вершин человеческого знания. Применение этой формулы позволило высвободить гигантскую энергию, скрытую в атомных ядрах, – эта энергия используется в атомном оружии. А теперь мы надеемся, что слияние ядер сможет стать для человечества практически неисчерпаемым источником энергии, не загрязняющей к тому же окружающую среду. Формула $E = mc^2$ имеет прямое отношение и к физике черных дыр. При первом наблюдавшемся астрономами слиянии черных дыр выделилась энергия, эквивалентная трем массам Солнца, что и

стало прямой иллюстрацией эквивалентности массы и энергии. Чтобы представить себе, насколько огромны масштабы этой космической катастрофы, вспомним, что при взрыве атомной бомбы мощностью в 400 килотонн выделяется энергия, эквивалентная массе всего в 19 грамм.

Специальная теория относительности тесно связана с теорией электромагнетизма Джеймса Клерка Максвелла. Первые ростки релятивистского взгляда на пространство и время появились в конце XIX века: тогда были выведены так называемые преобразования Лоренца, которые показывают, как восприятие наблюдателем электромагнитных явлений зависит от характера движения этого наблюдателя. А самое распространенное электромагнитное явление – это свет, который является просто движущейся в пространстве волной связанных друг с другом электрического и магнитного полей. Из теории Максвелла следовало, что у света есть определенная скорость распространения. Теория относительности была основана на идее, что эта скорость постоянна и независима от движения наблюдателя.

В специальной теории относительности движение наблюдателей описывается в терминах «систем отсчета». Чтобы наглядно представить себе роль системы отсчета, вообразим скорый поезд. Если все пассажиры уселись на свои места и багаж аккуратно уложен, все в поезде находится в покое по отношению к стенкам и полу вагона. Но ведь поезд при этом быстро мчится по отношению к Земле. Представим себе, что он движется по прямой с постоянной скоростью. Чтобы вполне точно описать понятие системы отсчета, мы вдобавок должны допустить еще полное отсутствие поля тяготения. То есть вместо поезда, мчащегося с постоянной скоростью по земной поверхности, лучше бы представить себе космическую ракету, летящую в пустом пространстве. Правда, поле силы тяжести Земли достаточно слабое, чтобы для наших целей мы в поезде могли не принимать его во внимание: тогда можно обойтись специальной теорией относительности, не прибегая к общей.

Итак, если мы не будем смотреть в окно, нам трудно будет сказать, с какой скоростью движется поезд. А если допустить, что поезд имеет фантастически мягкую подвеску, рельсовый путь – невообразимо гладкий, а шторы на всех окнах наглухо опущены, будет, пожалуй, невозможно определить, движется ли наш поезд вообще. Поезд представляет собой систему отсчета – в этой системе пассажиры могут естественно определить, движется ли что-нибудь внутри вагона. Но в нашей идеализированной ситуации они не смогут сказать, движется ли сам поезд. Вот если кто-то отправится на прогулку по проходу между креслами,

пассажиры, конечно, будут это знать: он же перемещается относительно их системы отсчета! Больше того, любое физическое явление, происходящее внутри поезда, например отскоки от пола мячика или вращение спиннера, будет с точки зрения пассажира происходить всегда одинаково, независимо от того, движется поезд или стоит на месте. Короче говоря, система отсчета – это способ, которым наблюдатель воспринимает связанное с ним пространство и время в состоянии равномерного движения, то есть когда поезд не ускоряет и не замедляет свой ход, и к тому же не поворачивает. Как только что-то из перечисленного произойдет, пассажиры тут же это заметят: например, резкое ускорение вдавит их в спинки кресел, а при торможении их бросит вперед.

Давайте теперь представим себе, что наш поезд, не останавливаясь и даже не замедляя хода, проходит мимо станции. Пассажиры – назовем их Алиса, Алан и Авери – это наблюдатели в движущейся системе отсчета, которую мы назовем системой *А*. Тем временем их друзья Боб, Бетси и Билл стоят на платформе и их система отсчета, которую мы будем называть системой *Б*, неподвижна. Чтобы изобразить эти системы графически, будем отмечать положения, измеренные в системе *Б*, по горизонтальной координатной оси, а измеренное в этой системе время по вертикальной. Теперь нанесем на координатную плоскость траектории наших наблюдателей в пространстве и во времени: получается, что с течением времени наблюдатели в системе *Б* всегда остаются в одних и тех же положениях (измеренных в этой системе), тогда как наблюдатели из системы *А* движутся вперед. Получившаяся диаграмма и есть изображение пространства-времени Минковского! Выражение «пространство-время» отражает тот факт, что мы изображаем пространственные и временные координаты на одной и той же диаграмме.

Но можно взглянуть на пространство-время Минковского с другой точки зрения: в соответствии с ней, наблюдателей из системы *А* можно представить покоящимися, а те, что находятся в системе *Б*, будут двигаться назад. Мы вернемся к этому чуть позже.

Специальная теория относительности базируется на предположении, что скорость света постоянна. Другими словами, теория исходит из того, что скорость света имеет одно и то же значение, измеряется ли она наблюдателями в поезде или теми, кто стоит на платформе. Если бы это было не так, тогда, измеряя скорость света, наблюдатель мог бы определить, в которой из этих двух систем он находится. А главный физический принцип – принцип относительности – в том и состоит, что законы физики должны быть абсолютно одинаковы в любой системе

отсчета и что никакое физическое измерение *не может* вам подсказать, в какой системе находитесь вы. Так что, согласно этому принципу, мы не можем выбрать какую-то систему отсчета и сказать: «Пока я остаюсь в этой системе, я нахожусь в состоянии покоя. Движение означает переход в другую систему». Мы можем только сказать: «Каждая система отсчета не лучше и не хуже любой другой. Единственное, что можно назвать движением, – это перемещение одного наблюдателя относительно другого». Иначе говоря, состояние движения не абсолютно, а относительно. А значит, неправильно говорить, что система *А* движется, а система *Б* покоится. Все, что мы можем сказать, – это что они движутся друг относительно друга. (Хотя, конечно, мысль о том, что система *Б* покоится, нам кажется более естественной, потому что мы подсознательно всегда рассматриваем движение относительно Земли.)

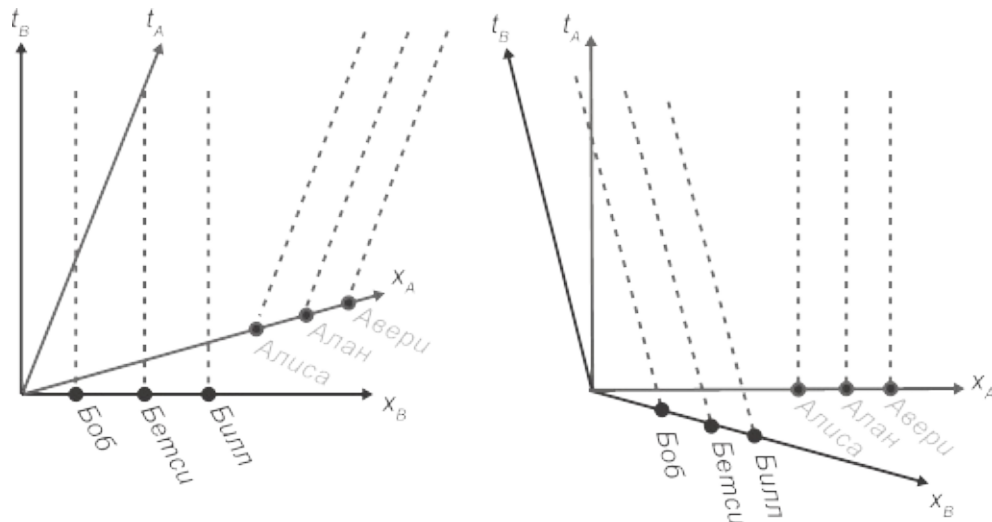


Рис. 1.1. Слева: пространство-время Минковского. Три наблюдателя из системы отсчета *Б* неподвижны, а три наблюдателя из системы *А* движутся вперед. Справа: другая перспектива пространства-времени Минковского, в которой наблюдатели из системы *Б* движутся назад, а наблюдатели из системы *А* покоятся.

Получается, что наши интуитивные суждения об относительном движении исходят из здравого смысла, и стоит спросить себя: не можем ли мы из этих представлений извлечь какой-нибудь способ объяснения природы пространства и времени? Здесь нам на помощь приходит максвелловская теория электромагнетизма. Ведь из нее следует (кроме всего прочего), что если Алиса вытащит лазерную указку и пошлет лазерный импульс вперед, в сторону, в которую мчится ее поезд, и то же

самое сделает Боб, то эти два лазерных луча полетят вперед с одинаковой скоростью.

На первый взгляд, ничего особенного – но только на первый взгляд! Ведь, например, если мы разгоним наш поезд до 99 % скорости света (хотя в Америке, как всем известно, поезда ходят гораздо медленнее), то разве для Боба скорость луча, посланного по ходу поезда Алисой, не окажется равной почти двойной скорости света? Ведь Алиса мчится к Бобу со скоростью в 99 % световой, а ее лазерный луч мчится со скоростью света относительно нее – значит, измеренная Бобом скорость ее лазерного луча составит 199 % скорости света?

Так вот, в соответствии с теорией электромагнетизма, этого не произойдет! Скорость луча, измеренная Бобом, будет в точности равна все той же постоянной скорости света, которую Алиса получит, измеряя движение того же импульса относительно себя.

Как это может быть? Ответ заключается в том, что Алиса и Боб по-разному измеряют ход времени и длину. В подробностях эта процедура измерения выражается преобразованиями Лоренца – математическим описанием связи времени и длины в системе *А* с временем и длиной в системе *Б*. Преобразование Лоренца легко записать в терминах пространства-времени Минковского. До того как мы провели преобразования Лоренца (левая часть рис. 1.1), мы можем считать систему *Б* покоящейся, а систему *А* движущейся вперед. После выполнения преобразований Лоренца (правая часть рис. 1.1) система *А* становится покоящейся, а система *Б* движется назад! Преобразования Лоренца, таким образом, просто описывают смену точки зрения: от позиции Боба, который считает покоящейся свою систему отсчета, к позиции Алисы, для которой покоится как раз ее система.

Главные следствия преобразований Лоренца – замедление времени и сокращение длины. Мы сначала попробуем объяснить замедление времени – это проще. Представьте, что в полдень пятницы вы садитесь в поезд на станции Принстон. Для удобства будем считать, что эта точка во времени и пространстве соответствует началу координат в пространстве Минковского, то есть точке, где пересекаются оси *t* и *x*. Через станцию Принстон идут как скорые, так и обычные поезда, причем некоторые идут на север, в Нью-Йорк, а некоторые на юг, в Филадельфию; вы можете сами выбрать вид поезда и направление. Ваш план такой: сесть в поезд, ехать в нем ровно час (по вашим часам), затем сойти и отметить расстояние, на которое вы отъехали. Ясно, что если выбрать скорый поезд, то уедешь дальше. Но будьте осторожны: можно ли считать, что если поезд идет

вдвое быстрее, он увезет вас вдвое дальше? Не забывайте, что вы едете ровно один час *по вашим часам*, которые тоже едут с вами. А скорость поезда будут измерять наблюдатели, которые стоят на неподвижной платформе и часы у которых идут немного иначе, чем у вас, – ведь они находятся в другой системе отсчета.

Где же вы тогда окажетесь через час? Возьмем более общий случай: пусть вы пришли на вокзал в Принстоне с друзьями. Каждый из вас выбрал себе какой-нибудь поезд, и все выехали из Принстона в одно и то же время. Где каждый из вас окажется через час? Ответ: каждый из вашей компании очутится в какой-то точке гиперболы в пространстве-времени Минковского (рис. 1.2). Эта гипербола – множество всех возможных конечных точек, в которых пассажиры разных поездов окажутся ровно через час *своего собственного* времени. И одним из таких конечных пунктов окажется сам вокзал в Принстоне, ровно в 1 час пополудни по принстонскому времени. Вы окажетесь в этой точке через час после «отправления» вашего поезда, если вы, как знаменитый «рассеянный с улицы Бассейной», умудрились сесть в отцепленный вагон, который весь этот час простоял на одном месте. Получилось, что в 1 час пополудни по принстонскому времени вы «приехали» в Принстон – ведь ваша система отсчета совпадает с системой отсчета принстонского вокзала, а ваши часы идут в точности так же, как и вокзальные. А вот если вы действительно куда-то поехали, ваши часы пойдут медленнее вокзальных. И когда через час вашего времени вы сойдете на платформу, вы увидите, что неподвижные часы показывают более позднее время, чем должно быть по вашим. Этот эффект, известный как замедление времени, в пространстве-времени Минковского изображается искривлением гиперболы кверху в направлении оси времени, тем более сильным, чем больше вы отдаляетесь от начала вашего движения.^[1] А пространство-время Минковского даже называют иногда гиперболической геометрией.

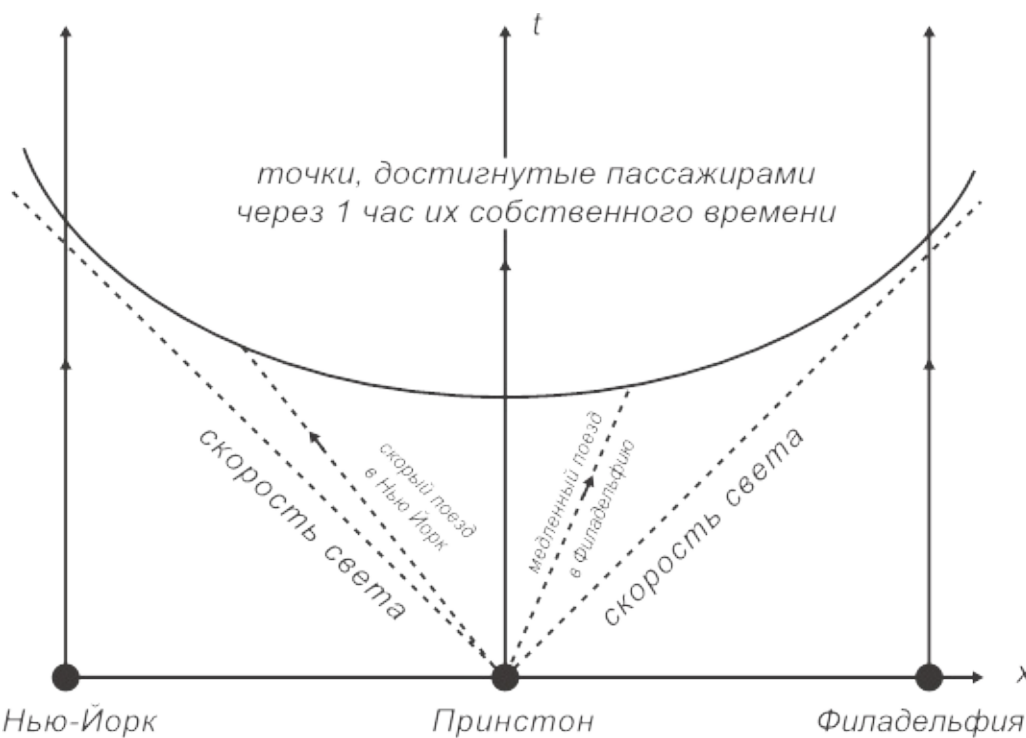


Рис. 1.2. Поезда, отправляющиеся из Принстона. Кривая, объединяющая точки, в которые пассажиры попадают через час собственного времени, – гипербола.

В пространстве-времени Минковского постоянную скорость света мы визуализируем световыми лучами под углом ровно 45° относительно вертикальной оси времени. Можно заметить, что гипербола, образованная всеми возможными конечными пунктами наших одночасовых путешествий, целиком лежит внутри области пространства-времени, ограниченной двумя световыми лучами, выходящими из начала координат. Так в пространстве-времени Минковского отражается тот факт, что никакой поезд не способен двигаться быстрее света. Может показаться, что наши разговоры о замедлении времени не имеют отношения к преобразованиям Лоренца. Сейчас мы покажем, что это совсем не так. Вспомним, что мы когда-то решили назвать систему отсчета поезда системой А, а систему отсчета, связанную с Землей, – системой В. Пусть Алиса проводит один час в системе А по дороге из Принстона в Нью-Йорк. А тем временем Боб и его друзья остаются неподвижными по отношению к Земле. Как они могут узнать время прибытия Алисы? Может, ей стоит позвонить им с вокзала? Вряд ли это разумно: ведь радиоволны, несущие ее голос, распространяются со скоростью света, а значит, чтобы узнать время ее прибытия, Бобу и его друзьям придется проделать вычисления, в которых

надо будет учесть время приема звонка Алисы, скорость распространения сигнала и расстояние до Нью-Йорка. Так как Бобу лень заниматься такими сложными подсчетами, он придумывает лучший способ: он сверяет – синхронизирует – свои часы с часами своего друга Билла. Затем Боб и Билл выбирают себе позиции на платформах в Принстоне и Нью-Йорке соответственно, и Боб засекает время отправления Алисы, а Билл – время ее прибытия. Нужды в телефонном звонке больше нет. Правда, может показаться, что трудно надежно синхронизировать часы у наблюдателей, далеко расположенных друг от друга. Для этого можно предложить следующий способ: Боб и Билл встречаются на полпути между Принстоном и Нью-Йорком, синхронизируют свои часы в одной и той же точке пространства, а потом с одинаковой скоростью отправляются на свои вокзалы, задолго до того, как Алиса садится в свой поезд. Во всей этой истории с поездкой Алисы система *A* оказывается в явно привилегированном положении: Алиса не нуждается в помощи друзей, чтобы узнать продолжительность своего путешествия, тогда как Боб и Билл должны для измерения этого времени производить сложные совместные действия. Временной интервал, который измеряет Алиса, называется «собственным временем», так как она измеряет его, оставаясь неподвижной в своей системе отсчета (системе *A*). А временной интервал, который измеряют Боб и Билл, – назовем его «замедленным временем», – всегда будет больше собственного. Замедленное, или растянутое, время и есть выражение связи между системой *A* и системой *B* в пространстве-времени. Преобразование Лоренца при переходе от системы *A* к *B* содержит замедление времени.

Подобным образом можно описать и сокращение длины. Теперь вместо надоевших уже прогулок в поездах давайте представим себе, что Боб, Билл и Алиса едут на Олимпиаду, где Алиса надеется установить мировой рекорд по прыжкам с шестом. Ее секрет в том, что она умеет очень быстро бегать: со скоростью в 87 % скорости света! (Почему-то она при этом не хочет отбирать лавры Усейна Болта на стометровке, хотя знает, что эту дистанцию она преодолет менее чем за 0,4 микросекунды.) У Алисы шест длиной 6 метров – это длиннее, чем у большинства прыгунов, но что поделаешь, она во всем исключительная. Боб и Билл не верят, что у Алисы такой длинный шест, и они решают измерить его, пока Алиса разбегается для прыжка, держа при этом свой шест строго горизонтально. Ясное дело, задача у них непростая. Как им провести свои измерения? Вот что они придумали: во-первых, они опять синхронизируют свои часы. Затем они становятся на расстоянии немного меньше шести метров друг от друга

и договариваются, что точно в одно и то же время, когда Алиса будет пробегать мимо них, они посмотрят на нее и отметят, какую точку шеста видит каждый. После многих попыток им удастся добиться такого положения, при котором Боб видит конец шеста в тот момент, когда Билл видит его острие. Они измеряют расстояние между собой, и оказывается, что они стоят всего в 3 метрах друг от друга, из чего они разумно заключают: длина шеста Алисы всего 3 метра. Но когда они подходят к Алисе и рассказывают ей об этом, та возражает. Позвав на помощь двух своих друзей Аллана и Авери, которые бегут рядом с ней (а они такие же замечательные спринтеры, как и сама Алиса), и измерив длину шеста в своей собственной системе координат, она подтверждает, что эта длина равна 6 метрам.

Снова заметим, что в этой ситуации система A является привилегированной, так как именно в ней шест Алисы покоится. Назовем его длину, измеренную в системе A , собственной длиной. Длина шеста, измеренная в системе B , всегда меньше, и мы будем ее называть сокращенной длиной. Замедление времени и сокращение длины тесно связаны, как можно видеть из следующего примера. Когда Алиса бежит по гаревой дорожке к планке, в ее собственной системе отсчета у нее уходит на это вдвое меньше времени, чем то, которое Боб и Билл могли бы измерить способом, о котором мы уже рассказывали при описании поездки Алисы в Нью-Йорк. Получается, что при рекордной скорости Алисы в 87 % скорости света время замедляется вдвое. Во столько же раз сокращается и длина: наблюдатели в системе A говорят, что длина шеста 6 метров, а в системе B он всего лишь трехметровый. В общем, время замедляется, а длина сокращается всегда в одинаковое количество раз: этот множитель иногда называется множителем Лоренца, или Лоренц-фактором.

Наше обсуждение специальной теории относительности, которое сосредоточилось на геометрии пространства-времени, пока что никак не связано со знаменитым уравнением $E = mc^2$. Попробуем найти такую связь, рассмотрев частный случай вывода этого уравнения, в котором все главные шаги можно будет проиллюстрировать геометрически. Этот случай мы называем частным, потому что он требует приближений и формул, которые мы не можем сейчас строго обосновать или вывести.

Сначала давайте сформулируем на языке уравнений, что такое масса. Лучше всего сделать это с помощью уравнения $p = mv$, где p – импульс, или количество движения, а v – скорость медленно движущегося массивного тела, масса которого равна m . Соотношение $p = mv$ прямо вытекает из механики Ньютона, и мы можем спокойно им пользоваться, пока v гораздо

меньше скорости света. Следующий шаг – найти какое-то выражение для энергии. Здесь нам придется принять без доказательства еще один результат теории электромагнетизма: количество движения светового импульса p связано с энергией света E уравнением. Как мы уже выяснили, световые импульсы отличаются тем, что всегда движутся с одной и той же скоростью, независимо от системы отсчета. Это совсем не похоже на поведение массивных объектов. В данной системе отсчета массивные объекты могут либо стоять на месте, либо двигаться с некоторой скоростью v , которая, в соответствии со специальной теорией относительности, всегда меньше скорости света.

Пусть теперь мы знаем количество движения массивного объекта $p = mv$ и светового импульса. Но было бы неверно сказать, что это одна и та же величина: ведь массивный объект не то же самое, что световой импульс! Вместо того чтобы приравнять эти значения друг другу, надо подумать, как создать массивный объект из световых импульсов, – тогда мы сможем использовать наши уравнения количества движения для вывода соотношения $E = mc^2$.

Попробуем сделать это так: установим два идеально отражающих зеркала в точности друг напротив друга и заставим два идентичных световых импульса носиться туда и сюда между зеркалами так, чтобы они всегда двигались в противоположных направлениях. Покажем, что эта воображаемая установка, по сути, является массивным телом. Представим себе, что мы способны сделать зеркала очень легкими – настолько, что в своих вычислениях как массы, так и энергии массой зеркал мы можем пренебречь. Тогда энергия нашего «массивного тела» будет вдвое больше энергии каждого из световых импульсов. Его количество движения в точности равно нулю, так как один световой импульс имеет количество движения, направленное вверх, в то время как у другого импульса его количество движения направлено вниз, и эти противоположно направленные векторы в сумме дают ноль. Ведь наше «тело» в целом никуда не движется: движутся только его части.

Чтобы вывести, наконец, из этой модели уравнение $E = mc^2$, нам осталось как-то привести нашу хитроумную конструкцию из зеркал и световых импульсов в движение. Для простоты давайте отслеживать поведение лишь одного из импульсов: если следить за обоими, и энергия и масса будут просто вдвое больше, вот и всё. Проще будет считать, что наша конструкция движется в плоскости, перпендикулярной бегающим вверх-вниз между зеркалами световым лучам, – в горизонтальной плоскости. Как только движение началось, световой импульс уже не бежит просто вверх и

вниз. Теперь он перемещается и в горизонтальной плоскости, влево-вправо. Вот тут-то и начинает работать геометрия. Движение импульса в горизонтальной плоскости происходит со скоростью v , а движения вверх-вниз – со скоростью c . (На самом-то деле эти последние движения имеют скорость чуть меньшую световой, так как скорости света должна быть равна полной скорости светового импульса. Но при той точности, которая нам нужна, эту деталь можно проигнорировать.)

Другими словами, можно сказать, что в горизонтальной плоскости происходит v/c часть общего движения светового импульса. Тогда можно утверждать, что количество движения фотона в горизонтальной плоскости $p_{\text{влево-вправо}}$ – это v/c , умноженное на его общее количество движения $p = E/c$, то есть $p_{\text{влево-вправо}} = Ev/c^2$. Но с другой стороны, $p_{\text{влево-вправо}} = mv$, что справедливо, так как $p_{\text{влево-вправо}}$ – это количество движения в горизонтальной плоскости всей нашей конструкции в целом (не забудем, что мы отслеживаем только один из двух световых импульсов), а мы рассматриваем нашу внушительную установку как массивное тело. Стоит теперь только объединить наши два способа записи $p_{\text{влево-вправо}}$, как мы получим $Ev/c^2 = mv$. Упростим это уравнение, и вот перед нами... барабанная дробь... $E = mc^2$!

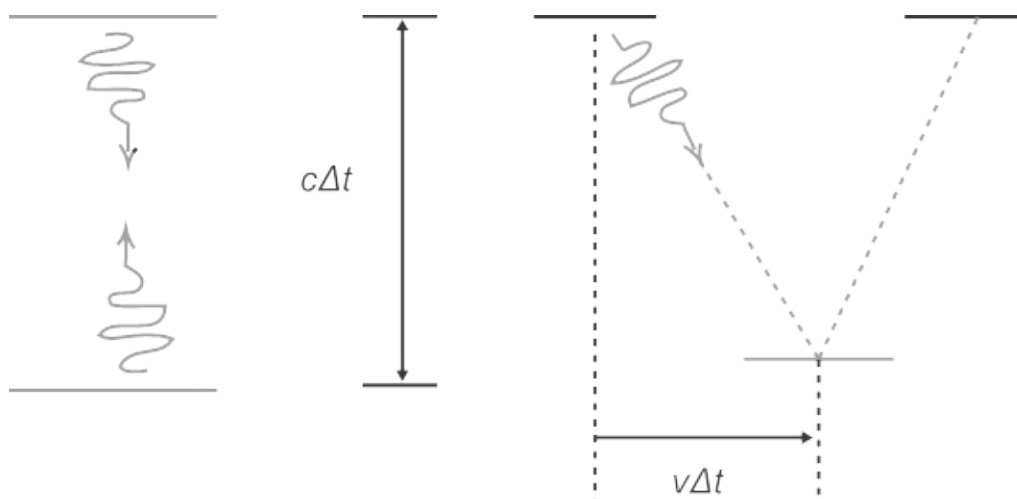


Рис. 1.3. Слева: два идентичных световых импульса, бегающие вверх и вниз между двумя зеркалами.

Справа: зеркала движутся вправо со скоростью v . За время Δt , которое необходимо, чтобы один из световых импульсов прошел от одного зеркала до второго, импульс проходит расстояние вверх или вниз, приблизительно равное $c\Delta t$, и расстояние $v\Delta t$ в сторону.

Кто-то мог бы возразить, что наша сложная конструкция из зеркал и световых зайчиков не очень-то похожа на массивные объекты, известные нам из ежедневного опыта. Но это не так. Большую часть массы вещества, с которым мы сталкиваемся каждый день, составляют протоны и нейтроны, а их можно приближенно представить как крошечные области пространства-времени, внутри которых со скоростью, близкой к световой, носятся три почти лишенных массы кварка. И если бы этим все и ограничивалось, то масса протона была бы полностью обусловлена движением составляющих его кварков, точно так же, как масса нашей конструкции из зеркал и световых импульсов обусловлена движением света. Но всё оказывается сложнее: кварки сильно взаимодействуют друг с другом, и эти взаимодействия тоже вносят существенный вклад в полную энергию – а значит, и в полную массу – протона. Тем не менее в конечном счете происхождение основной части массы обычной материи имеет большее отношение к нашей светозеркальной модели, чем к любой собственной массе фундаментальных составляющих вещества.

Чем дальше мы углубляемся в специальную теорию относительности, тем отчетливей становится ясно, что максвелловская теория электромагнетизма является ее основной предшественницей. Но во многих отношениях теория Максвелла предвосхищает и общую теорию относительности! Поэтому давайте закончим эту главу обзором главных положений замечательного произведения Максвелла.

До того, как были развиты принципы электромагнетизма, притяжение между положительным и отрицательным зарядами воспринималось в том же ключе, в каком Ньютон понимал гравитационное притяжение между Землей и Солнцем. Природа обоих этих взаимодействий при этом оставалась неясной. Ньютон признал, что он не добился понимания: о своих попытках вскрыть причину гравитационного притяжения он написал: «Эмпирически я не смог до сих пор установить причину свойств тяготения, гипотез же я не измышляю». (Таков примерный перевод с латыни, на которой написан его великий труд.) Но зато Ньютон сумел найти в высшей степени полезный количественный закон, описывающий силу гравитационного притяжения. В частности, он знал, что эта сила ослабевает пропорционально квадрату расстояния между притягивающими друг друга телами. Похожему закону обратных квадратов следует и притяжение между положительным и отрицательным зарядами. Но Ньютона и множество его последователей ставило в тупик другое: что существуют силы, действующие на расстоянии. Другими словами, им казалось очень странным, что на объект может действовать сила,

обусловленная существованием другого объекта, расположенного далеко от первого. Решение этой загадки, которое считается правильным и сейчас, предложил Майкл Фарадей. В соответствии с его идеей, заряженный объект создает вокруг себя, сам при этом подвергаясь его воздействию, силовое электрическое поле, которое распространяется в пространстве, подчиняясь четырем уравнениям. Окончательный вид этих уравнений и установил Максвелл.

По схеме, предложенной Фарадеем, отрицательные и положительные заряды не действуют друг на друга непосредственно. Отрицательный заряд ориентирует расположенное в его окрестности электрическое поле так, что оно направляется в сторону этого заряда. В свою очередь, электрическое поле притягивает положительный заряд, расположенный на некотором расстоянии от отрицательного. В конечном счете результатом является притяжение положительного заряда к отрицательному. Таким же образом мы могли бы сказать, что положительный заряд ориентирует лежащее в его окрестности электрическое поле в направлении от себя, и это электрическое поле, в свою очередь, притягивает отрицательный заряд. Оба этих эффекта возникают одновременно. Если всё, что мы наблюдаем, – это заряды, то мы с полным основанием заключим, что на них действуют равные и противоположно направленные силы, которые и притягивают их друг к другу. Точка зрения Фарадея состояла в том, что эти силы возникают только благодаря действию электрического поля, которое существует независимо от того, есть ли вокруг какие-то заряды, которые могли бы его породить.

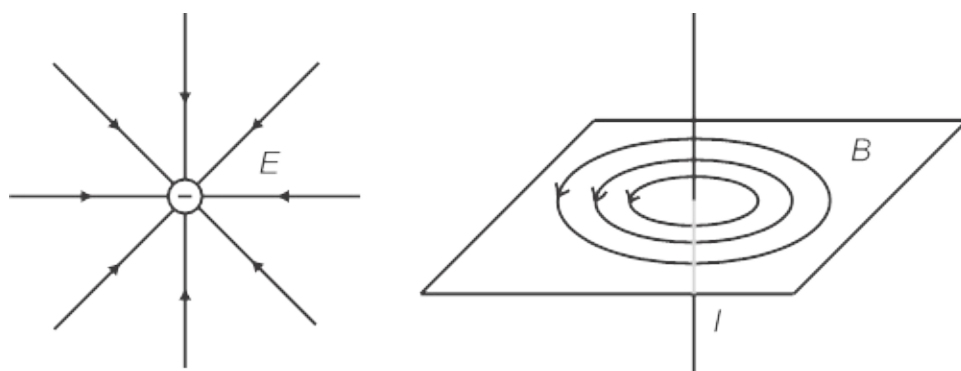


Рис. 1.4. Слева: электрическое поле E вокруг отрицательного заряда везде направлено внутрь. Справа: провод, по которому течет ток I , создает магнитное поле B , которое замыкается в круг вокруг этого провода.

Похожую картину можно нарисовать для магнитных сил и полей. Если

опустить подробности, то именно движущиеся электрические заряды и создают магнитные поля, и подвергаются их воздействию. Распространение этих полей в пространстве происходит в соответствии с уравнениями Максвелла. Особенно важным оказывается то, что магнитные поля формируются вокруг проводов, по которым течет электрический ток. Электрический ток – это движение микроскопических зарядов в проводе, так что перед нами просто еще один частный случай того же общего правила: движущиеся заряды порождают магнитные поля.

Как и электрические, магнитные поля считаются существующими независимо от какой-либо конкретной конфигурации движущихся зарядов, которые могли эти поля породить. Чтобы объяснить, что мы хотим этим сказать, рассмотрим устройство, которое Максвелл использовал при разработке окончательной формы своей теории электромагнетизма. Установим параллельно друг другу две не соприкасающиеся металлические пластинки, к каждой из которых подведен провод. Такое устройство называется конденсатором. Пусть электрический ток втекает в одну из пластин и вытекает из другой. В результате этого с течением времени на одной из пластин будет расти положительный заряд (то есть будет нарастать дефицит электронов), а на другой в равной степени будет увеличиваться отрицательный (переизбыток электронов). Из-за повышения дисбаланса зарядов на пластинах между ними существует растущее электрическое поле. Это поле направлено от положительно заряженной пластины к отрицательно заряженной, и его величина будет расти с увеличением зарядов пластин.

Мы знаем, что магнитное поле формируется вокруг токнесущего провода. В частности, магнитные поля формируются и вокруг проводов, подводящих ток к пластинам конденсатора. Но от пластины к пластине никакой ток не течет, и с наивной точки зрения отсюда должно следовать, что между пластинами не должно быть никакого магнитного поля. Максвелл счел, что это не согласуется с его пониманием устройства конденсаторов, и предложил великолепное решение: растущее электрическое поле порождает круговое магнитное поле точно так же, как это делает ток. Эта идея стала важнейшим шагом за рамки исходной картины, в которой поля порождаются зарядами и на них же действуют: теперь стало ясно, что поля порождаются полями.

А Фарадею еще до этого было понятно, что увеличивающееся магнитное поле генерирует круговое электрическое, – этот принцип лежит в основе работы электрических генераторов. Два из четырех уравнений Максвелла, по сути, формализуют эти взаимно-обратные соотношения

между электрическим и магнитным полями. Остальные два уравнения проще: они выражают тот факт, что у магнитных полей нет ни источников, ни стоков, а для электрических полей единственными источниками или стоками служат положительные и отрицательные электрические заряды. Все уравнения Максвелла являются дифференциальными уравнениями, то есть они записаны в терминах скорости изменения электрических и магнитных полей во времени, а также описывают изменения этих полей в пространстве. Дифференциальные уравнения описывают поведение полей в очень малых областях пространства-времени. Никаких действий на расстоянии в уравнениях Максвелла нет. Всё описание заключено в рамках локального притяжения и отталкивания близлежащими полями друг друга. Величайшим триумфом Максвелла стало то, что его уравнения объяснили существование света. Свет, как стало понятно Максвеллу, является комбинацией меняющихся электрических и магнитных полей, в которой пространственные изменения электрического поля вызывают временные изменения магнитного, и наоборот. Физические постоянные, содержащиеся в уравнениях Максвелла, описывают силу электростатического и магнитного взаимодействий, но если их скомбинировать определенным образом, они дают численное предсказание значения скорости света – и это предсказание можно проверить экспериментально.

Заглядывая вперед, скажем, что впоследствии нам придется глубоко обдумать две критически важные параллели между электромагнетизмом и общей теорией относительности. Обе эти теории включают в себя фарадеевскую концепцию поля, и обе, в конечном счете, выражаются дифференциальными уравнениями, описывающими поведение полей, которые подразумевают некоторую форму излучения. В случае электромагнитного излучения электрические поля порождают магнитные, и наоборот – в самоподдерживающемся каскаде, распространяющемся в пространстве-времени в соответствии с уравнениями Максвелла. У этого каскада есть характерная длина волны, на протяжении которой электрические и магнитные поля меняются от нуля до своего максимального значения, затем вновь до нуля и до следующего максимума, и снова до нуля. Видимый свет при этом представляет собой частный случай такого излучения с длиной волны около полумикрона. Затем с ростом длины волны мы переходим к инфракрасному излучению, микроволнам, радиоволнам, а двигаясь в коротковолновую область, получаем ультрафиолетовое излучение, рентген и гамма-лучи.

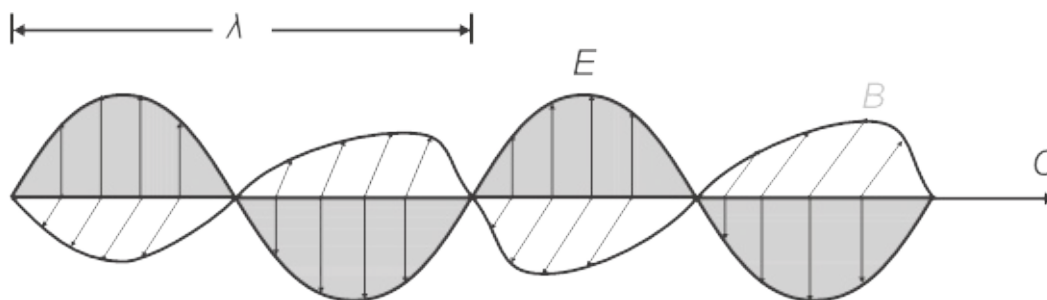


Рис. 1.5. Световой луч – это возмущение электрического (E) и магнитного (B) поля, распространяющееся в одном направлении со скоростью света c . Если считать, что на этом рисунке изображена истинная длина волны, то есть несколько сантиметров, то это излучение микроволнового диапазона, чуть более коротковолновое, чем то, что используется в обычной микроволновке.

Эйнштейн нашел гравитационную аналогию уравнениям Максвелла – это-то и есть главное содержание общей теории относительности. В уравнениях Эйнштейна поля оказываются более странными, чем электрическое и магнитное: они неожиданно представляются как искривление самого пространства-времени. Еще большая неожиданность в том, что в рамках общей теории относительности массивные объекты можно описать в чисто геометрических терминах, что совсем не похоже на электромагнетизм, в котором заряды остаются фундаментальной величиной. Эти чисто геометрические массивные объекты и оказываются не чем иным, как черными дырами.

Глава 2

Общая теория относительности

В специальной теории относительности пространство-время представляет собой пустую сцену. Наблюдатели и световые лучи движутся по ней, и мы можем вполне обоснованно говорить о времени между двумя событиями или о расстоянии между двумя объектами, при условии, что мы помним о таких понятиях, как собственное время, собственная длина, замедление времени и сокращение длин. Основная идея о том, что все движения относительны, только подчеркивает, насколько пусто пространство-время. Если бы в нем было «что-то» – вроде стационарного неподвижного «эфира», заполняющего его целиком – мы могли бы прийти к концепции абсолютного движения, постоянно сверяясь с системой отсчета, связанной с эфиром, и описывая объекты как стационарные или движущиеся в зависимости от их движения относительно эфира^[2].

Общая теория относительности смотрит на все это совсем по-другому. Главным игроком в ней становится пространство-время. Массивные тела искривляют его в соответствии с полученными Эйнштейном уравнениями поля $G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}/c^4$. Давайте посмотрим, что означают символы в этом уравнении. Греческие индексы μ и ν – обозначения, употребляющиеся в так называемых тензорах: математических структурах, которые позволяют нам записать все десять отдельных полевых уравнений сразу. Тензор Эйнштейна $G_{\mu\nu}$ описывает кривизну пространства-времени. Тензор энергии-импульса описывает присутствие материи: в пустом пространстве $T_{\mu\nu} = 0$. Гравитационная постоянная Ньютона G_N показывает, насколько сильно на пространство-время влияет материя. Как обычно, c обозначает скорость света. Множитель 8π , где $\pi = 3,14159$, – относительно несущественная постоянная. Мы могли бы переопределить G_N так, чтобы она включала в себя 8π , но мы не станем этого делать, так как G_N входит и в ньютоновское описание гравитации и теперь уже поздно менять ее значение.

Возникает вопрос: как может общая теория относительности при столь активной роли в ней пространства-времени включать в себя специальную? Ответ заключается в том, что в большинстве случаев сила тяготения крайне мала. Если мы вообще проигнорируем тяготение, то вернемся к

пространству-времени Минковского, не имеющему никакой кривизны и содержащему большинство факторов, благодаря которым специальная теория относительности работает так, как она работает. В частности, пространство-время Минковского остается тем же, как до, так и после преобразований Лоренца, что на математическом языке означает, что все системы отсчета эквивалентны. В присутствии тяготения эквивалентность систем отсчета исчезает (по крайней мере, в смысле, который этому понятию придает специальная теория относительности), так как гравитирующее тело делает одну из систем отсчета выделенной. Читатель может припомнить, что мы уже споткнулись на этом однажды, когда в главе 1 сначала описали систему отсчета Боба (Б) как неподвижную, в то время как на самом деле она была неподвижной *только относительно Земли*.

Даже в присутствии тяготения мы все же часто можем пользоваться специальной теорией относительности в малых областях пространства-времени. Это объясняется тем, что слабая гравитация искривляет пространство-время лишь чуть-чуть, и если мы фокусируемся на объектах и событиях, расположенных достаточно близко во времени и пространстве, мы вполне можем приближенно описать их, как если бы пространство-время было плоским. Например, представим себе, что пуля пробивает яблоко как раз в тот момент, когда оно падает с дерева. Тяготение действует, и под его воздействием за определенное время яблоко упадет на землю с некоторой доступной измерению скоростью. Но за тот очень короткий миг, в течение которого пуля проходит сквозь яблоко, изменение скорости яблока под действием силы тяжести будет так незначительно, что его можно не принимать во внимание. И если нам необходимо вычислить собственное и замедленное время, прошедшее, пока пуля пробивает яблоко, это можно сделать в рамках специальной теории относительности.

Чтобы представить себе, насколько эта ситуация отличается от той, когда тяготение имеет значение, вообразим, что пуля пробивает черную дыру! Специальная теория относительности здесь работать не будет. Как только пуля прошла через горизонт черной дыры, она исчезла, и с другой стороны дыры мы не обнаружим никаких ее следов. И дело не в том, что черные дыры такие уж большие; все будет точно так же, даже если горизонт черной дыры будет размером с яблоко. Пространство-время внутри черной дыры настолько искривлено, что любой объект, попавший внутрь нее, лишается будущего. (Между прочим, черная дыра с горизонтом размером с яблоко имела бы массу примерно в пять раз больше массы Земли.)

Итак, сначала мы будем испытывать правильность наших

интуитивных представлений об общей теории относительности, рассматривая тяготение в ситуациях, где оно довольно слабое, «обычное», вроде того, которое действует на нас на Земле. Тут все равно останутся некоторые странности, к которым придется привыкнуть, и прежде всего то, что время будет течь быстрее или медленнее в зависимости от вашего положения в «гравитационном колодце» – то есть от расстояния до центра масс. В конце этой главы мы снова обратимся к уравнениям Эйнштейна и увидим, как они разворачиваются во всем их блеске, когда выражаются языком дифференциальной геометрии. Только говоря на этом языке, мы сможем полностью выразить идеи последующих глав, в частности говорить о геометрии искривленного пространства-времени, которая и реализуется в черной дыре.

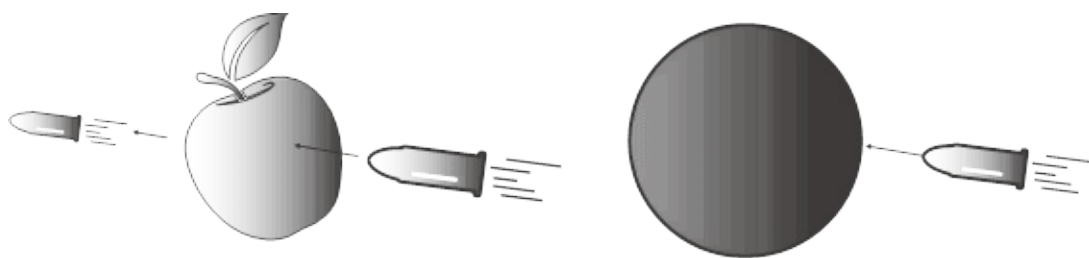


Рис. 2.1. Слева: пуля пробивает яблоко в момент, когда оно отрывается от ветки и начинает падать. Специальная теория относительности в этой ситуации работает, так как тяготение столь слабо и действует в течение столь короткого времени, что им можно пренебречь. Справа: пуля влетает в черную дыру, горизонт которой имеет тот же размер, что и яблоко. Пуля никогда не вылетит с другой стороны черной дыры!

Насколько это возможно, мы хотим объяснить общую теорию относительности из аналогии с электромагнетизмом. Следовательно, нам придется начать с концепции поля и прийти к уравнениям поля, которые подразумевали бы наличие излучения. Наша конечная цель, эйнштейновские уравнения поля – это дифференциальные уравнения в локальной форме, которые отражают взаимное притяжение и отталкивание соседних участков искривленного пространства-времени. Но разбираться в сложном описании сильно искривленного пространства-времени в целом нам пока что вовсе не хотелось бы, и именно поэтому мы сейчас ограничиваем наше рассмотрение тем, что назовем «обычным тяготением». Под этим мы понимаем тяготение в ситуациях, где все интересующие нас массивные тела движутся друг относительно друга гораздо медленнее скорости света, а их плотность не дает и намека на возможность их

превращения в черную дыру. Таким местом является наша Солнечная система, да и почти вся наша Галактика, за исключением окрестностей сколлапсировавших звезд и черных дыр вроде той, что притаилась в галактическом центре. Обсуждая обычное тяготение, мы ограничиваемся ситуациями, где пространство-время почти, хотя и не полностью, плоское.

В электромагнетизме самым простым проявлением концепции поля служит электрическое поле, посредством которого притягиваются друг к другу положительный и отрицательный заряды. Наш первый шаг к пониманию общей теории относительности как раз и состоит в том, чтобы описать обычное тяготение в терминах, похожих на те, что применяются для описания электрического поля, то есть как нечто, проявляющееся повсюду в пространстве-времени, вне зависимости от того, присутствуют в нем гравитирующие тела или нет. Проще говоря, мы пытаемся найти ответ, который ускользнул от Ньютона, написавшего о природе тяготения: «Гипотез не измышляю».

Этим ответом оказывается само время. Точнее, обычное тяготение возникает из-за гравитационного красного смещения: время идет медленнее, когда вы находитесь вблизи массивного тела. Впервые гравитационное красное смещение прямо наблюдали в 1959 году Роберт Паунд и Глен Ребка в ходе эксперимента, о котором мы вскоре расскажем. Гравитационное красное смещение исключительно слабое (на поверхности Земли оно составляет примерно одну миллиардную долю), но все же оно достаточно велико, чтобы заметно влиять на работу спутников глобальной системы позиционирования (GPS). В гравитационном колодце Земли эти спутники расположены значительно выше, чем мы, живущие на земной поверхности, и в результате часы на спутниках идут чуть быстрее, чем наши. Точный отсчет времени критически важен для высокоточного определения системой GPS положений на земной поверхности, и поэтому релятивистские эффекты в этой системе строго учитываются. Для понимания природы черных дыр вопрос о течении времени тоже очень важен. В главе 3 мы подробно рассмотрим этот вопрос и увидим, что пространство-время в окрестностях черной дыры искривляется так сильно, что когда мы достигаем горизонта, время в его обычном понимании полностью останавливается. Рассматривая во всех подробностях свойства гравитационного красного смещения, необходимо помнить, что все сделанные выше утверждения о нем можно перенести на пространство-время черной дыры только при условии, что мы не рискуем слишком приближаться к ее горизонту. В главе 3 мы дополним наше описание черных дыр, пойдя на этот риск и погрузившись в гравитационный колодец

черной дыры настолько глубоко, что нас в конце концов уничтожит сингулярность в ее ядре.

Но вообще-то идея о замедлении времени вблизи массивных тел довольно сомнительная. Как мы могли бы убедиться, что время действительно замедляется? И почему следствием такого замедления будет гравитационное воздействие на другие массивные тела? Опыт Паунда – Ребки убедительно отвечает на первый из этих вопросов. Ответ на второй в конце концов приведет нас к важнейшей идее о пространственно-временной геодезической линии.

Паунд и Ребка измерили гравитационное красное смещение, используя для этого – угадайте что? – конечно, световой импульс. Из своих исследований радиоактивных изотопов они знали, что железо-57 (изотоп железа с 26 протонами и 31 нейтроном) может поглощать и излучать фотоны с исключительно точно установленной частотой: примерно 3 миллиарда миллиардов герц. Для сравнения, радиостанция «Нью-Джерси 101.5» работает на значительно более низкой частоте: всего лишь около 100 миллион герц. Один герц – это одно колебание в секунду, то есть миллион герц означает миллион колебаний в секунду. Мы можем, следовательно, представлять себе атомы железа-57 в виде крохотных часов, которые тикают три миллиарда миллиардов раз в секунду. И это «тиканье» можно наблюдать на расстоянии, потому что каждый раз атом железа-57 будет испускать фотон, который мы увидим. Паунд и Ребка посылали фотоны, испускаемые железом-57, от основания башни высотой немногим более 22 метров к ее вершине. У них был способ измерять частоту этих фотонов на верхней площадке башни с невероятной точностью, хотя, по сути, их метод измерений был аналогичен способу, которым вы настраиваетесь на радиоволну станции «Нью-Джерси 101.5», отличая ее от частот других радиостанций. Паунд и Ребка обнаружили, что на вершине башни частота фотонов была меньше, чем у ее подножия, и это уменьшение частоты было в точности таким, какое предсказывается теорией гравитационного красного смещения.

Из эксперимента Паунда – Ребки мы уже начинаем догадываться, почему гравитационное красное смещение имеет какое-то отношение к гравитационному притяжению. Для того чтобы это окончательно стало понятно, нам понадобится вспомнить еще об одном озарении Эйнштейна (в этом случае он следовал идеям Макса Планка): энергия фотона пропорциональна его частоте, так что когда частота уменьшается, уменьшается и энергия. Понятно, почему энергия фотона уменьшается, когда он летит вверх, – ведь при этом он преодолевает силу тяготения.

Потеря энергии не может выражаться в замедлении фотона – в общей теории относительности, так же как и в специальной, свет всегда должен распространяться с одной и той же скоростью. И вместо замедления потеря энергии выражается в гравитационном красном смещении частоты фотона.

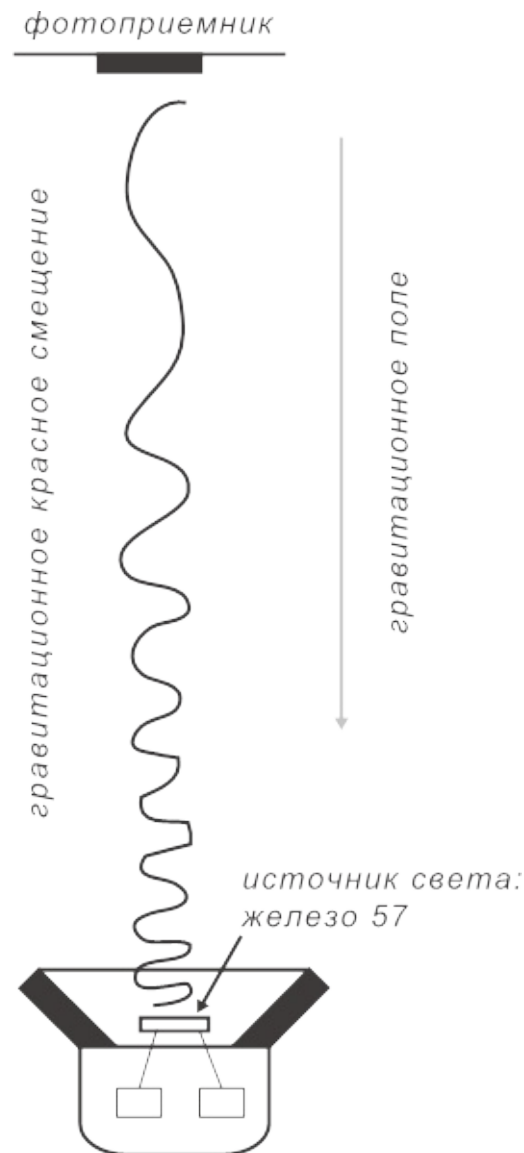


Рис. 2.2. Схема опыта Паунда – Ребки. Фотоны, испускаемые железом-57, летят вверх, преодолевая силу тяготения.

Наверху фотоприемник измеряет их гравитационное красное смещение.

Увеличение длины волны соответствует покраснению света.

Красное смещение в реальном эксперименте было гораздо меньше, чем показано на рисунке.

Из того, что мы узнали о замедлении времени в главе 1, мы могли бы подумать, что гравитационное красное смещение возникает по другой причине: при падении в гравитационный колодец все тела испытывают ускорение, а значит, их время замедляется. Но нет. Гравитационное красное смещение – нечто совсем другое, нечто совершенно новое. Ведь часы Паунда и Ребки покоились относительно Земли.

Гравитационное красное смещение происходит повсюду. Например, из-за него ваша голова стареет быстрее, чем пятки, – если, конечно, вы целыми днями не лежите на диване. Как и замедление времени, этот эффект численно очень мал и не сказывается на нашем ежедневном опыте: за время вашей жизни разница в возрасте головы и пяток составит несколько десятых долей микросекунды. Чтобы этот эффект стал более ярко выраженным, вам пришлось бы попасть в гораздо более сильное гравитационное поле, чем у Земли! Вот если бы при своих размерах Земля была бы черной дырой, а ваши пятки располагались бы всего в нескольких сантиметрах над ее горизонтом событий, вот тогда ваши пятки старились бы гораздо медленнее, чем голова, расположенная в метре над горизонтом. Конечно, опыт пребывания в такой среде был бы в буквальном смысле слова сногшибательным. Но не забудем, что мы обсуждаем только абстрактную возможность.

Как включить идею о том, что тяготение обусловлено замедлением времени вблизи массивных тел, в описание обычных гравитационных явлений, таких как падение яблока или орбитальное движение планет? Для этого лучше всего подойдет высказывание, которое Вольтер вложил в уста своего Панглосса: «Все к лучшему в этом лучшем из миров». Во времена Вольтера ученые и математики, среди которых первым надо назвать Жозефа Луи Лагранжа, были убеждены, что движения массивных тел – падающих яблок и летящих по своим орбитам небесных тел – в некотором смысле происходят наилучшим возможным образом. Другими словами, постепенно ускоряющийся полет яблока с ветки к земле является как бы лучшим из всех возможных движений между исходным и конечным состояниями яблока. Великим достижением Лагранжа было то, что он сформулировал эту идею в точных математических терминах. В его описании любое представимое движение яблока между заданными начальным и конечным состояниями выражается через идею действия. Реальный способ движения, который «выбирает» яблоко, соответствует такому, при котором действие оказывается либо наименьшим, либо наибольшим. В любом случае действительное движение является лучшим в точно определенном математическом смысле.

Но для последователя Ньютона данное Лагранжем определение механики как задачи оптимизации покажется полным абсурдом. Как может неодушевленный объект «выбирать» оптимальный путь движения из множества возможных? По Ньютону, мир устроен совершенно иначе: предметы движутся по прямым линиям, пока на них не подействует сила, после чего их состояние движения изменяется в соответствии с законом $F = ma$. При чем же тут какая-то «оптимальность»? Но магия в том, что очень тщательно сконструировав для движущихся тел концепцию «действия», Лагранж сумел в точности воспроизвести законы Ньютона: ни больше, ни меньше. Да, надо признать, что выбор этой концепции был несколько парадоксальным. Но как только мы переходим к общей теории относительности, значение введенной Лагранжем формулировки становится очевидным. «Действием» объекта становится время, протекшее для наблюдателя, движущегося вместе с объектом. Движение, в действительности совершаемое объектом, оптимизирует собственное время, протекающее для этого объекта. Это принцип оптимального собственного времени. В случаях, которые мы будем рассматривать, собственное время максимально.

Один пример из специальной теории относительности поможет нам уточнить предмет нашего обсуждения.

(Не забудем, что в специальной теории относительности мы временно забываем о тяготении.) Этот пример называется парадоксом близнецов. Вот как он формулируется. У двух наблюдателей, которых мы, как обычно, назовем Алисой и Бобом, имеются совершенно одинаковые часы с секундомером. У Алисы есть звездолет и следующий план: она собирается улететь на нем от Боба на один день, двигаясь с постоянной скоростью (для определенности, равной половине скорости света), затем развернуться и возвратиться к Бобу. Боб тем временем останется на месте и не будет делать ничего. Если мы вспомним наше обсуждение собственного времени из главы 1, то сможем предвидеть результат этого эксперимента: длительность этого путешествия, измеренная Бобом по его часам, будет больше тех двух дней, которые пройдут для Алисы по ее часам. Точнее, при тех количественных данных, которые мы приняли, измеренное Бобом время путешествия Алисы составит примерно 2,3 дня.

Парадокс близнецов возникает вследствие следующего неверного рассуждения. Все движения относительны. Поэтому, с точки зрения Алисы, именно Боб улетел от нее, а потом вернулся. Разве она не должна точно так же, как и он, ожидать, что измеренное им время окажется меньше, чем по ее часам?

Чтобы увидеть, в чем недостаток этого рассуждения, нам следует точно определить различие между Алисой и Бобом: оно состоит в том, что Алиса испытала ускорение, когда разворачивалась, чтобы отправиться в обратный путь, а Боб этого не делал. Например, мы могли позволить Бобу свободно парить в пустоте в течение всего времени путешествия Алисы. С точки зрения Лагранжа, именно поведение Боба было «оптимальным», так как оно было абсолютно естественным и не требовало никакого внешнего вмешательства. Значит, то, что именно его собственное время оказалось большим, оправданно.

Есть замечательный вариант парадокса близнецов, в котором учитываются гравитационные эффекты (рис. 2.3). Допустим, что Алиса и Боб живут в глубоком гравитационном колодце, где они оба ходят в школу. У них трудное домашнее задание, которое им надо сдать через 48 часов, например, в 9:00 утра в понедельник. Из своего опыта с парадоксом близнецов Боб заключает, что больше всего времени на выполнение задания у него будет, если он станет как можно меньше двигаться. Поэтому он идет в школу очень медленным и спокойным шагом, все это время работая над своим заданием, и приходит туда в понедельник к 9:00 утра. Беспокойная Алиса соображает, что ей лучше прыгнуть в свою ракету и поскорее вылететь из гравитационного колодца: ведь отсутствие гравитационного красного смещения даст ей больше времени на выполнение задания. Но она опасается, что замедление времени, которое она испытает при полетах вверх и вниз, окажется более значительным. Согласно принципу оптимального собственного времени, чтобы максимизировать свое время, Алисе следует делать то, что при этих обстоятельствах делала бы инертная материя. А каково естественное поведение инертной материи? Она, как известно, любит покой! Получается, что план Боба минимизировать свои движения и идти в школу очень медленно правильный? Но все меняет присутствие тяготения. Вещество в гравитационном колодце вовсе не любит покоиться. Ему больше нравится падать. В присутствии тяготения для Боба вовсе не будет естественным тащиться в школу еле-еле: он может так поступать, только если находится на вершине какой-нибудь кучи вещества, которая в гравитационном колодце лежит еще глубже него. Если мы хотим, чтобы кусок инертного вещества отправился от дома Боба и Алисы в 9:00 утра в субботу и спустя 48 часов оказался бы у их школы, мы должны его запустить по изогнутой дугой траектории, чтобы ровно в 9:00 утра в понедельник он приземлился у школы. Сообразив все это, довольная Алиса залезает в свою ракету, жмет на газ, отчего ее ракета получает мощный импульс, на который уходит весь

запас горючего, и весь остаток выходных летит по инерции, по дороге усердно работая над своим заданием^[3]. Ее ракета теперь не более чем баллистический снаряд, то есть, если не считать начального импульса на старте, она движется под действием только одной силы тяготения. Другими словами, она находится в состоянии свободного падения.

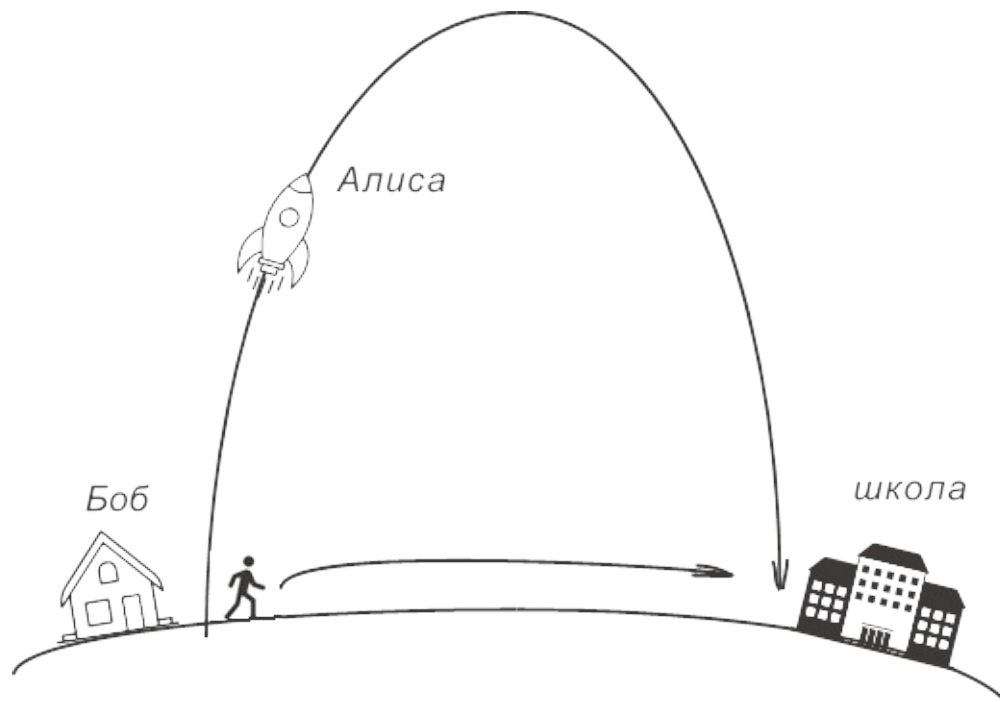


Рис. 2.3. Боб делает свое домашнее задание на ходу, неторопливо шагая по направлению к школе. Алиса садится в ракету и делает уроки в полете. Если Алисина ракета получает ускорение одним импульсом и затем весь оставшийся путь до школьного звонка в понедельник утром летит по инерции, тогда у Алисы будет больше времени на подготовку домашнего задания, чем у Боба.

Эксперименты Алисы и Боба с замедлением времени помогают проиллюстрировать эйнштейновский принцип эквивалентности. В простейшей форме этот принцип состоит в том, что действие ускорения неотличимо от действия тяготения.

Ключ к разрешению исходной, негравитационной формы парадокса близнецов состоит в том, что именно Алисе приходится испытывать ускорение при развороте для возвращения к Бобу. Если мы позаботимся о том, чтобы это ускорение было медленным и постоянным, а не резким, тогда оно будет эквивалентно тому, что Алиса проведет все свое путешествие в гравитационном поле. Главная же особенность

гравитационного варианта парадокса близнецов заключается в том, что Алиса проводит свои выходные в состоянии свободного падения, в то время, как Боб свои – в гравитационном поле. Таким образом, в этих двух версиях парадокса Алиса и Боб, по сути, меняются ролями.

Более рутинный пример принципа эквивалентности – это когда в лифте мы чувствуем себя тяжелее, если лифт с ускорением поднимается вверх, и легче, если он с ускорением опускается. Если лифт с ускорением поднимается в пустом пространстве в отсутствие каких-либо гравитирующих тел поблизости, то наши наблюдения внутри лифта идентичны тем, которые мы проводим, когда лифт остается покоящимся в гравитационном поле Земли. Точно так же, если лифт свободно падает в гравитационном поле Земли, мы испытываем такую же невесомость внутри него, какую мы бы испытывали, если бы свободно висели в пустом космическом пространстве.

Чтобы вернуться обратно к уравнениям Эйнштейна, наберемся храбрости и назовем скорость хода времени ее правильным математическим именем: функция хода. Другими словами, функция хода – это скорость, с которой время идет в любой заданной точке пространства. Правило вычисления функции хода в присутствии произвольно распределенных медленно движущихся масс дается дифференциальным уравнением, похожим на одно из уравнений Максвелла. Зная функцию хода, мы можем затем обратиться к принципу оптимального собственного времени для определения траектории массивного тела под воздействием гравитационного поля.

Дифференциальные уравнения для вычисления функции хода в присутствии медленно движущихся масс являются, вообще говоря, частным случаем одного из уравнений Эйнштейна. Существует еще девять функций, похожих на функцию хода, которые в совокупности полностью определяют форму искривленного пространства-времени, и для каждой из них можно составить эйнштейновское уравнение поля. То, что все эти десять функций совместно определяют, называется метрикой пространства-времени – это правило вычисления расстояния между соседними точками, а также скорости течения времени. Как только мы начинаем говорить о метриках, мы оказываемся на территории дифференциальной геометрии, которая изучает произвольно искривленные поверхности. В общей теории относительности используются и геометрии искривленных поверхностей высших порядков, в том числе искривленного пространства-времени.

Наше обсуждение «обычного» тяготения может создать у вас впечатление, что пространство остается идеально плоским, тогда как время

в различных его точках идет с разной скоростью. Это не совсем так. В действительности, в областях, где время идет медленнее, пространство немного «раскрывается». Чтобы понять, что это значит, представьте себе, что Земля заключена в идеальную сферическую оболочку, площадь которой вы можете тщательно измерить. Далее, вы измеряете радиус этой сферы. (Возможно, для этого придется просверлить Землю до самого ее центра, но будем считать, что мы достигли соответствующего уровня техники и можем это сделать.) Естественно, вы обнаружите, что площадь A и радиус r сферы связаны формулой $A = 4\pi r^2$. Однако так как внутри сферы находится Земля, r будет чуть больше относительно A , чем следовало бы из соотношения $A = 4\pi r^2$. Другими словами, объем сферы, заключающей в себе Землю, немного больше объема пустой сферы с той же площадью поверхности. Как и гравитационное красное смещение, расширение пространства вблизи массивных тел проявляется очень слабо, если мы ограничиваем рассмотрение обычным слабым полем тяготения. Фактически оказывается, что наши пространственные измерения (удобным образом определенные) расширяются примерно на ту же величину, на которую замедляется ход времени. Может показаться, что все наши предыдущие рассуждения о падающих телах были неверными, мы ведь предполагали, что гравитационное красное смещение – это только эффект тяготения. Но дело спасает то, что наблюдатели, медленно движущиеся по отношению к гравитирующим телам, гораздо более чувствительны к замедлению времени, чем к расширению пространства. Мы же договорились иметь дело с «обычным тяготением», а в этом случае, в частности, требуется, чтобы никакое гравитирующее тело не имело плотности даже отдаленно сравнимой с той, которая достаточна для образования черной дыры. Чтобы понять, что произойдет, если мы откажемся от этого упрощающего предположения, нам придется глубже влезть в дебри дифференциальной геометрии. Дифференциальная геометрия (по крайней мере, та ее часть, которая нам нужна) стоит на трех китах: метриках, геодезических и кривизне. Все эти понятия можно проиллюстрировать, рассматривая любую искривленную поверхность, например поверхность Земли. Метрика – это просто, потому что тут всё дело в расстоянии; во всяком случае, поначалу кажется, что это просто. Например, мы знаем, что от Вашингтона до Сан-Франциско примерно 2440 миль. Под этим мы подразумеваем, что, если вы проделываете это путешествие по поверхности Земли (или чуть выше поверхности, если вы туда летите), то кратчайшее расстояние от Вашингтона до Сан-Франциско составит 2440 миль. Но если мы будем рассматривать эти города как две точки в

пространстве, они окажутся чуть ближе, на расстоянии около 2400 миль. Это незначительное различие связано с тем, что если бы мы могли двигаться сквозь Землю по прямой, мы бы немного выиграли в расстоянии по сравнению с движением по сферической поверхности. Если перемещаешься по поверхности, твой путь неизбежно будет искривлен; чтобы найти полное расстояние, естественно разбить путь на небольшие отрезки, каждый из которых будет почти прямым, а потом сложить все длины этих отрезков. Термин «дифференциальный» относится как раз к этому процессу деления на кусочки и их измерению. Понятие метрики в дифференциальной геометрии и должно помочь нам определить длины кусочков. Если мы хотим вычислить общую длину пути, дифференциальная геометрия предлагает нам просто сложить все длины кусочков, а это упражнение в интегрировании.

Геодезическая на земной поверхности между Вашингтоном и Сан-Франциско – это кратчайший возможный путь для путешественника, передвигающегося по земле. Геодезическая – это не прямая, но она настолько же близка к прямой, насколько может быть к ней близка любая тропинка на поверхности Земли. Называя ее «прямой», мы хотим сказать, что, идя вдоль геодезической из Вашингтона в Сан-Франциско, мы будем идти прямо, никуда не сворачивая. Из-за кривизны Земли этот самый прямой из возможных путей пройдет немного севернее по широте, чем расположен каждый из двух городов. Еще более рельефный пример той же ситуации дают самолеты, летящие, например, из Афин в Сан-Франциско через Северный полюс. Оказывается, кратчайший путь между этими городами лежит над Гренландией, широта которой гораздо выше, чем широта любого из них. (Конечно, самолеты летят над Землей, а не по ее поверхности, но по сравнению с радиусом Земли высотой их полета вполне можно пренебречь, и для наших целей мы вполне можем представить себе, что самолеты летят практически по земной поверхности.)

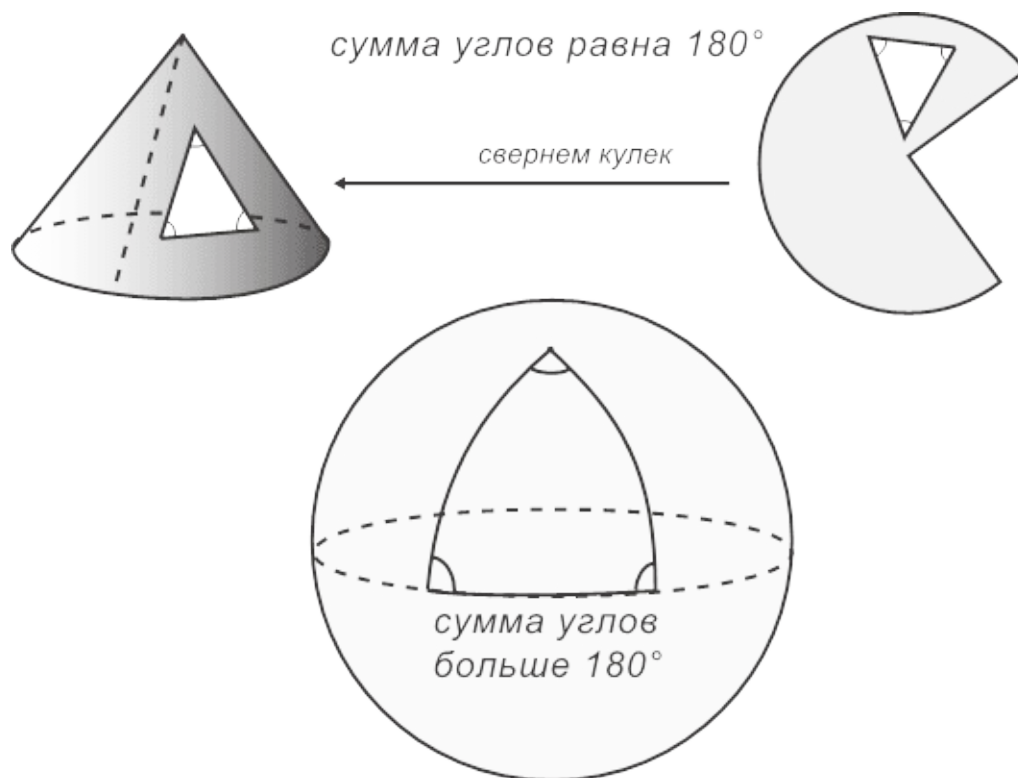


Рис. 2.4. Конус не имеет внутренней кривизны – любой лист бумаги легко можно свернуть в кулек. Поэтому когда мы рисуем треугольник со сторонами, являющимися отрезками геодезических, сумма его углов будет равна 180° .

У того же треугольника, нарисованного на листе до его сворачивания в кулек, стороны представляют собой обычные отрезки прямых. А вот у сферы есть положительная внутренняя кривизна, и поэтому у треугольника, стороны которого образуются отрезками геодезических, сумма углов будет больше 180° .

Идея кривизны поначалу выглядит очень просто: мы все понимаем, как искривлена поверхность земного шара. Но в действительности в понятии кривизны, в той его форме, в какой оно чаще всего используется в дифференциальной геометрии (и которая необходима в теории относительности), есть один очень тонкий момент. Чтобы понять, в чем он состоит, рассмотрим различие между конусом и сферой. Обе эти поверхности искривлены, но по-разному. Плоский лист бумаги можно скрутить в конус без растяжения, а со сферой так не получится: если вы хотите покрыть сферу плоским листом бумаги, придется его смять или разорвать. Поэтому мы говорим, что сфера «внутренне искривлена», а конус «внутренне плоский» (если не считать его кромки и вершины). И

сфера, и конус обладают «внешней кривизной», что попросту означает, что у них кривые поверхности в трехмерном пространстве. В теории относительности всё дело как раз в наличии внутренней кривизны. Чтобы сосредоточиться на этом параметре искривленных поверхностей, мы ограничимся такими вопросами, на которые можно получить ответ при помощи одних только измерений, производимых на поверхности. При таком подходе мы скажем, что расстояние от Вашингтона до Сан-Франциско равно 2440 миль, и не будем при этом задумываться о более коротком прямом пути между ними сквозь Землю.

Чтобы еще лучше понять геометрию внутренне искривленных поверхностей, надо задуматься о треугольниках, стороны которых образованы геодезическими. В плоской двумерной геометрии сумма углов при вершинах любого такого треугольника будет равна 180° . При наличии положительной внутренней кривизны, такой как кривизна земной поверхности, сумма углов будет больше 180° . Оказывается, есть такие искривленные поверхности (похожие по форме на шейку песочных часов), на которых треугольники, составленные из геодезических, будут иметь сумму углов меньше 180° . Это случай отрицательной внутренней кривизны.

Теперь, когда мы обрисовали главные идеи дифференциальной геометрии, посмотрим, как они обобщаются на четырехмерное пространство-время в общей теории относительности.

Используемая в ней метрика немного сложнее, чем метрика на поверхности Земли, так как задачи у этих метрик разные: вторая определяет расстояние между двумя пространственно разделенными событиями, а первая – время, протекшее между событиями, разделенными во времени. Временной интервал между разделенными во времени событиями в точности равен времени, протекшему для свободно падающего наблюдателя между моментами наблюдения одного и другого события в предположении, что оба события происходят в одной и той же точке в системе отсчета наблюдателя. Осмыслить пространственно разделенные события сложнее: по определению эти события разделены таким расстоянием, что наблюдатель, движущийся медленнее света, не может наблюдать их оба в одной и той же точке в своей системе отсчета. Для статического (то есть не изменяющегося со временем) пространства-времени можно определить расстояние между пространственно разделенными событиями через продолжительность распространения сигнала от одного из них до другого. Для общей теории относительности понятие метрики служит основополагающим: решения уравнений

Эйнштейна не что иное, как метрика пространства-времени. Все наше обсуждение черных дыр в главах 3 и 4 будет строиться на особых метриках пространства-времени, известных как решения Шварцшильда и Керра.

Как мы уже упоминали, метрика в общей теории относительности определяется десятью функциями; одна из них является, в сущности, функцией хода, из которой можно определить скорость течения времени. Еще одна функция из десяти показывает, как «раскрывается» пространство в присутствии массивных тел. Остальные восемь функций описывают различные искажения пространства-времени – как в «комнате смеха», где ваше отражение растягивается то в одном, то в другом направлении. Все эти десять функций можно объединить в так называемый метрический тензор, обозначаемый обычно $g_{\mu\nu}$, – не путать с тензором Эйнштейна $G_{\mu\nu}$!

Геодезические в теории относительности тоже несколько более сложные, чем на кривых поверхностях, отчасти потому, что они бывают трех разновидностей. Пространственноподобная геодезическая – это кратчайший путь между двумя пространственно разделенными точками, как прямое шоссе из Вашингтона в Сан-Франциско. Но, в отличие от шоссе, пространственноподобная геодезическая – это путь, которым не сможет пройти ни один наблюдатель: чтобы сделать это, он должен двигаться быстрее света. На первый взгляд это выглядит абсурдно: возможно ли, чтобы нельзя было пройти кратчайшим путем из одной точки в другую? Дело в том, что геодезическая в пространстве-времени определяет не только куда вы должны отправиться, но и когда вы должны туда добраться. Хороший пример пространственноподобной геодезической – это отрезок прямой при постоянном времени между двумя точками в пространстве Минковского. «Следовать» этой геодезической означало бы, что вы прибываете в пункт назначения в тот же момент, в который покидаете пункт отправления, что, разумеется, невозможно.

Второй тип геодезической – времениподобная: это траектория, по которой естественно движутся массивные тела, если на них не действуют никакие силы, кроме тяготения. Пример такой геодезической – баллистическая траектория движения Алисы в гравитационном поле и свободный полет Боба в пространстве, где не действует гравитация. Времениподобные геодезические максимизируют собственное время, как мы уже видели при нашем обсуждении нескольких версий парадокса близнецов. В самом деле, принцип оптимального собственного времени получает свое полное выражение в требовании, чтобы массивные тела в пространстве-времени произвольной кривизны двигались по

времениподобным геодезическим.

В общей теории относительности есть и еще один тип геодезической – нулевая. По такой траектории естественно движется световой луч в искривленном пространстве-времени. Иногда геодезические в общей теории относительности называют «пространственно-временными геодезическими», чтобы подчеркнуть, что они содержат информацию как о времени, так и о пространстве. Но на практике большинство людей говорит просто «геодезическая», и мы впредь будем придерживаться этой сокращенной терминологии.

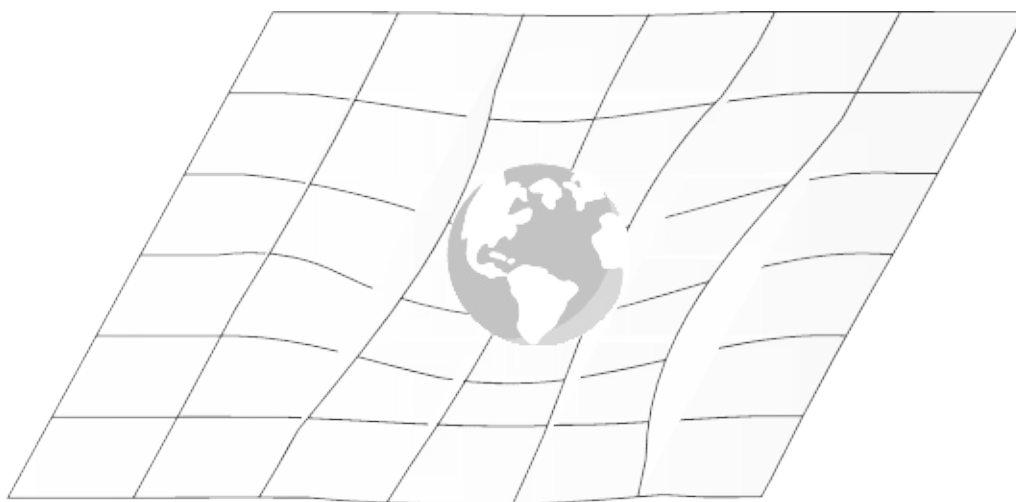


Рис. 2.5. Земля заставляет пространство деформироваться, что на рисунках часто изображается линиями, прогибающимися вниз. Пространство действительно искривляется вблизи массивного тела, но эта кривизна внутренняя: она соответствует искажению пространства внутри себя, а не его изгибу в какое-то дополнительное измерение.

Когда мы переходим от двумерных поверхностей к четырехмерному пространству-времени, кривизна количественно начинает выражаться более сложно, но, в принципе, ее концепция остается той же: ответ на вопрос об углах, под которыми встречаются геодезические, может отличаться от случая плоского пространства, и это отличие выражается так называемым тензором кривизны Римана. Тензор Эйнштейна $G_{\mu\nu}$ – это урезанная версия тензора кривизны Римана, сохранившая только те аспекты кривизны пространства-времени, на которые воздействует присутствие массы (или энергии, количества движения, давления, сдвигового напряжения).

По крайней мере в рамках современных представлений в

пространстве-времени не может искривляться ничего, кроме самих его четырех измерений. В общей теории относительности «правильные» вопросы о кривизне – это те, на которые можно ответить на основе геодезических в четырехмерном пространстве-времени. И нам нет нужды думать о том, чтобы «срезать» траектории движения путем выхода в какую-то внешнюю геометрию – как мы могли бы срезать путь из Вашингтона в Сан-Франциско, построив подземный туннель. Обычно, когда мы пытаемся изобразить искривленное пространство-время на рисунках, иллюстрирующих влияние тяготения, мы изображаем его как двумерную мембрану, которая прогибается в сторону массивного тела. Такое изображение предполагает существование дополнительного измерения, в которое и прогибается мембрана.

Этот способ иллюстрирования вполне приемлемый, и не в последнюю очередь потому, что он позволяет визуализировать небольшое «раскрывание» пространства в окрестности массивного тела. Но насколько нам известно, реальный мир имеет именно четыре измерения, и четырехмерное пространство-время искривляется само по себе, без привлечения какого-либо пятого измерения^[4].

Уравнения поля Эйнштейна $G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}/c^4$ представляют собой десять дифференциальных уравнений для десяти функций метрического тензора. В целом их смысл заключается в том, что масса, энергия, импульс (количество движения), давление и сдвиговые напряжения (все эти величины служат составляющими $T_{\mu\nu}$) заставляют пространство-время искривляться. В ситуациях, где все массивные тела движутся медленно, а давлением и сдвиговыми напряжениями можно пренебречь, самым важным компонентом уравнений Эйнштейна оказывается тот, который зависит только от времени: $G_{00} = 8\pi G_N T_{00}/c^4$. Мы пишем G_{00} вместо $G_{\mu\nu}$, потому что нас сейчас интересуют уравнения Эйнштейна с индексами $\mu = 0$ и $\nu = 0$, а обычно принято полагать индекс тензора равным нулю, когда он относится к временному измерению, в то время, как индексы $\mu = 1, 2$ или 3 относились бы к нашим привычным трем пространственным измерениям. Когда мы имеем дело с «обычным тяготением», уравнение $G_{00} = 8\pi G_N T_{00}/c^4$ сводится к правилу вычисления функции хода, о которой мы говорили выше. Немного упрощая, можно сказать, что уравнение Эйнштейна с индексом 00 – это все, что необходимо для описания обычного тяготения. Девять остальных уравнений вступают в игру в более экстремальных ситуациях, таких как коллапс звезд или окрестности черной дыры.

Итак, в конечном счете уравнения поля Эйнштейна и принцип оптимального собственного времени служат двумя краеугольными камнями общей теории относительности. Можно сказать, что материя через уравнения Эйнштейна управляет искривлением пространства-времени, а искривленное пространство-время, в свою очередь, управляет движением материи на основе принципа оптимального собственного времени. Аналогично этому электрические заряды через уравнения Максвелла управляют поведением электромагнитного поля, а электромагнитное поле, в свою очередь, порождает силы, действующие на электрические заряды.

Есть еще одно явление, о котором нам напоминает аналогия с электромагнетизмом, – излучение. Как и в случае уравнений Максвелла, уравнения поля Эйнштейна имеют решения, описывающие самоподдерживающийся каскад возмущений поля, который распространяется в пространстве-времени. В электромагнетизме эти возмущения представляют собой электрическое и магнитное поля. В общей теории относительности это возмущения пространства-времени, которые проще всего представить себе как растяжение масштаба по одному пространственному измерению и сжатие по другому. Движущееся вещество порождает гравитационные волны точно так же, как свет порождается движущимися электрическими зарядами, и так же, как свет, они движутся в пространстве-времени со скоростью света. По сути, они представляют собой «рябь» пространства-времени, подобную ряби на воде.

Как и свет, гравитационные волны переносят энергию. Они косвенно обнаружены в тесных звездных системах – двойных пульсарах; за это открытие Рассел Халс и Джозеф Тейлор получили Нобелевскую премию по физике в 1993 году. Эффект, наблюдавшийся Халсом и Тейлором, состоит в медленном уменьшении периода обращения звезд в двойной системе: звезды как бы сходятся по спирали к общему центру. Причиной этого спирального движения служат потери энергии на гравитационное излучение, а наблюдаемая скорость сближения полностью соответствует предсказаниям общей теории относительности. Прямые наблюдения гравитационных волн на установке LIGO в сентябре 2015 года тоже связаны с подобными спиральными движениями и могут оказаться одним из величайших достижений физики XXI столетия.

Мы более подробно остановимся на гравитационном излучении в главе 6. А пока отметим лишь одно ключевое различие между электромагнетизмом и общей теорией относительности: световые волны не взаимодействуют друг с другом, а гравитационные – взаимодействуют.

Две световые волны проходят друг сквозь друга и без взаимного

влияния идут дальше. А две гравитационные волны могут столкнуться, рассеяться друг на друге и после этого отправиться дальше уже в других направлениях. Это рассеяние слишком слабое, чтобы его энергия могла быть зарегистрирована: вряд ли кто-либо из живущих сейчас на Земле может надеяться за время своей жизни услышать об успешном измерении этого явления. Тем не менее оно с несомненностью предсказывается общей теорией относительности. В сущности, это и есть одна из причин, по которой объединение теории относительности с квантовой механикой оказывается такой трудной задачей. При очень высоких энергиях рассеяние волн тяготения друг на друге становится сильным, а в присутствии столь сильного рассеяния аппарат квантовой теории перестает работать. Эту проблему удалось очень красиво решить в рамках теории струн, но это обсуждение увело бы нас слишком далеко от основной цели рассказа. Вооруженные общей теорией относительности, мы приступаем к разговору о черных дырах!

Глава 3

Шварцшильдовская черная дыра

Теперь, когда мы овладели основными положениями специальной и общей теории относительности, мы готовы начать разговор о черных дырах. Начнем его с черной дыры Шварцшильда. Если говорить совсем кратко, то шварцшильдовская черная дыра – это описание ответа пространства-времени на присутствие точечной массы. Используя выражение «ответ», мы тем самым возвращаемся к идее о том, что вещество управляет искривлением пространства-времени и что оно делает это посредством уравнений поля Эйнштейна $G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}/c^4$. Искривленное пространство-время математически описывается десятью функциями метрического тензора. Уравнения Эйнштейна говорят о том, что ни один прежний набор этих десяти функций нас не устроит; требуются функции, меняющиеся в пространстве и времени единственно возможным образом, а именно образующие решение уравнений поля. Немецкий астроном и физик Карл Шварцшильд нашел такое решение. Он опубликовал свою знаменитую работу в 1916 году, хотя из его письма Эйнштейну, написанного в декабре 1915 года, ясно, что в это время, то есть очень скоро после того, как Эйнштейн полностью сформулировал свои уравнения поля, решение уже было им найдено.

Понять решение Шварцшильда оказалось очень трудно. Даже Эйнштейну, по-видимому, остались непонятны некоторые из его основных моментов, в частности гладкость горизонта. Что же представляет собой эта черная жемчужина теории тяготения, которая упала Шварцшильду прямо в руки, но которую даже Эйнштейн не смог полностью оценить?

Прошло около 50 лет после того, как Шварцшильд нашел свое решение, прежде чем физическое значение его открытия начало проясняться. Мы уже отметили некоторые стороны новой физической картины: в частности, идею горизонта событий, из-под которого не может выйти ни один сигнал, и свойства недр черной дыры, внутри которой время направлено радиально к ее центру. Для нужд астрофизики очень важно понимать, как вычислить орбиты массивных объектов, захваченных гравитационным притяжением шварцшильдовской черной дыры, и поэтому мы посвятим значительную часть этой главы описанию таких орбит и тому, как они выглядят с точки зрения удаленного наблюдателя. Мы также

приложим все силы, чтобы объяснить (при отсутствии каких-либо экспериментальных подтверждений!), что, как нам кажется, должно произойти с объектом, который падает в шварц-шильдовскую черную дыру. Наконец, мы обсудим два неожиданных следствия существования шварцшильдовских черных дыр – белые дыры и кротовые норы, которые, вероятно, не имеют отношения к черным дырам, образованным в результате гравитационного коллапса старых звезд, но, тем не менее, являются частью современного понимания решения Шварцшильда. Но прежде чем мы всем этим займемся, попробуем сначала прямо ответить на вопрос: что представляет собой метрика Шварцшильда?

Вдали от горизонта она очень близка метрике Минковского, которую мы описали в главе 1. Другими словами, вдали от масс вещества пространство-время почти плоское и наблюдатели, находящиеся в нем, могут адекватно описать свои движения, а также эффекты относительного движения, такие как замедление времени и сокращение длины, с помощью одной лишь специальной теории относительности. С приближением к горизонту начинает действовать гравитационное замедление времени, о котором мы говорили в главе 2. Как отмечалось в предисловии, на горизонте событий характер хода времени полностью меняется, но, так как это очень сложная история, мы пока ограничимся областью пространства-времени вне горизонта. Здесь замедление времени полностью описывается функцией хода, которая является одним из компонентов метрики Шварцшильда. Остальная часть метрики Шварцшильда описывает трехмерное искривленное пространство вокруг черной дыры, которое находится под действием ее тяготения. Мы можем представить эти три пространственных измерения как радиус плюс два угловых измерения. Тогда двигаться в радиальном направлении означает двигаться либо прямо вверх, от черной дыры, либо вниз, в направлении ее центра. Движение по одному из угловых измерений означает, что мы обращаемся вокруг черной дыры на одном и том же радиальном расстоянии от нее.

Может показаться немного непонятным, что в решении Шварцшильда означает слово «радиус», так как вы не можете аккуратно измерять расстояния от центра черной дыры: под горизонтом событий находится сингулярность, которая разрушает все, что с ней соприкасается. Правильнее будет представлять себе радиус, измеряя длину окружности, в центре которой расположена сингулярность. Эта окружность может целиком лежать вне горизонта событий, на самом горизонте или даже внутри него. Если она лежит вне горизонта, то можно представить себе мысленный эксперимент, который позволил бы нам измерить длину

окружности. Для этого потребовалось бы очень много наблюдателей: назовем их Алиса, Боб, Билл, Брюс, Барни и так далее, заканчивая Бушем. У каждого из них есть ракета, на которой можно добраться до любой точки на окружности. Дадим каждому наблюдателю по лазеру, а Алисе еще и секундомер. В соответствии с нашей инструкцией, Алиса должна послать лазерный импульс одному из своих соседей (скажем, Бобу) и в тот же момент запустить секундомер. Как только Боб получит от Алисы лазерный импульс, он тут же посылает из своего лазера импульс Биллу, Билл – Брюсу, и так далее по кругу. В конце концов Буш посылает сигнал Алисе, и, получив его, она останавливает секундомер. Умножив общее время, записанное секундомером Алисы, на скорость света, мы получим длину, которую можно с полным основанием назвать длиной окружности, а ее радиус легко вычислить, разделив длину окружности на 2π .

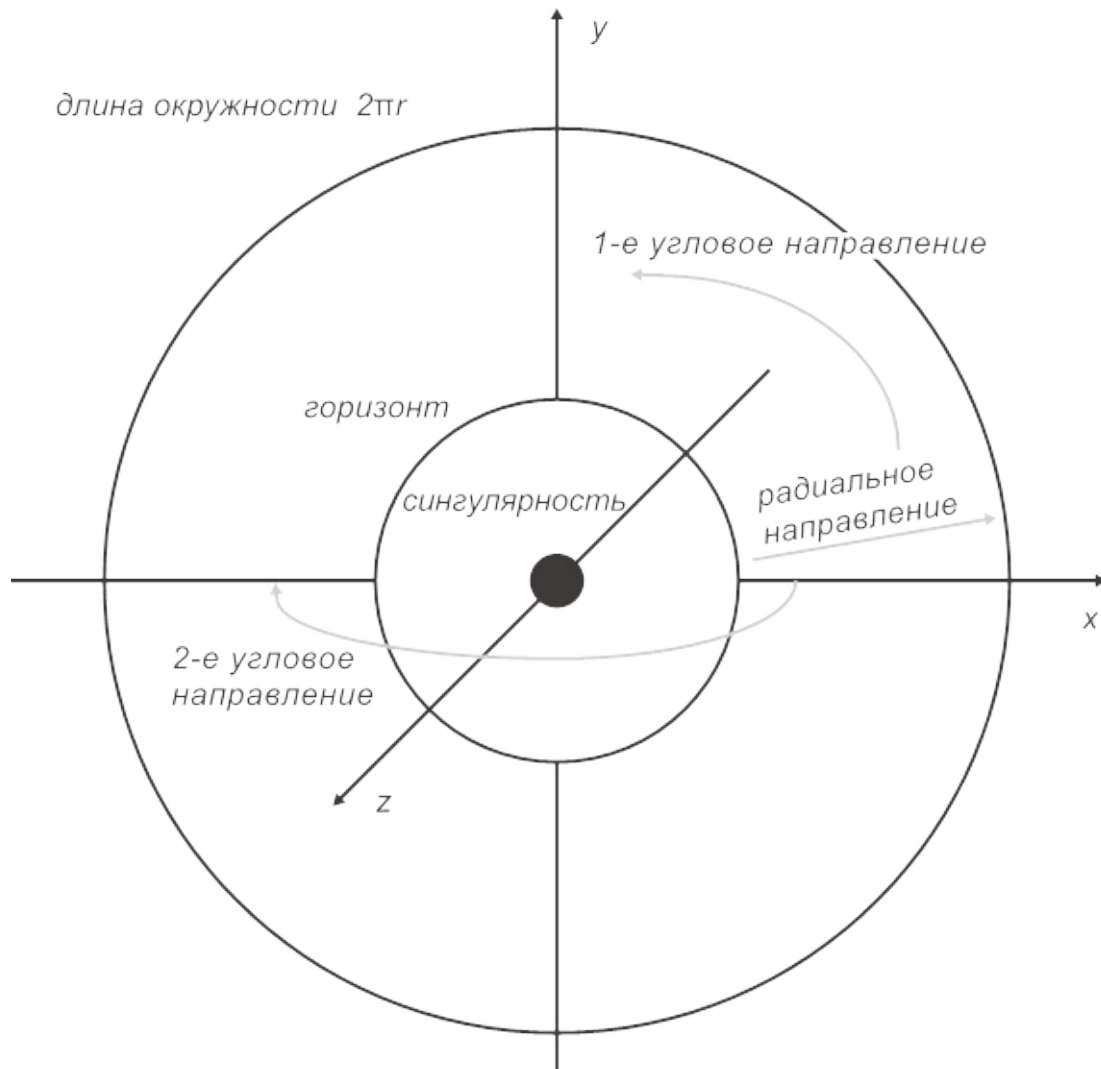


Рис. 3.1. Радиальное и угловые измерения в решении Шварцшильда.

Вне горизонта эти три направления представляют три измерения пространства. Радиус определяется так, чтобы длина окружности с центром в центре черной дыры была равна 2π .

Определив радиус именно таким образом, мы можем теперь вернуться к явлению, которое было описано в главе 2: к тому, что пространство немного «раскрывается» в тех областях, где время замедляется. Допустим, у нас есть черная дыра, содержащая ровно одну солнечную массу, так что ее горизонт имеет радиус 3 километра. Теперь рассмотрим две окружности с центром в точке сингулярности: одну радиусом 10 километров, а другую радиусом 10 километров плюс 1 метр. Как должно быть ясно из предыдущего абзаца, когда мы говорим, что радиус первой окружности равен 10 километрам, мы имеем в виду, что ее длина равна 2π , умноженным на 10 километров; те же рассуждения можно повторить и для второй, чуть большей окружности. В плоском пространстве эти две окружности отстояли бы друг от друга ровно на 1 метр, то есть если бы вам надо было перейти с первой окружности на вторую в радиальном направлении, вам просто пришлось бы пройти 1 метр по направлению от центра. В решении Шварцшильда вам придется отойти от первого круга чуть дальше, чем на 1 метр, – примерно на 1,2 метра. Это просто голый факт. В решении Шварцшильда гравитационное красное смещение замедляет время ровно во столько же раз, во сколько растягивается радиус. Другими словами, функция хода, описывающая скорость течения времени, идеально коррелирует с другой метрической функцией, определяющей дополнительное расстояние, которое вам придется пройти в радиальном направлении от центра по сравнению с расстоянием, соответствующим плоскому пространству.

В нескольких предыдущих абзацах мы уже рассказали почти обо всех аспектах исходного решения, полученного Шварцшильдом. Осталось поговорить только об одном: о точном выражении для функции хода. Вдали от горизонта она равна единице – это означает, что время идет с той же стандартной скоростью, что и в плоском пространстве-времени. На горизонте функция хода равна нулю: обычное время здесь останавливается. Фактически это один из способов понять, что собой представляет горизонт. Между этими двумя положениями функция хода плавно меняется от нуля до единицы. Как именно это происходит? Функция хода равна квадратному корню из единицы минус некоторая постоянная, деленная на радиус. Эта формула немного трудна для произнесения, поэтому запишем ее:, где N –

функция хода, r — радиус, а r_s — радиус горизонта, называемый радиусом Шварцшильда. С точностью до некоторых множителей шварцшильдowskiй радиус равен массе черной дыры. Все эти подробности Шварцшильд сумел извлечь из решения уравнений Эйнштейна. Неудобство решения Шварцшильда заключается в том, что функция хода на горизонте обращается в ноль, а радиальное растяжение, соответственно, становится бесконечным. В течение долгого времени считалось, что это, казалось бы, сингулярное поведение указывает на какую-то неправильность в метрике Шварцшильда. На самом деле неправильность заключается в координатах, которые мы выбрали для описания времени и радиуса: эти координаты лучше всего приспособлены для описания наблюдателей, парящих в фиксированных точках вне горизонта. Функция хода, которую мы обсуждали, тоже описывает гравитационное красное смещение именно для таких наблюдателей. То, что функция хода обращается в ноль на горизонте, просто означает, что парить, находясь на горизонте черной дыры, невозможно! Неудивительно, что метрика выглядит сингулярной с невозможной точки зрения! Вот если бы кто-нибудь описывал метрику Шварцшильда с точки зрения наблюдателя, свободно падающего в черную дыру, в положении горизонта не было бы ничего сингулярного или просто необычного. Различие между парящим и свободно падающим наблюдателями можно отразить преобразованием координат, несколько напоминающим преобразования Лоренца, но более сложным. После такой замены координат, в которых смешаны время и радиус, решение Шварцшильда на горизонте становится идеально гладким. Остается только сингулярность в центре черной дыры.

В природе решение Шварцшильда встречается нам буквально на каждом шагу. Гравитационное поле Земли можно очень хорошо приблизить простой шварцшильдowskiй метрикой искривленного пространства-времени. По сути дела, метрика пространства-времени в окрестности любого идеального сферического распределения масс должна точно совпадать с метрикой Шварцшильда. Отклонения от шварцшильдowskiй метрики на Земле (точнее, непосредственно над ее поверхностью) возникают потому, что Земля не идеально круглая, она вращается, и мы немного ощущаем гравитационное притяжение других массивных тел (в особенности Луны).

Но если мы живем в метрике Шварцшильда, не означает ли это, что горизонт черной дыры притаился где-то под нами, вблизи центра Земли? К счастью, нет! Решение Шварцшильда описывает только геометрию

пространства-времени вне земной поверхности. Внутри Земли действует другое решение уравнений поля Эйнштейна, и оно не имеет никаких сингулярностей (фактически до самого центра Земли геометрия пространства-времени остается почти плоской). Так как все планеты и звезды, известные во времена, когда Шварцшильд сделал свое открытие, далеко превосходят по размерам свои шварцшильдовские радиусы, было очень заманчиво постулировать, что свойства реальной материи никогда не позволят звездам сконцентрироваться в такой маленький объем, что их радиус окажется хоть сколько-нибудь близок к шварцшильдовскому. И хотя за последующие годы было собрано много доказательств неверности этого постулата, только в 1960-х идея черных дыр по-настоящему вошла в обиход теоретической физики.

Парадоксальное свойство решения Шварцшильда состоит в том, что оно призвано описать отклик пространства-времени на присутствие в нем точечной массы, но сама эта масса не является частью уравнений, которые решаются при помощи метрики Шварцшильда. Точнее, метрика Шварцшильда является решением уравнения поля Эйнштейна в вакууме, $G_{\mu\nu} = 0$, согласно которому материи нигде нет, или, по крайней мере, ее нет вне горизонта. Внутри горизонта формулы Шварцшильда все еще работают, и по-прежнему верно, что они являются решением уравнений поля Эйнштейна в вакууме вплоть до нулевого значения радиуса. Но на нулевом радиусе метрика Шварцшильда пренеприятнейшим образом обращается в бесконечность. Причем это происходит с точки зрения любого наблюдателя. Проблема оказывается гораздо серьезнее кажущейся сингулярности на горизонте, о которой мы только что говорили. Можно было бы представить себе эту центральную сингулярность как место, в котором сосредоточена вся масса черной дыры. Но только стоит помнить, что «место» здесь будет совершенно неподходящим словом; уж лучше тогда было бы сказать «время», потому что внутри горизонта, о чем мы еще поговорим ниже более подробно, радиус есть время. Скорее всего, общая теория относительности и даже сама геометрия не способны обеспечить адекватное описание тяготения в непосредственной близости к этой центральной сингулярности. Здесь нужна какая-то другая теория, например квантовая теория тяготения или теория струн.

Подведем промежуточный итог нашего описания черных дыр. Решение Шварцшильда для уравнений поля Эйнштейна отвечает на вопрос о том, как точечная масса искривляет пространство-время: ответ – пространство-время образует черную дыру. Вдали от черной дыры

пространство-время искривлено незначительно, и мы можем описать происходящее в терминах функции хода в рамках ньютоновской физики тяготения с поправкой на то, что течение времени слегка ускоряется по мере удаления от черной дыры. Но на радиусе Шварцшильда этот подход оказывается полностью неприменим: с точки зрения удаленного наблюдателя время, измеряемое наблюдателем, находящимся на горизонте событий, стоит на месте. Сначала физикам казалось, что это дефект решения Шварцшильда, а может быть, и теории Эйнштейна в целом. Но в конце концов стало понятно, что эта ситуация просто-напросто означает невозможность для наблюдателя находиться на самом горизонте. Двигаясь по радиусу вглубь, мы в конце концов приходим к сингулярности кривизны; значение этой сингулярности мы до сих пор не вполне понимаем. Наш план на оставшуюся часть этой главы таков: продолжить исследование физических свойств шварцшильдовских черных дыр, рассмотрев вопрос о том, что произойдет с наблюдателями и объектами, движущимися вокруг черных дыр или падающими в них. Мы даже поговорим о всеразрушающей области вблизи сингулярности.

Но начнем с небольшого исторического экскурса во времена, предшествовавшие открытию Шварцшильда. Эйнштейн знал об одной из самых интригующих загадок астрономии: прецессии (то есть смещении) перигелия Меркурия. Орбита Меркурия слегка эллиптична: это разрешено законами Кеплера и согласуется с ньютоновской теорией тяготения. *Перигелием* орбиты называется точка наибольшего ее приближения к Солнцу. Оказалось, что большая ось эллипса орбиты Меркурия, а вместе с ней и перигелий, медленно обращается (*прецессирует*) вокруг Солнца в том же направлении, в каком движется по своей орбите Меркурий. Эта прецессия долго и подробно изучалась, и во времена Эйнштейна уже было ясно, что она в основном может быть объяснена влиянием других планет. Загадка была в том, что даже после учета всех возможных гравитационных воздействий в рамках ньютоновского тяготения все равно оставалось расхождение между расчетами и наблюдениями, хотя и очень маленькое.

Чтобы продемонстрировать, насколько оно было мало (а заодно и насколько точными стали астрономические наблюдения в XIX веке), обратимся к числам. Орбита Меркурия прецессирует всего чуть больше чем на 574" (угловые секунды) в столетие, а ньютоновская механика дает примерно 531". Расхождение, таким образом, составляет 43" за 100 лет. За один оборот Меркурия по орбите это соответствует смещению большой оси эллипса орбиты примерно на $1/35\,000^\circ$. И еще до того, как Шварцшильд нашел свое точное решение уравнений поля Эйнштейна, сам

Эйнштейн сумел получить достаточно хорошее приближение этого решения, которое позволило точно рассчитать движения планет в гравитационном поле Солнца. Для орбиты Меркурия эти расчеты в точности совпали со знаменитой аномальной процессией! Эврика!

На пути к окончательному виду уравнений поля, который он вывел в 1915 году, у Эйнштейна было много озарений, были и ошибки. Но это стало настоящим моментом истины. Эйнштейн понял, что он действительно создал верную релятивистскую теорию тяготения.

Теперь, когда у нас есть точное выражение для шварцшильдовской метрики, мы можем рассчитать всевозможные орбиты движения массивных тел вокруг черных дыр, орбиты, которые дают значительно более сильные отличия от ньютоновских эллипсов, чем исчезающе малая прецессия, наблюдаемая у орбиты Меркурия. И все же именно в ранних вычислениях Эйнштейна содержится зерно основной идеи, которая позволяет описать многие из этих орбит. Оставим позади Солнечную систему и направимся к центру Млечного Пути, где притаилась циклопическая черная дыра, монстр, в котором аккумулировано около 4 миллионов солнечных масс. Это не совсем шварцшильдовская черная дыра: это вращающаяся черная дыра Керра, значительно более сложный объект, который мы опишем в главе 4. Но для целей нынешнего рассказа допустим некоторую вольность и будем считать монстра в центре Млечного Пути черной дырой Шварцшильда, а заодно проигнорируем все вещество, которое может оказаться в ее окрестностях. Ее радиус Шварцшильда примерно равен 12 миллионов километров. Наши храбрые наблюдатели, Алиса и Боб, решили запарковать свой звездолет на круговой орбите радиусом 150 миллионов километров от черной дыры – это, как известно, радиус орбиты Земли, по которой она обращается вокруг Солнца. Но так как притяжение черной дыры намного сильнее притяжения Солнца (примерно в 4 миллионов раз!), то по своей круговой орбите Алиса и Боб будут двигаться гораздо быстрее, чем Земля, которая на свой оборот вокруг Солнца тратит год. Полный оборот по орбите у Алисы и Боба займет примерно 4 часа. На этой орбите гравитационное замедление времени заставит их часы идти на 4 % медленнее, чем они идут у очень далекого наблюдателя.

У Алисы на борту есть маленький космический челнок. Она собирается отчалить в нем от своего звездолета, уменьшить немного скорость своего кругового движения, тормозя двигателем челнока, а потом выключить двигатель и перейти в свободный полет. Боб обещает ей оставаться в своем звездолете и понаблюдать за ней. Чтобы помочь Бобу в

его наблюдениях, Алиса прикрепляет к своему челноку ярко-желтую мигалку, которая вспыхивает раз в секунду.

По замыслу их эксперимента, как только тормозной двигатель челнока Алисы будет выключен, она начнет двигаться по геодезической в рамках геометрии шварцшильдовской черной дыры. Раз ее начальная скорость будет меньше, чем скорость ее звездолета на круговой орбите, челнок перейдет на новую орбиту, которая, конечно, будет несколько ближе к черной дыре. Если Алиса будет держать тормозной двигатель челнока включенным до полной остановки своего обращения, то она спикирует на черную дыру в радиальном направлении и будет проглочена горизонтом событий. Алиса, конечно, девушка безбашенная, но все же такой сценарий ей не нравится: она собирается сохранить определенную угловую скорость, которая позволила бы ей в этом падении лихо промчаться мимо черной дыры, обогнуть ее и снова попасть на первоначальную орбиту. Оказавшись там, она может вернуться на свой корабль или снова и снова повторять тот же головокружительный трюк с торможением.

Но вот что она должна иметь в виду: орбита ее челнока будет очень сильно прецессировать, и чем глубже в направлении черной дыры она нырнет, тем сильнее будет прецессия. Даже при небольшой эллиптичности прецессия ее орбиты будет гораздо больше, чем у орбиты Меркурия при его обращении вокруг Солнца, так как в абсолютных единицах тяготение черной дыры, у которой находятся Алиса и Боб, гораздо сильнее, чем где бы то ни было в Солнечной системе. Но, несмотря на это отличие, эффекты прецессии, которые могут наблюдать Алиса и Боб, описываются вычислениями, очень похожими на те, что проделал Эйнштейн для объяснения особенностей орбиты Меркурия.

Поэкспериментировав с разными орбитами, Алиса наконец обнаруживает, что может заставить свою орбиту прецессировать настолько, насколько захочет. Вот как она это делает: отчалив от своего звездолета, будет осторожно регулировать начальную скорость так, чтобы нырнуть вниз до минимального радиуса, чуть большего, чем удвоенный радиус Шварцшильда, а потом заглушит двигатель. Тогда, если только Алиса верно подберет начальную скорость, она спикирует вниз, много-много раз обернется вокруг черной дыры, а потом пробкой вылетит обратно на радиус, с которого начала падение. Для движения такого типа существует специальный термин: эллипсо-вихревая орбита^[5]. Алиса чувствует себя на таких орбитах как на крутейших американских горках: все начинается со свободного падения, а в вихревой фазе движешься довольно быстро – со скоростью около двух третьих световой. Беда в том, что эта игра для Алисы

весьма опасна. Если ее начальная скорость окажется чуть-чуть меньше, так что орбита занесет ее под двойной радиус Шварцшильда, она начнет падать в черную дыру и спасти ее сможет только аварийный запуск двигателей челнока, которые вынесут челнок наружу. Но при этом двигатели должны быть запущены прежде, чем Алиса достигнет горизонта, – иначе все пропало.

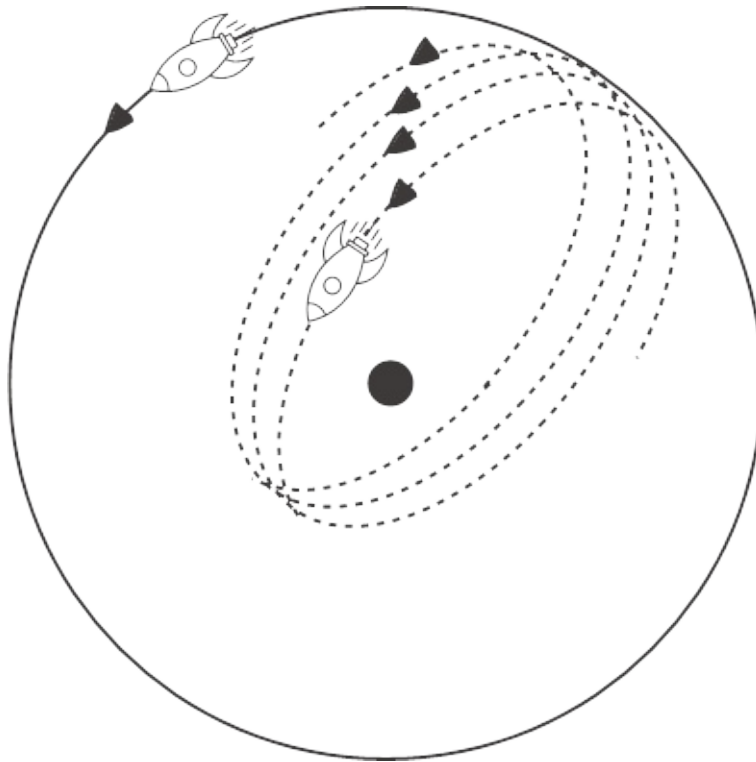


Рис. 3.2. Круговая орбита (сплошная кривая) и отрезок релятивистски прецессирующей эллиптической орбиты (пунктир). Нерелятивистская ньютоновская орбита (на рисунке не показана) выглядела бы как эллипс, находящийся на одном и том же месте; релятивистская прецессия заставляет этот эллипс постоянно перемещаться, как показано на рисунке.

После нескольких головокружительных полетов по эллипсо-вихревой орбите с большой высоты Алиса решает попробовать заманить Боба на орбиту пониже и поближе к себе, чтобы и он попробовал этот аттракцион. Но Боб – парень консервативный, он предпочитает не включать двигатели своего звездолета и оставаться только на круговых орбитах. Тут Алиса замечает странную вещь: чем ниже спускается Боб, тем дальше от черной дыры ей приходится оставаться на конце своей «пращи», не переходя в падение (что требует и включения аварийных двигателей).

В конце концов, когда Боб достигает радиуса, равного тройному

радиусу Шварцшильда, Алисиа игра с черной дырой – закружиться вокруг нее и выпрыгнуть обратно – совсем перестает получаться. Даже если ее начальная скорость оказывается лишь чуть-чуть меньше, чем у Боба, Алису затягивает в гравитационный колодец и ей приходится тут же вырываться из него с помощью аварийных двигателей, чтобы не быть проглоченной горизонтом. Боб теперь находится на так называемой *предельной устойчивой круговой орбите* вокруг черной дыры. Существуют круговые орбиты и с меньшими радиусами, но все они неустойчивы, а это означает, что малейшее возмущение может заставить находящегося на этой орбите нырнуть в черную дыру. Боб, естественно, на них переходить отказывается. А ведь это как раз те самые орбиты, по которым Алиса стремительно проносилась мимо черной дыры в свободном падении во время своих вихревых полетов.

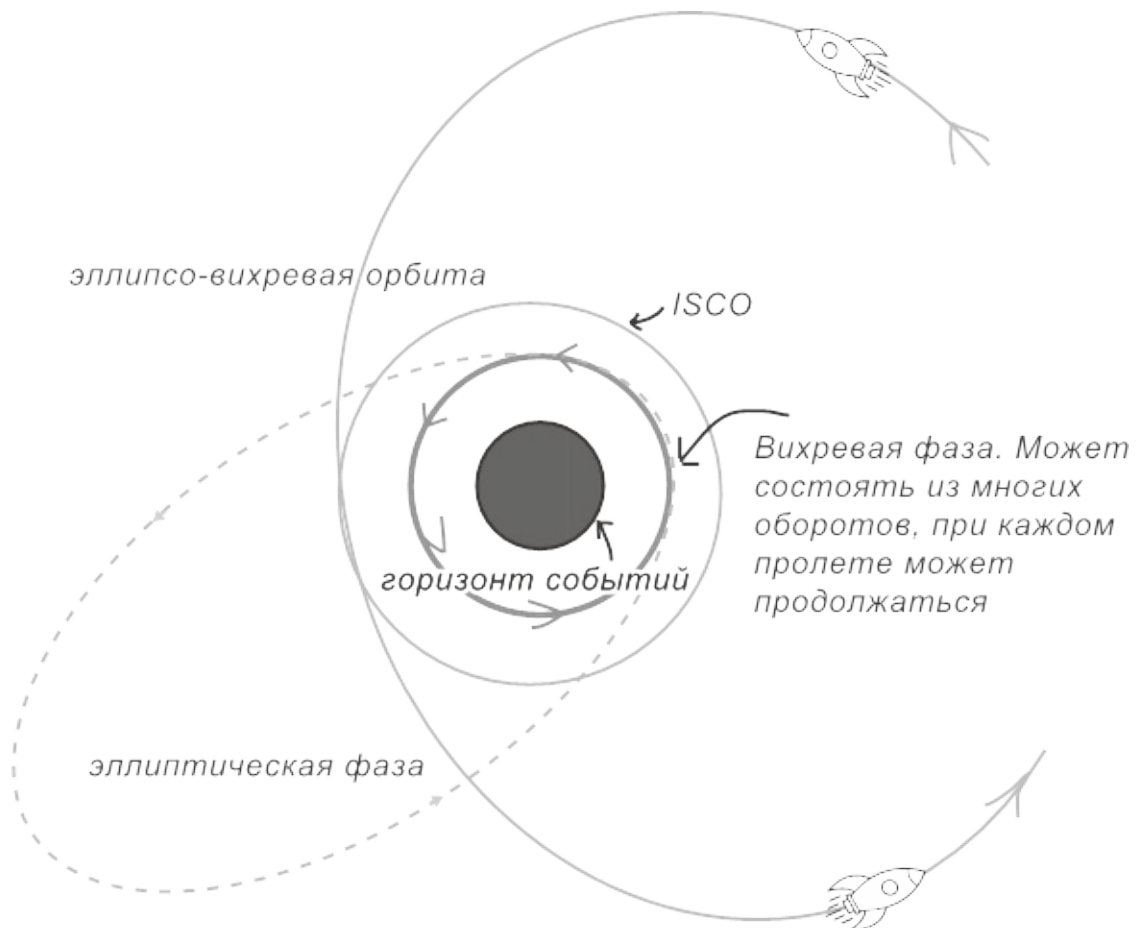


Рис. 3.3. Эллипсо-вихревая орбита.

Аббревиатурой ISCO (innermost stable circular orbit) обозначена предельная устойчивая круговая орбита.

Теперь давайте посмотрим, какие сигналы видит Боб, наблюдая за орбитальными акробатическими трюками Алисы. Не забудем, что у нее есть специальная желтая мигалка! Но сначала остановимся на минутку и поговорим об эффекте *доплеровского сдвига*, который наблюдается даже в отсутствие тяготения. По сути, для его объяснения не нужна и специальная теория относительности. Например, когда вы слышите сирену приближающейся машины скорой помощи, то в момент, когда она проезжает мимо вас, вы замечаете, что тон звука изменился. Для простоты представьте, что у сирены вполне определенный тон, например ля первой октавы, то есть 440 герц, 440 звуковых колебаний в секунду, и что автомобиль мчится со скоростью в одну десятую скорости звука (это довольно быстро, но возможно: примерно 120 километров в час). Когда «скорая» едет по направлению к вам, тон ее сирены примерно на 10 % выше, чем 440 герц, а когда она проехала мимо и удаляется, примерно на столько же ниже. Вот это изменение тона и есть эффект Доплера. Объясняется он тем, что когда «скорая» приближается, каждое последовательное звуковое колебание рождается чуть ближе к вам, чем предыдущее. Поэтому для вас частота колебаний становится немного больше, когда их источник приближается, чем когда он неподвижен. Похожий эффект происходит и со светом в специальной теории относительности. Если при отсутствии гравитационного поля Алиса летит прямо к Бобу, электромагнитные колебания, из которых состоит желтый свет ее мигалки, покажутся ему имеющими чуть большую частоту – или более короткую длину волны. А это значит, что желтый свет будет видаться ему скорее голубым. Соответственно, когда Алиса летит от Боба, желтые лучи ее мигалки для него будут выглядеть красноватыми. По той же причине вспышки, которые посылает ему мигалка Алисы каждую секунду (по ее часам), Боб будет принимать чаще, чем раз в секунду, когда Алиса летит к нему, и реже – когда от него. Тут может прийти мысль, что в специальной теории относительности эффект Доплера должен как-то объединяться с замедлением времени – что и происходит в действительности, и мы как раз это подробно описали.

Когда Алиса носится туда-сюда по своей вихревой орбите, гравитационное замедление времени приводит к такому покраснению света, приходящего к Бобу от ее челнока, которое выходит за рамки доплеровского. Наоборот, если бы Боб захотел послать световой сигнал Алисе, гравитация заставила бы этот свет поглубеть.

Эти гравитационные эффекты полностью объясняются переменной скоростью течения времени на разных глубинах гравитационного колодца;

они имеют прямое отношение к физическим закономерностям, проявившимся в описанном в главе 2 эксперименте Паунда–Ребки. Дополнительную сложность вносит то, что фотоны светового сигнала Алисы могут добираться к Бобу по довольно сложным траекториям. Самый простой сценарий в этом случае осуществляется, когда в момент вспышки мигалки Алиса находится непосредственно под Бобом, ровно посередине своего стремительного оборота вокруг черной дыры. Тогда Боба достигнут несколько покрасневшие из-за влияния гравитации фотоны, двигавшиеся по более или менее прямолинейным траекториям вверх^[6]. Однако если в момент вспышки мигалки Алиса окажется с противоположной от Боба стороны черной дыры, фотоны хоть и все равно смогут добраться до него, но по дороге им сначала придется увернуться от черной дыры, обогнув ее! Как ни удивительно, это вполне реально, и Эйнштейн даже предвидел такую возможность. Регистрация отклонения звездного света под влиянием притяжения Солнца во время полного солнечного затмения 1919 года стала еще одним из первых экспериментальных подтверждений теории относительности, принесшим Эйнштейну мировую славу. Это отклонение не что иное, как более слабый вариант того механизма, который позволяет фотонам мигалки Алисы пробраться к Бобу с обратной стороны черной дыры вокруг ее горизонта. Но фотоны способны не только на это! Как и сама Алиса, фотоны, вылетевшие из ее мигалки, находят особую орбиту, по которой они совершают полный оборот вокруг горизонта, и даже не один, а несколько, прежде чем находят свой путь наверх, к Бобу. В принципе, фотоны могут бесконечно кружиться вокруг черной дыры на расстоянии в полтора шварцшильдовских радиуса^[7]. Эта круговая орбита, называемая *световым кольцом*, неустойчива, тем не менее именно из-за этого свойства черной дыры ее «тень», которую сейчас ищут, используя радиотелескопы (об этом будет коротко рассказано в конце главы 5), должна быть окружена ярким кольцеобразным ободком.

Итак, Боб увидит каждый сигнал мигалки Алисы, испытавший суммарное воздействие красного гравитационного и красного или голубого доплеровского смещений. Больше того, он увидит и слабое эхо каждого сигнала, соответствующего однократному или даже многократному обращению светового импульса вокруг черной дыры перед тем, как уйти от нее наружу. Максимальное красное смещение будет достаточным для того, чтобы фотоны перешли из видимого диапазона спектра далеко в инфракрасную область, а максимальное голубое смещение сдвинет частоту фотонов далеко в голубую часть видимого спектра. Короче, Боб увидит все

цвета радуги!

Но хватит уже летать вокруг горизонта черной дыры. Пора его пересечь. Алиса и Боб подначивают друг друга это сделать, но каждый мудро уступает дорогу другому, и наконец они оба решают запустить туда автоматический зонд. Для простоты они отступают на 150 миллионов километров назад от радиуса своей исходной круговой орбиты и, зависнув там, запускают зонд. Зонд стартует из состояния покоя и радиально ныряет прямо вниз, в черную дыру, без всяких «качелей». К зонду прикреплена Алисина мигалка, чтобы можно было за ним следить. Из-за наложения воздействий гравитации и эффекта Доплера импульсы от мигалки приходят реже, чем раз в секунду, а цвет их красный. На свободно падающем зонде идет отсчет времени: 2638 секунд до достижения ISCO от начального положения на расстоянии в 150 миллионов километров, а затем дополнительные 122 секунд до достижения горизонта событий. По прошествии этого времени – по крайней мере, если верить классической общей теории относительности – зонд тихо и без всякого шума пересечет горизонт: по сути, ничем особенным этот момент не должен быть отмечен. Однако Алиса и Боб никогда не увидят, что это произошло. Гравитационное замедление времени при приближении к горизонту становится бесконечным. Другими словами, каждый следующий импульс от мигалки будет добираться до наблюдателей все дольше и дольше, и наконец настанет момент, когда придет последний импульс, – зонд пошлет его, когда будет находиться в непосредственной близости к горизонту. Совершенно не важно, насколько коротким наблюдатели установят интервал между импульсами, – допустим, что Боб и Алиса согласно первоначальному плану запрограммировали часы на зонде так, что в соответствии с их отсчетами мигалка посылает один импульс в секунду. Допустим также, что один из импульсов испущен ровно в тот момент, когда зонд пересекает горизонт. Этот импульс никогда не будет принят Алисой и Бобом, хотя все предыдущие будут. Последний сигнал, который они приняли, пришел к ним спустя 3741 секунду после выпуска зонда, предпоследний – спустя 3686 секунд. Выходит, что, с точки зрения Алисы и Боба, секундный промежуток между импульсами мигалки к моменту прихода предпоследнего и последнего сигналов растянулся до 55 секунд. Длины волн предпоследнего и последнего импульсов тоже сместились в красную сторону, увеличившись соответственно в 40 и 79 раз, и если они в момент их испускания мигалкой были ярко-желтыми, с длиной волны 570 нанометров, то Боб и Алиса увидели их инфракрасными, с длинами волн 23 и 45 микрон.

Гравитационное замедление времени (которое мы еще называем гравитационным красным смещением) обратно пропорционально функции хода, которая на горизонте обращается в ноль, а значит, время на нем замедляется бесконечно, – это и есть один из способов понять, почему Алиса и Боб никогда не увидят импульса, посланного им с горизонта, не говоря уж о тех, что посланы после этого. Можно сказать, что внутри горизонта замедление времени становится «больше бесконечного». Но что это утверждение вообще означает? Когда свободно падающий зонд минует горизонт, с ним не произойдет ничего необычного. Но если его двигатели включатся и он попытается двигаться с ускорением в обратном направлении, ничего не получится – независимо от мощности двигателей, он не сможет даже вновь вернуться на горизонт. Более того, он не сможет даже перестать двигаться внутрь. Это роковое свойство черных дыр мы уже отмечали в предисловии. Двигаться вперед во времени означает двигаться внутрь, к центру. Нет силы, способной вытащить объект из черной дыры, так же как нет силы, способной заставить что-либо двигаться назад во времени. Поэтому как только зонд пересек уровень горизонта, фотонам, испускаемым мигалкой зонда, не остается ничего, кроме как падать к центру дыры. И когда мы говорим, что замедление времени стало «больше бесконечного», мы понимаем под этим, что время внутри черной дыры совершенно не такое, как время снаружи: оно «идет внутрь», а будущее внутри черной дыры ограничено сингулярностью.

Центростремительный ход времени внутри горизонта – настолько важная в физике черных дыр идея, что для лучшего ее понимания мы вернемся к языку дифференциальной геометрии. Вспомним, что метрика пространства-времени играет двойную роль: она задает собственное время между времениподобными разделенными событиями и собственное расстояние между пространственноподобными разделенными событиями. И существует прекрасный способ объединить обе эти роли пространственно-временной метрики в одной формуле. Для этого мы напишем формулу не для расстояния, а для квадрата расстояния между двумя близкими событиями. Если квадрат расстояния положителен, значит, эти события разделены пространственноподобно, а если он отрицателен, то они разделены времени-подобно, и то, что мы принимали за квадрат расстояния, в действительности является отрицательным квадратом собственного времени между событиями. В решении Шварцшильда, как и в любом другом решении уравнений Эйнштейна, формула для метрики (основанная на функции хода, радиальном растяжении масштабов и т. д.) в действительности представляет собой одну из этих формул для квадрата

расстояния, который может приобретать положительные или отрицательные значения. Для двух событий, немного разнесенных в радиальном направлении, квадрат расстояния между ними положителен над горизонтом, но отрицателен под ним. Последний пункт является ключевым: отрицательный квадрат расстояния означает, что события разделены времениподобно. Другими словами, радиус становится времениподобным, а время – пространственноподобным. Как ни странно все это звучит, ничего особенно необычного с кривизной геометрии Шварцшильда здесь не происходит; просто обычные понятия времени и расстояния при пересечении горизонта отчасти меняются местами.

Но несмотря на это их смешение, внутри горизонта наше исходное определение радиуса в решении Шварцшильда сохраняет свою силу: даже внутри черной дыры радиус все равно остается равным длине окружности с центром в начале отсчета, деленной на 2π . Это можно выразить и по-другому: площадь сферы при любом данном радиусе в решении Шварцшильда в 4π раза больше квадрата радиуса – формула, которую учат в школе. Но внутри черной дыры ее истинное значение становится даже немного пугающим: ведь радиус здесь, как мы только что узнали, является также и временем, и поэтому сфера, о которой мы говорим, представляет собой полную протяженность пространства в двух угловых направлениях в фиксированный момент времени. Когда время идет вперед (что означает движение радиуса внутрь), сфера становится всё меньше, меньше и меньше, а потом – бабах! – и вот она, сингулярность!

Чтобы объяснить наше «бабах!» при приближении к сингулярности, надо рассказать о приливных силах. Как хорошо понимал Ньютон, океанские приливы, которые происходят у нас на Земле, – это проявление гравитационного притяжения нашей планеты Луной^[8]. Луна немного сильнее притягивает ту сторону земного шара, которая обращена к ней, чем противоположную. Это неравенство сил чуть-чуть вытягивает Землю в направлении Луны, что сказывается на форме всей Земли, но так как вода – субстанция текучая, то океаны реагируют на него заметнее, чем суша. В сумме приливные силы от Луны действуют так, как если бы они тянули к Луне ту сторону Земли, которая ближе к ней, при этом вытягивая противоположную сторону Земли в обратном направлении – от Луны. Это поначалу интуитивно кажется недоразумением: мы же знаем, что тяготение – это сила притяжения, а не отталкивания! Дело в том, что приливные силы – это результирующая, которая получается после учета усредненного гравитационного воздействия Луны на Землю. Это воздействие немного меняет орбитальное движение Земли, а приливные

силы несколько растягивают ее.

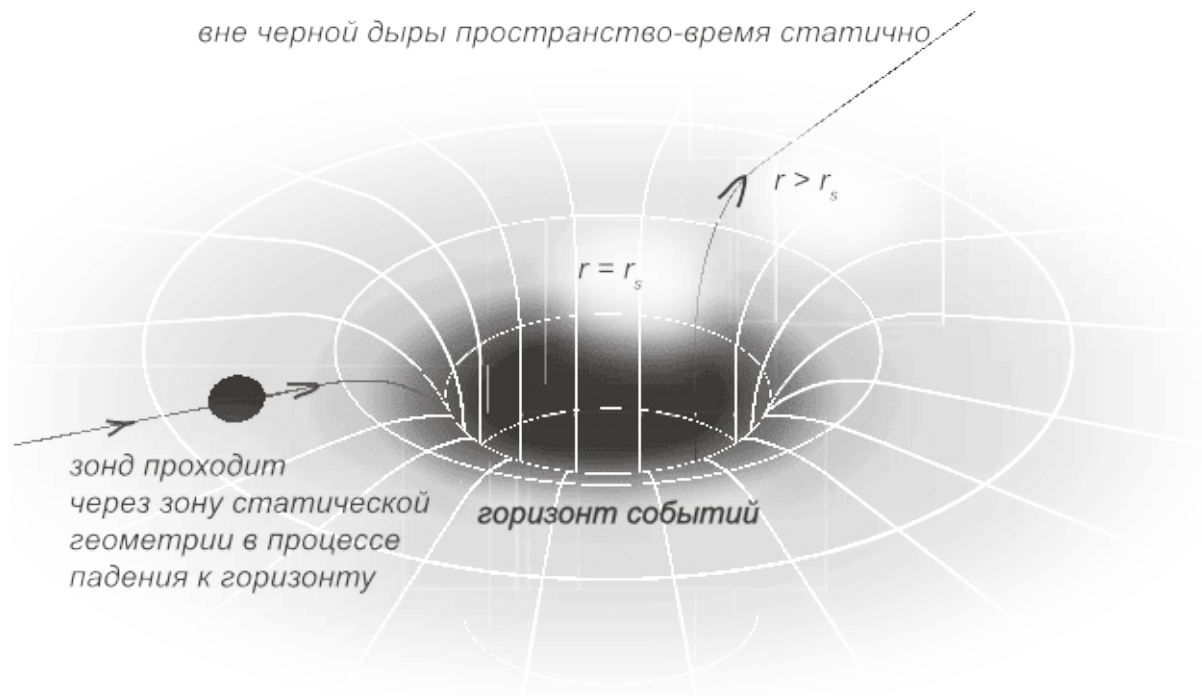


Рис. 3.4. Падение зонда внутрь черной дыры: вид снаружи горизонта событий.

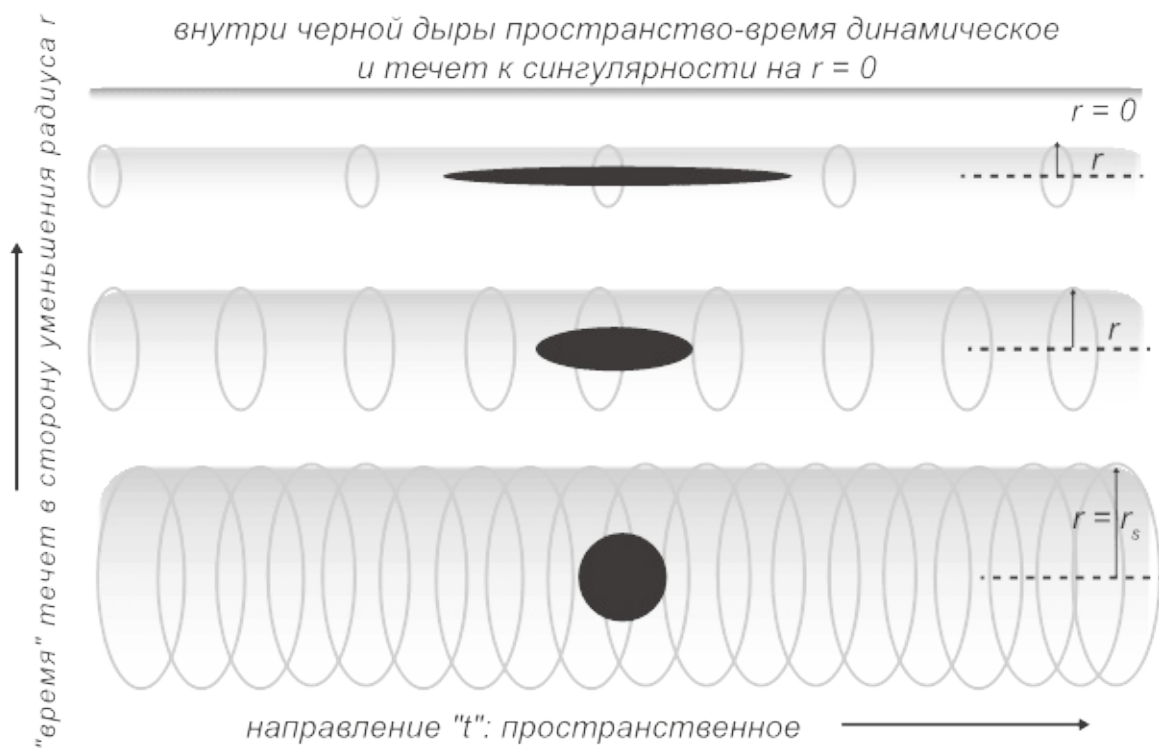


Рис. 3.5. Падение зонда внутрь черной дыры: вид снаружи горизонта

событий.

Под горизонтом зонд вовлекается в пространственно-временной коллапс.

По мере того как «время» движется от $r = r_s$ на горизонте событий к $r = 0$ в сингулярности, зонд растягивается до бесконечности в одном пространственном направлении (“ t ”) и сжимается до нуля в двух пространственных сферических направлениях.

Когда наш зонд проваливается сквозь горизонт (рис. 3.4 и 3.5), он, в принципе, уже испытывает некоторое воздействие приливных сил, но незначительное, – ведь черная дыра такая огромная, а зонд довольно маленький, – ну, скажем, всего метр в поперечнике. Но внутри черной дыры эта ситуация быстро меняется. Как мы уже говорили, если уж зонд оказался под горизонтом, никакое ускорение не способно помочь ему избежать сингулярности. По сути, оказывается, что если мы хотим максимизировать собственное время жизни зонда прежде, чем он найдет свой безвременный конец, то лучшее, что мы можем сделать, – не заставлять его ускоряться вообще. Пусть он продолжает двигаться по геодезической. Тогда он войдет в сингулярность примерно через 27 секунд после пересечения горизонта. Приливные силы, вызванные гравитационным притяжением черной дыры, будут быстро расти по мере того, как зонд приближается к сингулярности, и к тому моменту, когда до входа в нее останется примерно от 10 до 100 микросекунд (точная цифра зависит от того, насколько прочен металл, из которого сделан зонд), его корпус разлетится на части. Растущая мощь приливных сил разнесет обломки зонда на еще более мелкие кусочки, а потом и эти кусочки расплытятся на составляющие их атомы. Но и на этом дело не кончится – вскоре приливные силы вырастут настолько, что оторвут все электроны от атомных ядер, затем разорвут и сами ядра на протоны и нейтроны, а их – на кварки и глюоны. Действительно, «бабах»! Что будет дальше, неизвестно, потому что, насколько мы знаем, кварки, глюоны и электроны – точечные неделимые объекты. Но мы точно можем сказать, что два угловых направления в трехмерном пространстве сами сжимаются все сильнее и сильнее по мере приближения к сингулярности, а третье пространственное направление, соответствующее тому, что мы раньше, вне черной дыры, называли временем, испытывает еще более радикальное растяжение. В общем, всё, включая и наш зонд, сплющивается и растягивается в бесконечно тонкую линию.

Похоже, теперь мы исследовали решение Шварцшильда от начала до рокового конца. Поистине чудесным образом оно в простой и точной форме характеризует геометрию искривленного пространства-времени, в котором мы живем, и одновременно позволяет дать приближенное описание пространства-времени в окрестностях самого массивного объекта нашей Галактики, колоссальной черной дыры в ее центре. Сама по себе шварцшильдовская черная дыра абсолютно статична; она затаилась, как паук, в центре искривленной геометрической сети. Как мы теперь знаем, объекты, пролетающие слишком близко к ее горизонту, должны из-за всех сил вырываться из пут ее притяжения, а всё, что пересекает ее горизонт (по крайней мере, мы так думаем!), очень скоро «переваривается» при помощи приливных сил, превращаясь в непредставимо тонкий поток вещества, устремляющийся в сингулярность.

Но это еще не конец рассказа о решении Шварцшильда. У шварцшильдовской метрики есть и другое воплощение, в пространственно-временном смысле диаметрально противоположное черной дыре, его называют *белой дырой*. В ней поток времени, начинающийся в сингулярности, отталкивает пространство прочь от нее, вынося всё наружу через границу, также пропускающую только в одном направлении, только вовне. И если что-то было выброшено из белой дыры, оно уже никогда не сможет вернуться обратно. Причину, по которой белая дыра должна быть частью решения Шварцшильда, можно усмотреть из следующего кажущегося парадокса. Геодезические, которые проходят мимо *сингулярности*, можно назвать *замкнутыми*: являясь оптимальными пространственно-временными расстояниями, они никогда и нигде не начинаются и не кончаются. Когда частица или фотон движутся по геодезической, для них из любой точки траектории всегда существует путь во времени вперед или назад. Это свойство может нарушаться в единственном случае: если геодезическая входит в сингулярность. Чтобы понять, что произойдет в этом случае, требуется теория квантовой гравитации. Конечно, негравитационные силы могут заставить частицу двигаться по траектории, отличной от геодезической, но в качестве другого возможного пути в пространстве-времени геодезическая всегда проходит где-то поблизости. Например, если вы сидите в кресле в вашей любимой кофейне и читаете эту книгу, вы не находитесь на геодезической: вам не дает оказаться на ней давление, которое на вас оказывают кресло и земная поверхность. Но геодезическая в этом месте все равно существует – она идет сквозь поверхность Земли к ее центру, и какая-нибудь частица или объект, не подверженные этой силе давления, такие как нейтрино, могли бы

по ней двигаться.

Всё это приводит к кажущемуся парадоксу в пространстве-времени Шварцшильда. Фотон, который видят Алиса и Боб и который пришел к ним, двигаясь по радиусу наружу от запущенного ими в черную дыру зонда, после того, как он был испущен источником света на зонде, двигался по геодезической. Но эта геодезическая замкнута, и поэтому она простирается за пределы источника излучения, до самого радиуса Шварцшильда и еще дальше. Теперь представим себе, что мы обратили путь фотона во времени от точки, где его увидели Алиса и Боб. Наш обращенный фотон теперь движется вспять и в некоторый момент прошлого достигает зонда. Здесь, в точке, где он был испущен, он должен окончить свое существование. Но геодезическая, по которой двигался фотон, не кончается: она продолжается в сторону меньших радиусов всё дальше назад во времени, и в принципе, нет ничего, что помешало бы проследовать по этому пути и реальному фотону: этот путь продолжается до самого горизонта, а так как радиус Шварцшильда не является сингулярностью, то он пересекает его и продолжается до всё меньших радиусов. Мы знаем, что ничто не может покинуть черную дыру. Но это как будто можно сделать по найденной нами геодезической! Мы пришли к противоречию.

Разрешение этого кажущегося парадокса состоит в том, что найденная нами геодезическая происходит не из той части метрики Шварцшильда, которая относится к черной дыре, но из совершенно другой части пространства-времени: из белой дыры, где динамический поток пространства-времени в точности противоположен текущему в черной дыре. Внутри белой дыры, где (или, скорее, «когда») радиальная координата меньше радиуса Шварцшильда, двигаться вперед во времени означает двигаться к большим радиусам. Следовательно, вместо того чтобы быть навсегда захваченной этой областью, любое тело внутри нее выталкивается наружу без малейшего шанса вернуться обратно. Нулевой радиус внутри белой дыры – это сингулярность, но приливные силы здесь противоположны тем, которые были в черной дыре: тонкие линии расплющиваются и растягиваются, снова становясь сферами.

Где же находится эта белая дыра? Или, точнее, когда? Ответ заключается в том, что белая дыра находилась в прошлом – по сути дела, в сколь угодно далеком прошлом. В подобном же смысле черная дыра – это часть будущего, и как таковая будет существовать вечно (если не принимать во внимание квантовые эффекты). Если такое объяснение кажется запутанным, есть и другой путь: провести аналогию между

белыми и черными дырами и космологией Большого взрыва. В эйнштейновской теории тяготения Большой взрыв – это сингулярность, с которой «началась» наша Вселенная. (Как и в случае с сингулярностями в черных дырах, в сингулярности Большого взрыва общая теория относительности перестает работать, и что там в действительности произошло – загадка.) Хотя мы и видим повсюду вокруг нас фотоны, оставшиеся от Большого взрыва, – они образуют космический микроволновой фон, так называемое реликтовое излучение, – мы, конечно, никогда не сможем добраться до самого Большого взрыва. Это не место, а момент времени в нашем прошлом, а сейчас нам от него осталась только расширяющаяся Вселенная. Похожим образом, допуская некоторую поэтическую вольность, мы можем сказать, что решение Шварцшильда описывает пространство-время, которое родилось в виде белой дыры и от которого останется черная. Если смотреть снаружи, то любые фотоны, порожденные белой дырой, будут выглядеть, как будто они идут из той области пространства, в которой теперь находится черная дыра. И они действительно так выглядели, но когда они стремились наружу по направлению к радиусу Шварцшильда, чтобы в конце концов его пересечь, черной дыры там еще не было, была только белая.

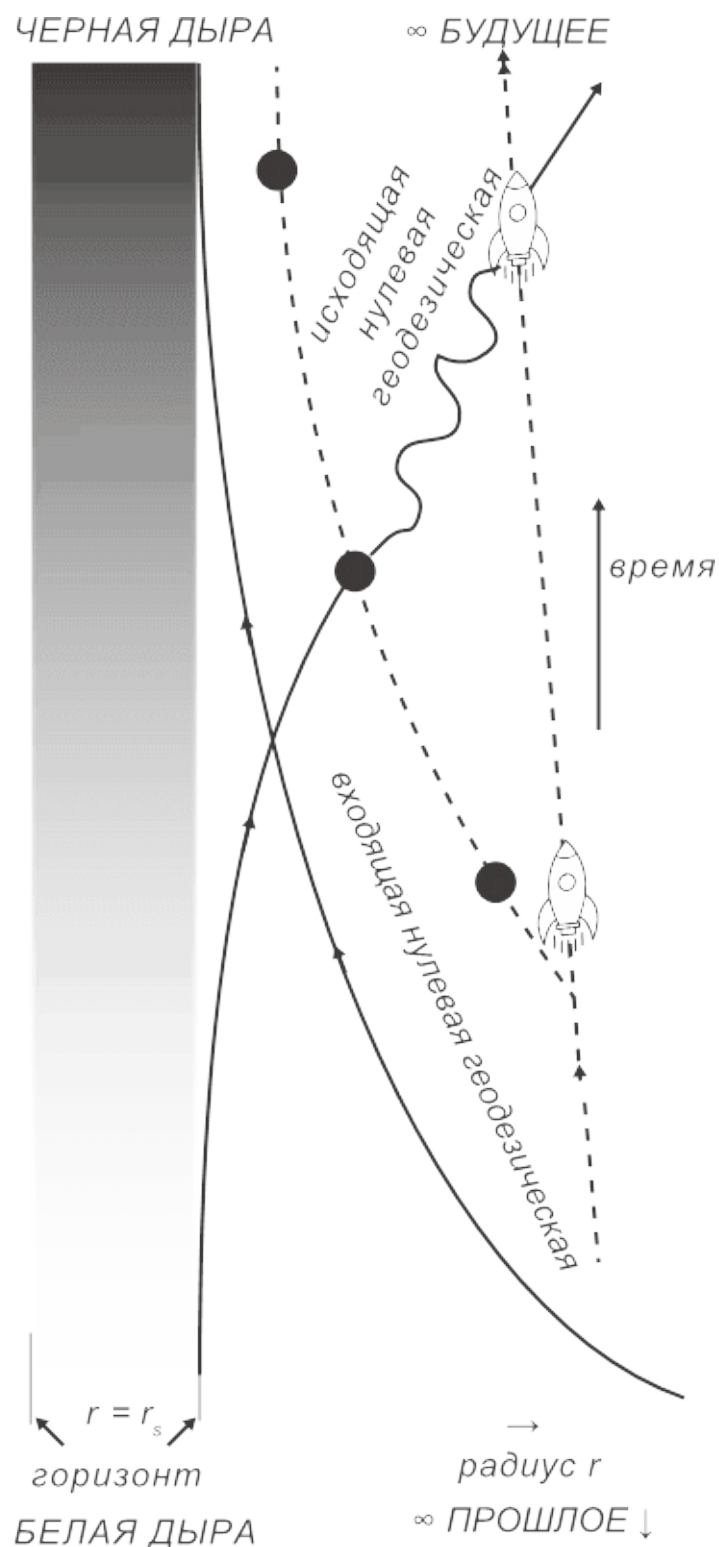


Рис. 3.6. Графическое описание природы решения Шварцшильда в форме черной/белой дыры. С точки зрения внешнего наблюдателя (в данном случае наблюдателя, находящегося в космическом челноке), все радиально исходящие нулевые геодезические происходят из белой дыры в

прошлом; все радиально входящие нулевые геодезические падают в черную дыру в будущем.

Однако ни один из этих классов геодезических никогда не может быть «видим» в момент пересечения горизонта белой дыры или горизонта событий: это происходит только в бесконечном прошлом или будущем, в зависимости от наблюдателя.

Исходящий фотон, испущенный зондом, попадает на исходящую нулевую геодезическую траекторию и движется по ней до момента его поглощения (то есть наблюдения) на челноке.

Чтобы улучшить наше понимание шварцшильдовской черной дыры, мы исследовали много возможных путей движения массивных объектов (таких, как Алисин челнок или злополучный зонд) и фотонов. В совокупности все такие пути называются «причинно-следственными»: одно пространственно-временное событие может повлиять на другое, если оба они лежат на таком причинно-следственном пути, на котором первое событие предшествует второму. Если мы немного расширим наш взгляд на пространство-время и рассмотрим не причинно-следственные пути, то найдем другую замечательную особенность решения Шварцшильда: так называемую *кротовую нору*, или мост Эйнштейна – Розена, соединяющий внешний мир, в котором живут Алиса и Боб, с другим внешним миром, который имеет ту же самую геометрическую структуру. В этом мире подобные Алисе и Бобу авантюристы Алисия и Брэдли могли бы выполнить те же эксперименты над своей черной дырой. И они пришли бы ровно к тем же выводам, что Алиса и Боб. Однако ни одна из этих пар никогда бы не узнала о существовании другой, так как единственной связью между их мирами являются не причинно-следственные пути через внутренность либо черной, либо белой дыры, по которым не может пройти ни одна частица, массивная или безмассовая. Другими словами, две внешние области в причинно-следственном смысле отрезаны друг от друга, а внутренние области пересекаются. Считается, что кротовая нора может соединять очень далекие друг от друга части Вселенной, – эта идея породила множество научно-фантастических произведений. Беда в том, что если вы соединяете удаленные друг от друга области пространства-времени без причинно-следственной связи, то на деле это в любом практическом смысле вообще не означает никакого соединения. Если выражаться точно, не причинно-следственное соединение означает, что ничего (буквально – совсем ничего) не может перейти по этому каналу из одной области в другую. Кротовая нора непроходима. В общей теории относительности

есть решения уравнений поля, описывающие проходимые кротовые норы, но все они требуют каких-то экзотических форм вещества, которые пока не открыты или, возможно, даже вообще не существуют. К обсуждению того, что может происходить в «обычных», то есть непроходимых, кротовых норах, мы вернемся в конце главы 7.

Несмотря на бурную неразбериху под горизонтом (не говоря уж о том, что может происходить в альтернативных мирах), вовне оттуда не доносится ни шороха. В сущности, это обстоятельство является проявлением одного общего свойства черных дыр, которое называют «теоремой об отсутствии волос». В этой главе мы в основном говорим лишь об одной частной категории черных дыр: о невращающихся шварцшильдовских черных дырах. В следующей главе мы рассмотрим вращающиеся черные дыры (так называемые керровские) и черные дыры, обладающие электрическим зарядом. Вы можете спросить: сколько же существует видов черных дыр? Ответ на этот вопрос такой: если вы знаете массу, заряд и спин черной дыры, то ее геометрия полностью определена. Именно это довольно сильное утверждение и называется теоремой об отсутствии волос, или, иногда, теоремой однозначности. Словом «однозначность» при этом хотят сказать, что если мы выберем некоторое конкретное значение массы, спина и заряда, то с этими параметрами будет существовать одна и только одна форма горизонта черной дыры. Термин «теорема об отсутствии волос» возник как раз из юмористического представления о том, как могли бы выглядеть неоднозначные формы горизонта, будь они возможны. Холмики, горы, ямки или долины – каким должен был бы быть общий термин для этих гипотетических особенностей рельефа горизонта черных дыр? Остановились на «волосах», и надо признать, что какая-нибудь академическая «теорема об отсутствии особенностей» запоминалась бы гораздо труднее, чем хлесткое «черные дыры не имеют волос».

Интуитивно мы понимаем эту теорему так: на горизонтах могут появляться какие-то временные особенности формы, но они сглаживаются за время, примерно равное тому, за которое свет однажды описывает вокруг черной дыры круг. Доказать это утверждение строго математически трудно. Исходная формулировка теоремы об отсутствии волос, принадлежащая канадскому физiku Вернеру Израэлю, менее категорична, зато она строго доказана. Израэль доказал, что если предположить, что черная дыра стационарна (а это означает, что у нее нет временных особенностей рельефа, которые надо было бы сглаживать), то на горизонте и снаружи него невращающаяся черная дыра должна быть шварцшильдовской.

Другими словами, единственной геометрией, удовлетворяющей уравнениям Эйнштейна в невращающемся стационарном пространстве-времени, является геометрия Шварцшильда. Впоследствии другие ученые распространили этот результат и на вращающиеся черные дыры, описываемые решением Керра, – мы расскажем о них в главе 4. Доказать, что стационарные решения являются единственными (что и сделал Израэль), еще не означает доказать более сильное утверждение: что все черные дыры удовлетворяют решениям Шварцшильда или Керра. Но все же Израэль сделал очень важный шаг в этом направлении.

Всё указывает на то, что решения Шварцшильда и Керра в самом деле являются устойчивыми конечными точками гравитационного коллапса. Когда черная дыра образуется в результате коллапса массивной звезды или когда две черных дыры сталкиваются друг с другом, пространство-время вблизи горизонта, разумеется, не стационарно и имеет множество интересных структурных особенностей. Но все эти структуры очень быстро уносятся прочь в виде гравитационных волн, и геометрия вне горизонта событий приобретает ту идеальную, гладкую, стационарную форму, которая описывается точным решением уравнений поля Эйнштейна. Ситуация внутри горизонта значительно менее определенная. Фактически, несмотря на принципиальное понимание решений Шварцшильда и Керра для внутренних областей черных дыр, то, что в действительности происходит внутри горизонта динамически образовавшейся черной дыры, в целом составляет тайну, которую физики и математики всё еще пытаются разгадать.

Черная дыра, возникшая в результате коллапса массивной звезды, не будет иметь в своем прошлом белой дыры – ее место занимает сама материнская звезда. Не будет там и кротовой норы, ведущей в другую вселенную. Вообще-то, всё еще выглядит таинственным и то, как появились в центрах галактик видимые там сверхмассивные черные дыры. Не исключено, что им могло предшествовать что-то похожее на белые дыры или на кротовые норы, соединяющие их с другими частями Вселенной. Но белые дыры, если они в далеком прошлом предшествовали нынешним сверхмассивным черным дырам нашей Вселенной, вероятно, должны были сильно отличаться от белых дыр шварцшильдовской метрики, так как наше наблюдаемое прошлое (Большой взрыв) довольно сильно отличается от белой дыры Шварцшильда. Также вполне правдоподобно, что сверхмассивные черные дыры образовались вследствие коллапса массивных звезд на очень ранних стадиях эволюции Вселенной, а затем постепенно увеличивались, поглощая окружающее вещество и

другие черные дыры, пока не приобрели те огромные размеры, какие мы видим сегодня. В этом случае с ними не должно было быть связано ни белых дыр, ни кротовых нор. Конечный итог таков: имеется множество наблюдательных подтверждений существования в нашей Вселенной областей, содержащих черные дыры, но ни для белых дыр, ни для кротовых нор таких подтверждений нет.

Мы начали рассказывать о некоторых чудесных свойствах черных дыр, вытекающих из общей теории относительности. И теперь есть надежда, что вы понимаете, почему ученым потребовалось так много времени, чтобы прийти к общему мнению о том, что в действительности представляет собой метрика Шварцшильда – даром что она была разработана во всех математических деталях вскоре после того, как Эйнштейн опубликовал свои уравнения поля. Понадобилась большая работа математиков, в том числе получение решения Керра в 1963 году, прежде чем решение Шварцшильда стало играть столь серьезную роль. Критическое значение также имело открытие астрономами во Вселенной объектов, свойства которых не поддавались объяснению в обычных рамках, но вполне соответствовали предполагаемым свойствам черных дыр. И вновь подтвердилось, что вся общая теория относительности не просто математическая конструкция, не имеющая отношения к реальному физическому миру (каковой некоторые считали ее в первые годы после создания). К сожалению, наше современное понимание природы черных дыр выкристаллизовалось в основном уже после смерти Эйнштейна, и он не увидел, к каким поистине революционным выводам привела нас его теория.

Глава 4

Вращающиеся черные дыры

В главе 3 мы описали замечательные следствия решения Шварцшильда полевых уравнений Эйнштейна, описывающего изолированную статическую невращающуюся черную дыру. Теперь мы поговорим о расширении решения Шварцшильда, которое позволяет описать и вращающиеся черные дыры. Объекты, соответствующие этому решению, называются керровскими черными дырами, в честь Роя Керра – математика, отыскавшего это решение. Работа Керра оказалась очень важной, потому что черные дыры во Вселенной почти всегда обладают некоторым вращением – *спином*, – и это приводит к новым интересным эффектам. Один из главных таких эффектов, иногда называемый *увлечением системы отсчета*, состоит в том, что в процессе вращения черной дыры пространство-время вовлекается в движение вокруг нее. Это приводит к тому, что геодезические испытывают новую форму прецессии. Вспомним, что в случае шварцшильдовских черных дыр прецессия – это вращение эллипса орбиты в пределах фиксированной двумерной орбитальной плоскости. В решении Керра, однако, новый момент, вносимый увлечением системы отсчета, заключается в том, что теперь и сама плоскость орбиты вращается вокруг оси вращения черной дыры в том же направлении (по часовой стрелке или против нее, если смотреть в направлении оси), что и вращение самой черной дыры. И чем ближе частица расположена к черной дыре, тем быстрее происходит это вызванное увлечением системы отсчета вращение. В зоне, называемой *эргорегионом*^[9], увлечение системы отсчета становится настолько сильным, что все частицы – геодезические или нет, массивные, маломассивные и даже фотоны – вынуждены циркулировать вокруг черной дыры в направлении ее спина. Существование эргорегиона также позволяет отнимать у черной дыры энергию вращения; позже мы опишем один способ сделать это, называемый *процессом Пенроуза*.

Кратко расскажем об электрически заряженных черных дырах, которые соответствуют решениям как уравнений электромагнетизма Максвелла, так и уравнений поля Эйнштейна. Заряженные черные дыры не столь важны для астрофизики, потому что (как мы думаем) большинство черных дыр во Вселенной почти полностью электрически нейтральны.

Однако некоторые интересные идеи здесь все же возникают: например, оказывается, что если черная дыра несет слишком большой заряд, горизонт событий перестает существовать! Считается, впрочем, что ни один физический процесс не может затолкать в черную дыру столь большой заряд, поэтому более корректное утверждение звучит так: существует максимальный электрический заряд, который черная дыра способна нести. Подобным же образом не может быть сколь угодно большим и спин Керровской черной дыры. Черные дыры, обладающие максимально возможным зарядом или спином, называются экстремальными. Вне горизонта событий заряд и спин не меняют в широком смысле свойств пространства-времени, но внутри горизонта дело обстоит совсем иначе. Здесь коллапс пространства-времени (который в шварцшильдовской черной дыре продолжает развиваться, пока не переходит в сингулярность) через некоторое время замедляется и, наконец, обращается вспять на уровне, который называется *внутренним горизонтом*. Не являясь сингулярностью, внутренний горизонт все же имеет свои причудливые свойства, одно из которых состоит в том, что на нем уравнения поля в некотором смысле не работают и поэтому однозначно предсказать, что случится с пространством-временем в его окрестности, невозможно. Если все же предположить, что решение Керра можно – настолько гладко, насколько это возможно – распространить за внутренний горизонт, то пространство-время переходит в новую область с еще более необычными свойствами: сингулярностью отрицательной массы и траекториями, по которым наблюдатели могут двигаться назад во времени. Сейчас мы рассмотрим эти свойства более подробно.

Начнем с аргументов в пользу поиска вращающихся черных дыр. В этой главе мы понимаем *спин* в классическом, а не в квантовомеханическом смысле, то есть как вращение вокруг определенной оси. Мерой вращения тела является момент импульса. И квантовомеханический, и классический спин измеряются моментом импульса, хотя они имеют довольно сильно различающиеся математические и физические характеристики. Момент импульса – важный физический параметр, в частности, потому, что в замкнутой системе он *сохраняется*. Внешняя сила (в форме момента силы) способна изменить момент импульса системы, но по третьему закону Ньютона, который выполняется и в квантовой механике, и в теории относительности, это изменение уравнивается равным по величине и противоположным по направлению изменением момента импульса источника внешней силы. Почти все планеты, звезды и черные дыры во Вселенной обладают хоть каким-то моментом импульса

просто потому, что когда любое тело во Вселенной формируется и эволюционирует, оно неизбежно вовлекается в сложные динамические взаимодействия с окружающим его веществом. В том, что мы говорим, нет ровно ничего нового: все это происходит в рамках классической механики, восходящей к временам Ньютона и еще более ранним. Но из этого все же следует, что у рядовых черных дыр, которые мы рассчитываем встретить во Вселенной, должны быть некоторые свойства, которых решение Шварцшильда, описывающее черные дыры со строго нулевым моментом импульса, не предусматривает.

Выходит, мы нуждаемся в решении уравнений поля, которое описывает вращающуюся черную дыру. При этом в частном случае, когда вращение становится исчезающе малым, это решение должно переходить в шварцшильдовское. Учитывая, что Шварцшильд опубликовал свое решение меньше чем через год после появления общей теории относительности, может показаться странным, что долгожданное решение для вращающейся черной дыры было найдено Роем Керром только в 1963 году. Шварцшильд получил свое решение в предположении сферической симметрии. Но когда черная дыра вращается, то оказывается, что она искажает окружающее ее пространство-время и его геометрия больше не может оставаться сферически симметричной. Поэтому Керр выбрал класс решений с менее жесткими ограничениями: осесимметричные. У таких решений есть ось симметрии, вокруг которой можно вращать геометрию и это не будет приводить к каким-либо изменениям. Например, мяч для американского футбола осесимметричен (если не считать швов, текстуры поверхности и нарисованных на ней рекламных логотипов). Ось симметрии проходит от одного заостренного конца мяча к другому в продольном направлении. Если мастерски ударить по такому мячу так, чтобы он закрутился вокруг этой оси, вы не заметите, что он вращается (разве только по мельканию логотипа на его боках). Если ударить не столь мастерски, мяч закрутится вокруг какой-то другой оси и тогда будет в полете вертеться и кувыркаться в воздухе. Диски и цилиндры – другие примеры осесимметричных геометрий. Сферу тоже можно считать осесимметричной, но она обладает и дополнительной симметрией: она симметрична по отношению к любой оси, проходящей через ее центр.

Оказывается, что если геометрия пространства-времени сферически симметрична, уравнения поля становятся гораздо проще по сравнению с уравнениями, имеющими менее жесткие ограничения – осесимметричные, и это одна из причин, по которым Керру понадобилось так много времени, чтобы найти свое решение. Если устранить требование

осесимметричности, уравнения поля еще больше усложняются, и естественно задумываешься о том, не ждут ли своего открытия еще более сложные их решения и еще более экзотические варианты черных дыр. Но обсуждавшееся в главе 3 замечательное свойство отсутствия у черных дыр «волос» служит гарантией того, что этого не случится. Вспомним, что согласно той теореме любая временная особенность рельефа («волосы»), которая могла бы появиться у черной дыры, очень быстро исчезает, и черная дыра тут же возвращается в свое однозначное невозмущенное состояние. В отсутствие материи или электрических зарядов это стационарное состояние является метрикой Керра. Другими словами, любые неосесимметричные особенности, которые могла бы иметь черная дыра, могут быть только временными. Более сложных, чем керровское, стационарных решений полевых уравнений Эйнштейна, описывающих черные дыры, не существует.

Многие свойства черных дыр качественно независимы от спина: например, то, что между локальным и удаленным наблюдателями время замедляется и становится бесконечным при приближении к горизонту; или что горизонт является границей, пропускающей только в одну сторону, а пространство-время начинает коллапсировать само в себя после его пересечения; или что орбиты, проходящие достаточно близко к черной дыре, могут иметь вихревой характер. Однако в *деталях* эти эффекты во вращающейся черной дыре могут быть не совсем такими, как в невращающейся. Два важных аспекта влияния вращения на геометрию вне черной дыры приводят к некоторым совершенно новым явлениям. Во-первых, как уже говорилось, эта геометрия перестает быть сферической. В метрике Шварцшильда поверхности постоянной функции хода (что означает постоянное гравитационное красное смещение) сферические. В метрике Керра аналогичные поверхности уплощаются вокруг полюсов, где проходит ось вращения, и, соответственно, выпирают наружу вдоль экватора. Это похоже на сжатие Земли, Солнца или любого другого массивного сферического небесного тела вследствие его вращения. И это сплющивание тем заметнее, чем ближе объект к горизонту событий черной дыры и чем быстрее она вращается.

Второй существенный аспект влияния вращения черной дыры на геометрию заключается в том, что пространство-время само по себе начинает «течь» вокруг черной дыры, и тем быстрее, чем ближе объект к горизонту. Мы еще объясним более подробно, что мы понимаем под «течением» пространства-времени, через описание его влияния на геодезические траектории, но пока что удачной аналогией выглядят потоки

воздуха во время торнадо. В этой аналогии воздух представляет собой пространство-время, а по геодезическим летят частицы пыли (или несчастные коровы), подхваченные смерчем и носимые вокруг его воронки. Мы уже говорили, что в контексте пространства-времени этот эффект называется «увлечением системы отсчета». Это явление свойственно не только черным дырам; вращение Земли приводит к такому же «увлечению», но по сравнению с черной дырой его величина исчезающе мала (настолько, что ею могут пренебречь спутники системы GPS, и лишь недавно она была измерена в сверхчувствительных экспериментах с участием спутников Gravity Probe B и LAGEOS).

Чтобы исследовать последствия «увлечения системы отсчета», давайте снова запустим наши верные спутники-зонды, сбросив их из состояния покоя в точке, расположенной на большом расстоянии от керровской черной дыры, и проследим с их помощью структуру ее геодезических. Для шварцшильдовской черной дыры, сферически симметричной и невращающейся, нет ничего особенного в том, чтобы построить плоскость, проходящую через ее центр, определить ее как экваториальную и наметить две точки на горизонте событий к северу и к югу от плоскости экватора, которые будут ее полюсами: любая ориентация плоскости экватора ничем не будет отличаться от какой-либо другой. Для вращающегося объекта, такого как керровская черная дыра, естественно определить северный и южный полюсы как точки на горизонте, лежащие на оси вращения черной дыры, а плоскость экватора как проходящую под углом 90° к этой оси. Из-за увлечения системы отсчета и осесимметричности керровской черной дыры теперь будет иметь значение, под каким углом относительно оси вращения лежит точка, из которой мы выпустили наши зонды. Возьмем два крайних случая: один зонд выпущен прямо к одному из полюсов черной дыры (неважно, северному или южному), а другой вдоль экватора. В пространстве-времени Шварцшильда между ними не было бы никакой разницы: оба зонда падали бы радиально, как было описано в главе 3. В пространстве-времени Керра с зондом, падающим на полюс, происходит то же самое, хотя точная скорость изменения гравитационного замедления времени и красного смещения в процессе падения зонда, измеренная с точки зрения удаленного наблюдателя, будет отличаться от скорости шварцшильдовского случая. Но для зонда, падающего на экватор, все будет совершенно по-другому. Сначала он будет падать радиально, но по мере приближения к горизонту вращение черной дыры начнет увлекать зонд вокруг нее. И если смотреть издали, его траектория будет выглядеть как сжимающаяся спираль в плоскости экватора, все теснее и теснее

закручивающаяся вокруг горизонта, прижимающаяся к нему все теснее и теснее, так его и не пересекая.

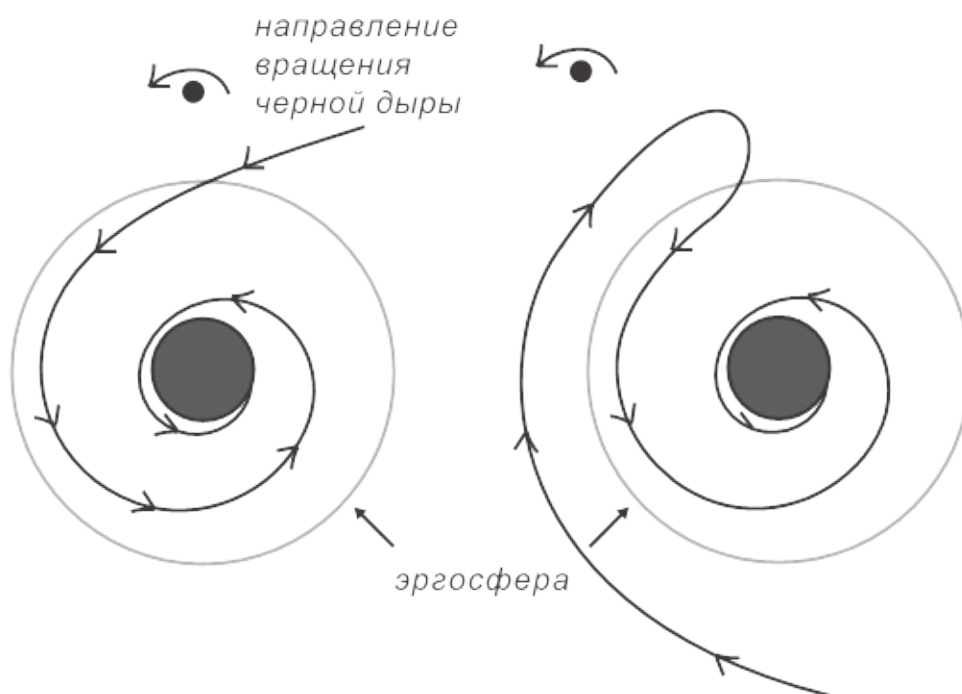


Рис. 4.1. Влияние увлечения системы отсчета на падение по геодезической в керовскую черную дыру. Показана геодезическая, по которой происходит падение в керовскую черную дыру; слева (справа), частица имеет положительный (отрицательный) момент импульса по отношению к направлению вращения черной дыры.

Световые сигналы от зонда будут краснеть и испытывать замедление времени в соответствии с решением Шварцшильда. Но теперь будет казаться, что они выходят из некоторой точки на горизонте, вращающейся с фиксированной угловой скоростью. Для зондов, сброшенных под любым углом, эта скорость была бы одинаковой, хотя у горизонта они все оказались бы в соответственно различных положениях по долготе. Наблюдения углового движения падающих зондов – один из способов измерить скорость вращения черной дыры.

Наблюдатель, находящийся на падающем извне зонде, заметил бы, что он начинает вовлекаться в движение вокруг черной дыры. Как и в шварцшильдовском пространстве-времени, он достигнет горизонта и пересечет его за конечное время, которое он сможет измерить по своим часам. Таким образом, все еще существует бесконечная степень несоответствия между скоростью хода времени для наблюдателя,

пересекающего горизонт, и для удаленного наблюдателя. Больше того, к моменту, когда наблюдатель на зонде пересечет горизонт, с его точки зрения он сделает это, совершив конечное число оборотов. А внешний наблюдатель никогда не увидит, как зонд пересечет горизонт: с его точки зрения, зонд будет все теснее прижиматься к горизонту, бесконечно продолжая обращаться вокруг него с постоянной угловой скоростью. Так что и здесь мы снова сталкиваемся с бесконечным несоответствием между локальными и удаленными измерениями количества оборотов зонда вокруг оси вращения черной дыры.

Воздействие увлечения системы отсчета на орбиту более сложную, чем только что описанное свободное падение на экватор или полюс, можно описать, используя понятие прецессии плоскости орбиты. Для шварцшильдовской черной дыры любое орбитальное движение вокруг нее по геодезической происходит в фиксированной двумерной плоскости, проходящей через центр черной дыры. Мы будем называть эту плоскость орбитальной. Как уже говорилось в главе 3, эллипс орбиты прецессирует в этой плоскости, но из нее никогда не выходит. Вблизи керровской черной дыры увлечение системы отсчета приводит к тому, что орбитальная плоскость начинает вращаться, или прецессировать, вокруг оси вращения черной дыры. Скорость этой прецессии зависит и от скорости вращения самой черной дыры, и от наклона орбиты к плоскости экватора дыры, и от того, насколько близко к черной дыре находится зонд. Если орбита лежит в плоскости экватора, она так в ней и останется, в то время как плоскости орбит, проходящих над полюсами черной дыры, испытывают наибольшую прецессию. Если орбита проходит далеко от черной дыры, прецессия будет очень небольшой, независимо от наклона орбиты или спина черной дыры. Так что и в этом случае, как и для шварцшильдовских черных дыр, на очень больших расстояниях от черной дыры динамика орбиты хорошо описывается ньютоновской физикой. Если взять другую крайность – очень близкую орбиту, прецессия ее плоскости будет наиболее выраженной в случае вихревых орбит, особенно при «бреющем полете». Тогда, вместо того чтобы описывать круги вокруг черной дыры в одной и той же плоскости, зонд будет постепенно менять плоскость обращения в интервале между некоторыми фиксированными широтами на сфере выше и ниже экватора. При изначальном совпадении плоскости орбиты зонда с плоскостью экватора плоскость вращения зонда меняться не будет, а если начальная орбита будет в плоскости полюсов черной дыры, то из-за прецессии траектории оборотов зонда постепенно заполнят всю сферу.

Увлечение системы отсчета будет влиять и на негеодезические

траектории зонда (то есть при движении с включенными двигателями). Вблизи горизонта в эргорегионе увлечение системы отсчета будет таким сильным, что на всех времениподобных и нулевых траекториях зонд будет вынужден обращаться вокруг черной дыры в том же направлении, в каком вращается она сама. Если вы находитесь вне горизонта, но внутри эргорегиона, то даже если ваши двигатели будут работать на полную мощность в направлении, противоположном направлению вращения черной дыры, вы все равно будете вовлечены в движение вокруг нее в направлении ее вращения, какой бы ни была мощность ваших двигателей. Поверхность, ограничивающая эргорегион, – эргосфера – является сплюсненной копией горизонта, касаясь его в точках полюсов и выпячиваясь наружу в наибольшей степени вокруг экватора (рис. 4.3 на с. 156). Чем быстрее вращается черная дыра, тем сильнее выпячивается экваториальный пояс эргосферы. Интересно, что существует предел скорости вращения черной дыры, и если она вращается на этой предельной скорости, то называется экстремальной. У экстремальных керровских черных дыр экваториальное утолщение эргосферы достигает двойного радиуса горизонта. Внутри эргосферы все частицы должны двигаться вокруг черной дыры в одном и том же направлении, хотя это движение может быть более или менее быстрым в зависимости от того, где частица находится в эргосфере и действуют ли на нее другие силы, кроме тяготения. Если подойти очень близко к горизонту, то, с точки зрения внешнего наблюдателя, замедление времени и увлечение системы отсчета будут действовать совместно, так, что все частицы будут обращаться по своим траекториям, геодезическим или нет, с той же угловой скоростью, что и сам горизонт.

Почему черная дыра не может вращаться сколь угодно быстро? С математической точки зрения в решении Керра вращение может быть быстрее экстремального, но тогда горизонт исчезнет (то есть эти решения уже не будут описывать черные дыры). В связи с этими решениями возникает несколько проблем, одна из которых заключается в том, что без горизонта сингулярность пространства-времени обнаруживается для окружающей Вселенной. Что же из этого следует? Теоретически – ничего, но дело в том, что классическая общая теория относительности не может предсказать поведение сингулярности в причинно-следственном смысле. Поэтому мы даже не можем сказать, что в этом случае значит слово «обнаруживается». Были предприняты попытки численно промоделировать на компьютере случаи сверхбыстрого вращения черной дыры (или для начала хотя бы создать модели сингулярностей без горизонтов), но ничего

похожего на объекты, которые могли бы существовать во Вселенной, получить не удалось. Несколько десятилетий назад английский физик и математик сэр Роджер Пенроуз предвосхитил эту неудачу, сформулировав «гипотезу космической цензуры». Согласно этой гипотезе, все сингулярности, которые могут существовать в природе, должны быть «одеты», то есть скрыты от наблюдения своими горизонтами событий. Если природа действительно следует такой цензуре, для физики это большое разочарование. Почему? Мы считаем, что сингулярности в пространстве-времени, предсказываемые общей теорией относительности, являются точками, в которых эта теория перестает работать, и для описания того, что там происходит, нужна новая теория – назовем ее квантовой гравитацией. Наблюдения событий, происходящих в таких точках, могли бы дать уникальное представление об истинной сути этой теории, – и конечно, нам очень не повезет, если окажется, что эти точки надежно скрыты от нас горизонтами событий. Мы еще вернемся к этой теме, когда в главе 6 будем обсуждать столкновения черных дыр.

Итак, краткое резюме. Вращение усложняет геометрическую структуру керровских черных дыр по сравнению со случаем Шварцшильда и вносит новую особенность в описание траекторий частиц вблизи горизонта: увлечение системы отсчета. Представим себе, что мы запускаем в шварцшильдовскую черную дыру со всех направлений целую флотилию зондов с мигалками. Внешний наблюдатель никогда не увидит, как они пересекают горизонт; ему будет казаться, что по мере приближения к горизонту они постепенно замедляются, образуя жесткую конфигурацию друг относительно друга, причем сигналы приходят от них со все меньшей частотой и все большим красным смещением. Для керровской черной дыры реализуется похожий сценарий, с той лишь разницей, что из-за увлечения системы отсчета образовавшаяся конфигурация зондов будет непрерывно вращаться с периодом, равным периоду вращения черной дыры. Теперь мы хотим описать, как вращение керровских черных дыр обеспечивает механизм отвода от них энергии.

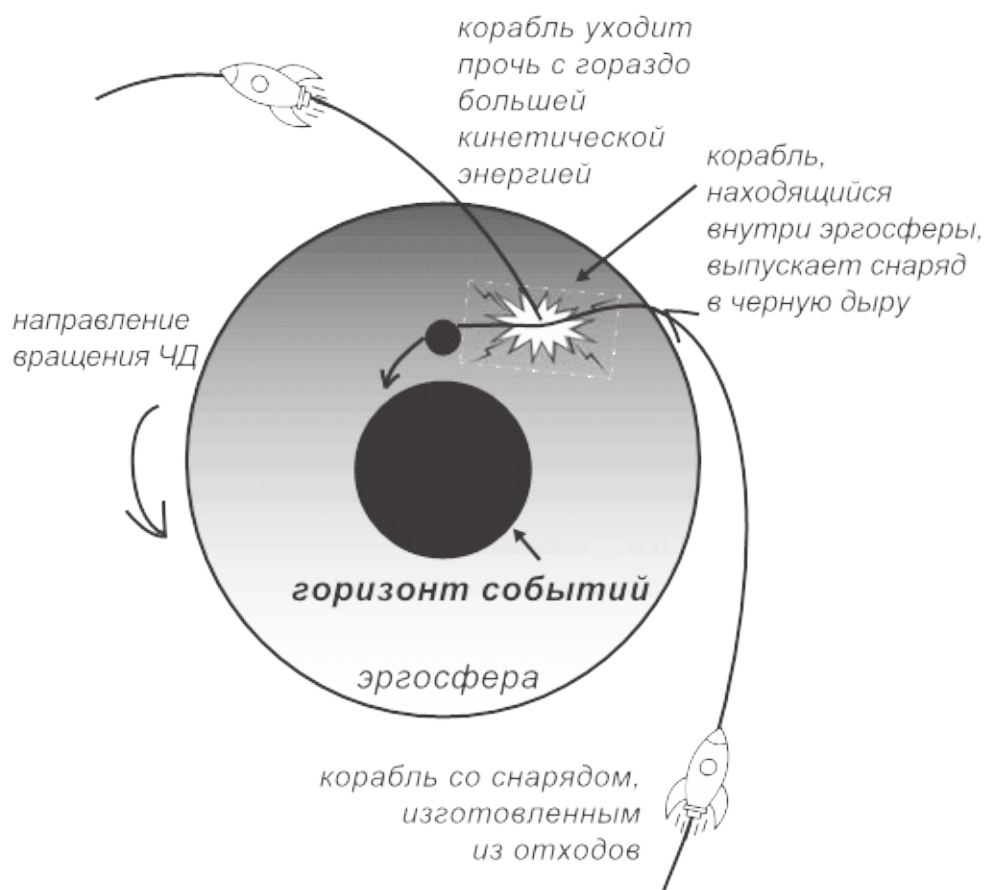


Рис. 4.2. Иллюстрация процесса

Пенроуза: вид сверху вниз вдоль оси вращения черной дыры на плоскость экватора, в которой находятся орбиты корабля для извлечения энергии и его снаряда.

Вспомним, что согласно теории относительности масса эквивалентна энергии ($E = mc^2$). Обычная форма энергии – это кинетическая энергия, и формула $E = mc^2$ подразумевает, что вещество может быть преобразовано из одной формы в другие плюс некоторая кинетическая энергия. Возможен и обратный процесс: кинетическая энергия ведет к преобразованию вещества (что происходит, например, в ядерных реакциях). В черной дыре весь энергетический эквивалент ее массы находится в гравитационной ловушке, по крайней мере если не принимать во внимание квантовые эффекты, до которых мы дойдем в главе 7. Однако вращение – это форма кинетической энергии, и ее у черной дыры можно отнять. Заметим, что при этом мы не извлекаем никакой энергии из внутренней области черной дыры, но имеем дело только с энергией вращения в пространстве-времени вокруг нее. Один из способов добыть эту энергию – процесс Пенроуза, названный так по имени его открывателя, который сформулировал гипотезу космической

цензуры. Вот как это получается (рис. 4.2). Космическая станция, находящаяся на орбите вокруг черной дыры на некотором расстоянии от нее, посылает к ней корабль для добычи энергии. Корабль летит по геодезической, которая входит в эргорегион. Мы уже знаем, что для этой цели лучше всего подходят экваториальные геодезические. Оказавшись в эргорегионе, корабль-робот тщательно прицеливается и выстреливает тяжелый снаряд с очень большой скоростью в направлении, противоположном вращению черной дыры. Разумеется, из-за увлечения системы отсчета и снаряд и корабль будут для внешнего наблюдателя двигаться вокруг черной дыры так же, как и до выстрела, но корабль будет вращаться быстрее. Важно при этом, что снаряд тяжелый, сравнимый по массе с самим кораблем, который испытает большую отдачу при выстреле. Снаряд должен быть направлен так, чтобы отдача оттолкнула корабль на орбиту, по которой он мог бы вернуться на космическую станцию, а сам снаряд упал бы в черную дыру. Если выстрел сообщит снаряду достаточную скорость, у снаряда будет момент импульса со знаком, противоположным знаку момента черной дыры. Когда снаряд будет поглощен черной дырой, ее скорость вращения уменьшится на соответствующую величину. Но общий момент импульса сохраняется, поэтому (снова по третьему закону Ньютона) такой же момент импульса унесет с собой корабль, что и означает, что корабль приобрел кинетическую энергию.

Вообще-то до сих пор в нашем рассказе о процессе Пенроуза не было ничего необычного или замечательного. В сущности, если бы в нашем мысленном эксперименте место черной дыры заняло Солнце, все наши рассуждения о сохранении момента остались бы в силе. Момент импульса Солнца после того, как оно поглотило бы снаряд, уменьшился бы, а корабль приобрел бы такой же момент и тем самым кинетическую энергию. Однако в этом случае корабль никогда не смог бы приобрести достаточно кинетической энергии, чтобы компенсировать энергетический эквивалент массы, унесенной снарядом. А в случае вращающейся черной дыры кое-что необычное все же происходит: если орбита подобрана очень тщательно, а снаряд точно нацелен, корабль может приобрести столько кинетической энергии, чтобы она даже с некоторым избытком компенсировала потерю снаряда. Нелегко на интуитивном уровне объяснить всё, что здесь происходит в случае черной дыры. Вместо этого опишем ключевой момент вычислений, который иллюстрирует еще одно странное свойство экстремального искривления пространства и времени вокруг черных дыр и объясняет, почему так критично для процесса Пенроуза, чтобы снаряд был

выпущен внутри эргосферы.

Но сначала придется сделать небольшое отступление и поговорить об энергии объекта на орбите. Энергия может принимать различные формы. Энергия покоя – это энергия, заключенная в самой массе, что и выражается уравнением $E = mc^2$. Есть также и кинетическая энергия – энергия движения. И по крайней мере в ньютоновском тяготении существует потенциальная энергия, которая соответствует глубине погружения объекта в гравитационный колодец. Потенциальная энергия отрицательна: это энергия, которую надо было бы придать изначально неподвижному объекту, чтобы поднять его из гравитационного колодца. В ньютоновской теории тяготения полная механическая энергия движущегося по орбите объекта (то есть его кинетическая плюс гравитационная потенциальная энергия) никогда не изменяется, при условии, что единственной силой, действующей на объект, является гравитационное притяжение большой стационарной массы, такой как Солнце. Любое изменение кинетической энергии уравнивается равным по величине и противоположным по знаку изменением энергии потенциальной. В общей теории относительности дать определение потенциальной энергии, которое действует для всего пространства-времени, более сложно, но по крайней мере для объекта, движущегося в геометрии Керра, это возможно, и если мы сделаем это, то увидим, что на большом удалении от черной дыры всё происходит в ньютоновских рамках. Таким образом, общий результат заключается в том, что полная механическая энергия объекта, обращающегося по орбите вокруг керовской черной дыры (энергия, которая теперь включает и энергию покоя, эквивалентную массе), может быть определена, а поскольку объект находится на геодезической орбите, эта полная энергия не изменяется.

И вот здесь на сцену выходит загадочное свойство увлечения системы отсчета. В геометрии Керра существуют геодезические орбиты, полностью заключенные в эргосферу, со следующим свойством: движущиеся по ним частицы имеют отрицательные потенциальные энергии, которые перевешивают по абсолютной величине массы покоя и кинетические энергии этих частиц, вместе взятые. Это означает, что *полная* энергия этих частиц отрицательна. Именно это обстоятельство и используется в процессе Пенроуза. Находясь внутри эргосферы, корабль, добывающий энергию, выстреливает снаряд таким образом, что тот двигается по одной из таких орбит с отрицательной энергией. Согласно закону сохранения энергии корабль получает достаточную кинетическую энергию для того, чтобы скомпенсировать потерянную массу покоя, эквивалентную энергии

снаряда, и вздобавок получить положительный эквивалент чистой отрицательной энергии снаряда. Так как снаряд после выстрела должен исчезнуть в черной дыре, то его хорошо бы изготовить из каких-нибудь отходов. С одной стороны, черная дыра все равно слопает всё что угодно, а с другой – это вернет нам больше энергии, чем мы вложили. Так что вздобавок приобретенная нами энергия будет «зеленой»!

Максимальное количество энергии, которое может быть извлечено из керровской черной дыры, зависит от того, насколько быстро дыра вращается. В самом крайнем случае (при максимально возможной скорости вращения) на долю энергии вращения пространства-времени приходится примерно 29 % полной энергии черной дыры. Возможно, вам покажется, что это не очень много, но не забудьте, что это доля полной массы покоя! Для сравнения вспомните, что ядерные реакторы, работающие на энергии радиоактивного распада, используют менее одной десятой процента энергии, эквивалентной массе покоя.

Геометрия пространства-времени внутри горизонта вращающейся черной дыры резко отличается от пространства-времени Шварцшильда. Последуем за нашим зондом и посмотрим, что произойдет. Вначале всё выглядит похожим на случай Шварцшильда. Как и прежде, пространство-время начинает коллапсировать, увлекая всё вслед за собой по направлению к центру черной дыры, а приливные силы начинают расти. Но в керровском случае прежде, чем радиус обратится в нуль, коллапс замедляется и начинает идти вспять. В быстро вращающейся черной дыре это произойдет задолго до того, как приливные силы станут достаточно большими, чтобы угрожать целостности зонда. Чтобы интуитивно понять, отчего это происходит, вспомним, что в ньютоновской механике при вращении возникает так называемая центробежная сила. Эта сила не относится к числу фундаментальных физических сил: она возникает вследствие совместного действия фундаментальных сил, которое необходимо, чтобы обеспечить состояние вращения. Результат можно представить как эффективную силу, направленную вовне, – центробежную силу. Вы чувствуете ее на крутом повороте в быстро движущемся автомобиле. И если вы когда-нибудь катались на карусели, вы знаете, что чем быстрее она крутится, тем крепче вам приходится хвататься за поручни, ведь если вы их отпустите, вас выбросит наружу. Эта аналогия для пространства-времени не идеальна, но суть она передает верно. Момент импульса в пространстве-времени керровской черной дыры обеспечивает эффективную центробежную силу, которая противодействует гравитационному притяжению. Когда коллапс внутри горизонта стягивает пространство-время к меньшим радиусам,

центробежная сила увеличивается и в конце концов становится способной сначала противодействовать коллапсу, а затем и обратить его вспять.

В момент, когда коллапс останавливается, зонд достигает уровня, который называется внутренним горизонтом черной дыры. В этой точке приливные силы невелики, и зонду, после того, как он пересек горизонт событий, требуется лишь некоторое конечное время, чтобы достичь ее. Однако одно лишь прекращение коллапса пространства-времени еще не означает, что наши проблемы позади и что вращение каким-то образом привело к устранению сингулярности внутри шварцшильдовской черной дыры. До этого пока далеко! Ведь еще в середине 1960-х Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг доказали систему теорем о сингулярности, из которых следовало, что если уж случился гравитационный коллапс, пусть и короткий, то в результате должна образоваться какая-то форма сингулярности. В шварцшильдовском случае это всеобъемлющая и всепоглощающая сингулярность, которая подчиняет себе все пространство внутри горизонта. В решении Керра сингулярность ведет себя по-другому и, надо сказать, довольно неожиданно. Когда зонд достигает внутреннего горизонта, керровская сингулярность обнаруживает свое присутствие – но оказывается, что это происходит в причинном *прошлом* мировой линии зонда. Это как если бы сингулярность была там всегда, но только теперь зонд почувствовал, как ее влияние достигло его. Вы скажете, что это звучит фантастично, и это правда. И есть несколько несообразностей в картине пространства-времени, из которых тоже видно, что этот ответ нельзя считать окончательным.

Первая проблема с сингулярностью, появляющейся в прошлом наблюдателя, который достигает внутреннего горизонта, заключается в том, что в этот момент уравнения Эйнштейна не могут однозначно предсказать, что произойдет с пространством-временем вне этого горизонта. То есть в некотором смысле присутствие сингулярности может привести к чему угодно. Возможно, то, что произойдет на самом деле, сможет нам объяснить теория квантовой гравитации, но уравнения Эйнштейна не дают нам никаких шансов это узнать. Просто из интереса мы опишем ниже, что произойдет, если потребовать, чтобы пересечение горизонта пространства-времени было настолько гладким, насколько это математически возможно (если функции метрики будут, как говорят математики, «аналитическими»), но никаких ясных физических оснований для такого предположения нет. В сущности, вторая проблема с внутренним горизонтом предполагает ровно обратное: в реальной Вселенной, в которой вещество и энергия существуют и вне черных дыр, пространство-время у внутреннего

горизонта становится весьма негладким, и там развивается петлеобразная сингулярность. Она действует не столь разрушительно, как бесконечная приливная сила сингулярности в решении Шварцшильда, но уж во всяком случае ее присутствие заставляет сомневаться в следствиях, которые вытекают из представления о гладких аналитических функциях. Возможно, это и хорошо – уж очень странные вещи влечет за собой предположение об аналитическом расширении.

Прежде чем перейти к рассказу об этих странных вещах, объясним сначала, почему вещество вне черной дыры может так сильно влиять на ее внутренний горизонт. В конечном счете, причина этого влияния кроется в неодинаковом течении времени внутри и снаружи черной дыры и в том, как сказывается на этом различии обратный ход коллапса, вызванный вращением пространства-времени. Вспомним, что в пространстве-времени Шварцшильда именно различный ход времени приводил к бесконечному красному смещению и замедлению времени, которые отмечались внешними наблюдателями; этим же фактором объяснялось, почему внешние наблюдатели никогда не могут увидеть ничего, что пересекало бы горизонт. В случае Керра все обстоит точно так же, как с прибавлением того, что вносит в картину увлечение системы отсчета. Во всяком случае, внешние наблюдатели по-прежнему никогда не смогут заглянуть за горизонт событий и поэтому не смогут стать свидетелями драмы, которая разворачивается на внутреннем горизонте. Ключ к пониманию того, что там происходит, мы получим, если зададим противоположный вопрос: что видит пассажир зонда, оглядываясь *назад*, во внешнюю Вселенную, когда он падает в направлении внутреннего горизонта? Во-первых, эффекты течения времени будут обратны тем, которые видит смотрящий внутрь внешний наблюдатель. На зонде будет наблюдаться сокращение времени, то есть события во внешнем мире будут казаться разворачивающимися всё быстрее и быстрее. Будет также иметь место гравитационное голубое смещение, то есть длины волн света, испускаемого наружными источниками, будут укорачиваться, сдвигаясь в голубую часть электромагнитного спектра. Подобные результаты наблюдались бы пассажирами зонда, приближающегося к горизонту событий: достигнув его, пассажиры могли бы подумать, что наблюдаемое ими сокращение времени и голубое смещение обращаются в бесконечность, зеркально отражая бесконечное красное смещение и замедление времени, регистрируемые внешними наблюдателями. Это почти верно для наблюдателя на зонде, оснащённом мощным ракетным двигателем и способном зависнуть в непосредственной близости к горизонту событий.

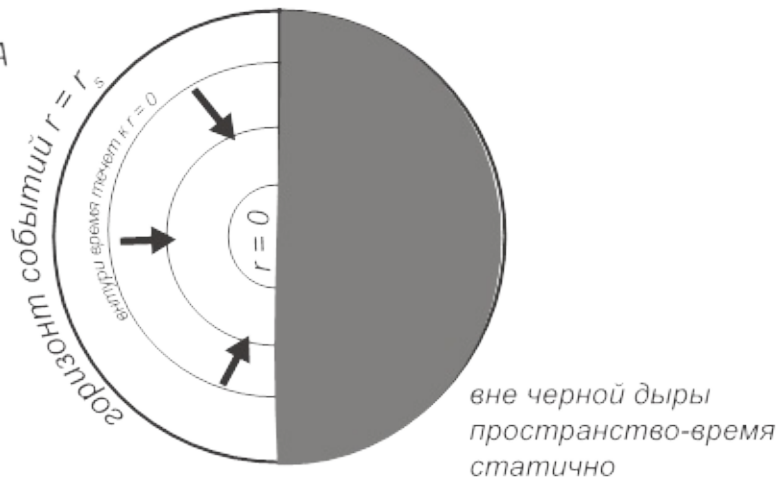
Но для пассажира зонда, свободно падающего сквозь горизонт событий, все обстоит совершенно иначе. Падение сквозь горизонт событий приводит к значительному эффекту Доплера, который частично противодействует гравитационному сокращению времени. И пассажир свободно падающего зонда, оглядываясь назад при пересечении горизонта, не увидит ничего особенно необычного. Однако как только он окажется внутри, обращение вспять коллапса пространства-времени, произошедшее в результате вращения черной дыры, тут же приведет к фактическому замедлению зонда. Когда зонд достигнет внутреннего горизонта, эффект Доплера уже не сможет противодействовать гравитационному сокращению времени, и оно, так же как и голубое смещение, всё-таки станет бесконечным. Другими словами, за конечный отрезок собственного времени наблюдатель на зонде сможет «увидеть» всю бесконечную временную эволюцию внешней Вселенной! Правда, это всё же не совсем так, почему мы и взяли слово «увидеть» в кавычки. Дело в том, что фотоны с более короткими длинами волн имеют большую энергию, и прежде, чем зонд достигнет внутреннего горизонта, голубое смещение сделает их энергию столь большой, что они мгновенно испепелят любой зонд, из чего бы он ни был сделан. Это явление называется *голубой сингулярностью* (blue sheet singularity). Теперь вы можете себе представить, почему всё изложенное ставит под вопрос предположение о гладкости внутреннего горизонта, — если только не брать стерильный случай керровской черной дыры в идеальном вакууме без каких-либо следов фотонов или вещества.

Принимая всё это во внимание, поговорим еще раз о странностях, связанных с наиболее гладким из всех возможных вариантов математического расширения решения Керра за внутренний горизонт. Пересекая его, зонд оказывается в новой ветви Вселенной. В этой части Вселенной сингулярность всегда видима и не существует горизонта событий. Сингулярность имеет форму вращающегося кольца, кривизна и приливные силы которого обращаются в бесконечность, когда мы к нему приближаемся. Однако, в отличие от сингулярности в решении Шварцшильда, которая появляется в некоторый момент будущего на любой возможной траектории падения, керровская кольцевая сингулярность имеет определенную пространственную локализацию, и зонд может избежать входа в нее. Для этого у него есть несколько способов. Один из них — снова начать двигаться вовне к большим значениям радиуса, всё дальше от радиуса внутреннего горизонта. В этом сценарии пространство-время втянет зонд в область белой дыры и быстро выбросит наружу, когда эта часть пространства-времени эволюционирует в новую керровскую черную

дыру с массой и вращением, идентичными параметрам дыры, чей горизонт событий зонд первоначально пересек. Зонд никогда не сможет вернуться в белую дыру, потому что, как и в шварцшильдовском случае, она теперь в его прошлом, а в будущем остается только новая черная дыра. Однако зонд может бесконечно повторять одни и те же стадии движения: нырять в очередную черную дыру, пересекать ее внутренний горизонт, а затем возвращаться назад через новую белую дыру, чтобы снова попасть в черную. Аналитическое расширение решения Керра, таким образом, дает нам бесконечную последовательность Вселенных, состоящих из черных дыр, соединенных белыми.

Для зонда, который пересек внутренний горизонт, есть и другая возможность: продолжать двигаться внутрь и пройти сквозь кольцевую сингулярность. Прекрасно, нет ничего проще! Это все равно, что прыгнуть сквозь обруч. Но разве нельзя было бы оказаться в том же месте, не прыгая сквозь обруч, а просто обойдя его вокруг? Как ни странно, нельзя! Условие максимальной гладкости требует, чтобы после прыжка сквозь обруч зонд оказался бы в совершенно другой области Вселенной. Она тоже может описываться метрикой решения Керра с теми же характеристиками вращения, но на этот раз за вычетом массы исходной керровской черной дыры. Другими словами, в этом месте в пространстве-времени находится «голая» сингулярность отрицательной массы. Эффективная гравитационная сила, обусловленная этой сингулярностью, на самом деле является силой отталкивания, и тела, двигаясь по геодезическим, не падают на нее, а движутся от нее прочь. Что еще более странно, существует область пространства-времени, в которой есть так называемые *замкнутые времениподобные кривые*. Пример замкнутой кривой – кольцо: у него конечная длина, оно начинается в любой своей точке, и проход по нему приводит в исходное положение. Но «нормальные» замкнутые кривые пространственноподобны. Если вы движетесь по кольцу, вы тем самым одновременно движетесь и вперед во времени: поэтому когда вы возвращаетесь в стартовое положение, вы оказываетесь в той же точке пространства, но во времени вы ушли в будущее по отношению к моменту старта. Это времениподобная кривая, и она не замкнута. С замкнутой времениподобной кривой дело обстоит иначе: когда вы возвращаетесь в начальное положение, вы на деле находитесь снова в том же пространственно-временном событии, с которого вы начинали.

ЧЕРНАЯ ДЫРА ШВАРЦШИЛЬДА



ЧЕРНАЯ ДЫРА КЕРРА

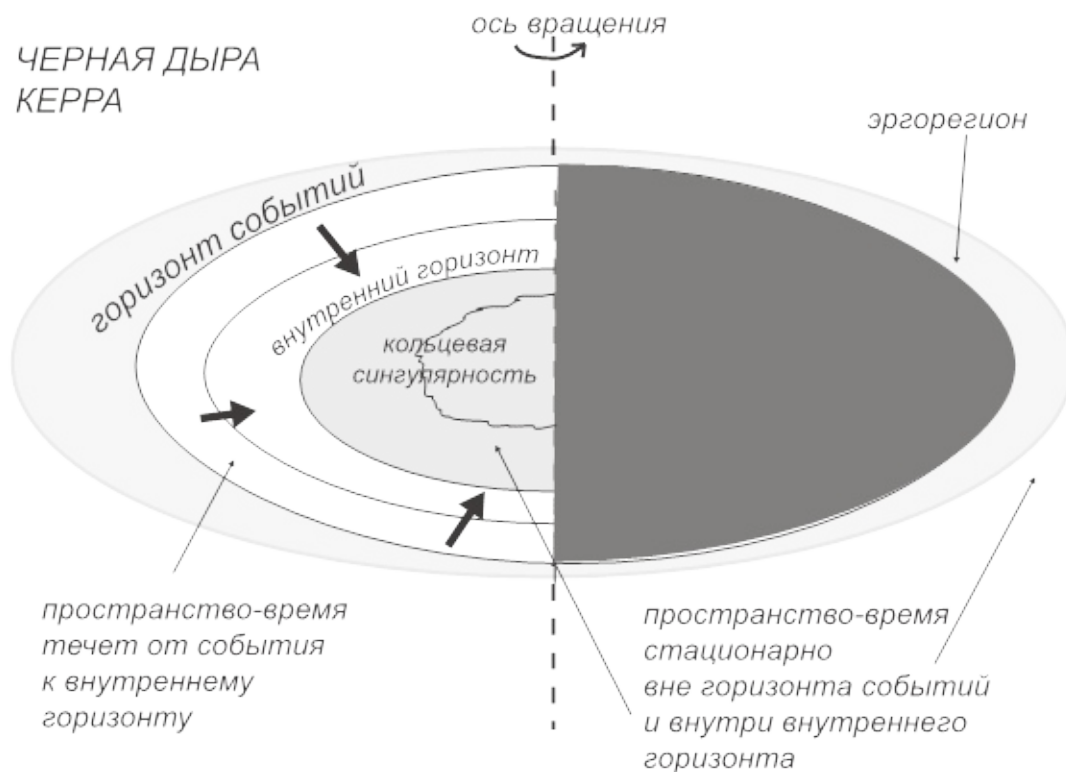


Рис. 4.3. Схематический вид внутренней структуры черных дыр.

В сущности, в области замкнутых времениподобных кривых работает машина времени. Вдалеке от сингулярности не существует никаких замкнутых времениподобных кривых, и если не считать сил отталкивания в районе сингулярности, пространство-время выглядит совершенно обычно. Однако существуют траектории движения (они не геодезические, так что вам понадобится ракетный двигатель) которые доставят вас в область замкнутых времениподобных кривых. Как только вы окажетесь там, вы

сможете двигаться в любом направлении по координате t , которая показывает время удаленного наблюдателя, но по вашему собственному времени вы все равно всегда будете двигаться вперед. А это значит, что вы можете отправиться в любой момент времени t , в который захотите, а потом вернуться в удаленную часть пространства-времени – и даже прибыть туда до того, как отправитесь. Конечно, теперь оживают все парадоксы, связанные с идеей путешествий во времени: например, что, если бы, совершив прогулку во времени, вы убедили ваше прошлое «я» отказаться от нее? Но могут ли существовать такие виды пространства-времени и как могут быть разрешены связанные с этим парадоксы – вопросы, выходящие за рамки этой книги. Однако, так же как и в случае с проблемой «голубой сингулярности» на внутреннем горизонте, общая теория относительности содержит указания на то, что области пространства-времени с замкнутыми времени-подобными кривыми неустойчивы: как только вы попытаетесь совместить с одной из этих кривых какое-то количество массы или энергии, эти области могут стать сингулярными. Более того, во вращающихся черных дырах, образующихся в нашей Вселенной, именно «голубая сингулярность» сама по себе может не дать образоваться области отрицательных масс (и всем керровским другим вселенным, в которые ведут белые дыры).

Тем не менее то, что общая теория относительности допускает такие странные решения, выглядит интригующе. Их, конечно, легко объявить патологией, но не забудем, что сам Эйнштейн и многие его современники говорили то же самое о черных дырах.

Мы закончим эту главу кратким обсуждением заряженных черных дыр. Мы уже говорили о формуле «черные дыры не имеют волос»; другими словами, они не оставляют в структуре пространства-времени никаких сведений о том, что в них упало. Можно сказать, у них плохая память: они могут вспомнить только общую массу и момент импульса тел, которые они проглотили. Но что, если мы бросим в черную дыру электрон? И если черная дыра о нем тоже забудет, что произойдет с его электрическим зарядом? Разве его исчезновение не было бы нарушением закона сохранения заряда, священного правила физики частиц? Конечно, было бы. Но, к счастью, у черных дыр могут быть добавочные «волосы» для сил дальнего действия, с которыми связано сохранение заряда. Эти силы описываются теорией электромагнетизма. Решения уравнений электромагнетизма, найденных Максвеллом, в сочетании с уравнениями поля Эйнштейна, описывающими вращающиеся и заряженные черные дыры, дают так называемую метрику Ньюмена, однозначно определяемую

массой, спином и электрическим зарядом. Вообще-то, решение, описывающее *невращающуюся* заряженную черную дыру, было получено много лет назад: такой объект в честь его первооткрывателей называется черной дырой Рейснера – Нордстрёма. Это решение удалось получить намного раньше по той причине, что, как и в решении Шварцшильда, неврещающееся пространство-время черной дыры Рейснера – Нордстрёма сферически симметрично, и поэтому уравнения поля в математическом отношении значительно проще. Интересно, что заряд, даже и сам по себе, сообщает внутренней структуре черных дыр свойства, подобные тем, которые обусловлены наличием момента импульса. В черных дырах Рейснера – Нордстрёма есть и внутренний горизонт, и «голубые сингулярности», и множественные связанные Вселенные. Однако в отсутствие вращения кольцевые сингулярности сжимаются в точку, и поэтому в пространстве-времени Рейснера–Нордстрёма нет областей отрицательной массы с замкнутыми времениподобными кривыми в них.

Другое сходство между вращающейся и заряженной черными дырами состоит в том, что электрическое поле заряженной черной дыры порождает направленное вовне эффективное давление, подобное центробежной силе в решении Керра. Это давление связано с существованием в решении Рейснера – Нордстрёма внутреннего горизонта. Поэтому существует максимальная величина заряда, при которой черная дыра становится экстремальной и выше которой горизонт событий перестает существовать, открывая «голую сингулярность». Как и в случае вращения, сделать заряд черной дыры слишком большим очень трудно или вообще невозможно: чтобы добиться этого, потребовалось бы добавлять в черную дыру все больше и больше одинаковых зарядов. Но одноименные заряды отталкиваются, и это отталкивание в конце концов стало бы столь сильным, что добавить еще хоть один заряд стало бы невозможно. Считается, что в нашей Вселенной все черные дыры очень близки к электрически нейтральным: если бы они каким-то образом приобрели большой заряд, они быстро притянули бы к себе из межзвездного пространства противоположно заряженные ионы или электроны и снова нейтрализовались.

Глава 5

Черные дыры во вселенной

В 1960-е и 1970-е годы, прозванные Золотым веком общей теории относительности, в понимании черных дыр произошла настоящая революция. Современное теоретическое представление о черных дырах, описанное в предыдущих главах, было в целом построено именно тогда благодаря математическим достижениям и глубоким прозрениям многих исследователей, среди которых были Джон Уилер, Кип Торн, Вернер Израэль, Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг. В то же самое время астрономы все глубже и дальше вглядывались во Вселенную, используя все более чувствительные оптические и радиотелескопы. Впервые появилось представление о том, как выглядит небо в рентгеновских лучах. Были открыты два новых и в то время казавшихся совершенно загадочными класса астрономических объектов: квазары и рентгеновские двойные системы. Именно там, как мы сейчас думаем, и находятся черные дыры.

Рентгеновская двойная – это звездная система, состоящая из обычной звезды и расположенного очень близко к ней второго, невидимого компаньона, как полагают, белого карлика, нейтронной звезды или черной дыры. Оба компаньона обращаются вокруг общего центра масс. Считается, что вещество переносится с наблюдаемой звезды на поверхность невидимого компаньона, что и объясняет интенсивное испускание этими системами рентгеновских фотонов.

Но если мы не видим второго объекта, откуда мы знаем, что он там есть? Ответ на этот вопрос дает вызванное орбитальным движением доплеровское смещение длины волны фотонов, рождающихся в атмосфере наблюдаемой звезды. Атомы и молекулы поглощают и излучают фотоны только на определенных длинах волн. Так образуются спектральные линии; каждый атом или молекула отличаются уникальным набором таких линий, при помощи которого присутствие этих атомов можно распознать. Например, натриевые уличные фонари светят ярко-желтым светом, потому что в их излучении преобладают две спектральные линии натрия с длиной волны 589,0 и 589,6 нанометра. Когда астрономы получают спектры звезд, они видят в этих спектрах множество линий поглощения и излучения, порожденных атомами и молекулами в атмосферах этих звезд. Если звезда входит в двойную систему, линии будут периодически демонстрировать

попеременно то красное, то голубое смещение, причиной которого является орбитальное движение звезды относительно общего со второй звездой центра масс. Попеременное смещение линий – то же самое явление, которое мы обсуждали в связи с эллипсо-вихревой орбитой в главе 3.

Итак, теперь мы знаем, что рентгеновские двойные – это действительно двойные, хоть мы и видим в них лишь одну звезду. Но откуда нам известно, что в некоторых случаях, таких, например, как Cyg X-1 (яркая рентгеновская двойная в созвездии Лебедь), компаньоном оптической звезды является черная дыра? Что, если, скажет скептик, это просто обычная звезда, но слишком тусклая и потому невидимая с Земли? Ответ на это скептическое замечание оказывается очень простым: для тусклой звезды невидимый компаньон имеет слишком большую массу. Чтобы обосновать этот ответ, нам понадобится привлечь и связать друг с другом некоторые другие наблюдения, законы орбитального движения Кеплера и теорию звездной эволюции. Начнем с наблюдений. Из доплеровских смещений спектральных линий мы можем вывести не только сам факт двойственности звезды, но и подробные свойства ее орбиты. Период колебаний спектральных линий в точности воспроизводит орбитальный период двойной системы. Точные измерения доплеровских смещений в течение одного периода позволяют вычислить эллиптичность орбиты. Амплитуда сдвигов линий дает нижний предел максимальной скорости звезды. (Он будет равен истинной максимальной скорости только в том случае, если мы видим орбиту «с ребра», но наклонение орбиты может быть определено только в очень редких случаях.) Соединяя все эти наблюдательные данные с кеплеровскими законами движения по орбите, мы можем оценить нижний предел суммарной массы обоих компаньонов двойной системы. И если мы сумеем определить массу видимой звезды, то сможем вычислить и массу ее невидимого компаньона. Тут нам на помощь приходит теория эволюции звезд. Она говорит, что если мы знаем температуру поверхности и светимость звезды (и то и другое можно определить непосредственно из наблюдений), то наши представления о звездной эволюции позволяют довольно точно оценить ее массу.

Жизнь звезды определяется противодействующими друг другу силами: направленной к ее центру силой тяготения и направленной вовне силой давления раскаленного газа. Это, вообще-то, верно и для холодных планет, в том числе и для нашей Земли, но в отличие от планет звезды слишком массивны для того, чтобы давление, создаваемое холодным веществом, уравновесило тяготение, по крайней мере на ранних стадиях их жизни^[10]. Зарождающаяся звезда представляет собой коллапсирующее

(сжимающееся) облако газа, по преимуществу водорода. В процессе сжатия облака давление и температура в его ядре растут до тех пор, пока не начинается термоядерное горение: слияние атомов водорода. При этом выделяется колоссальное количество энергии в форме фотонов и нейтрино, которое продолжает разогревать ядро, и, наконец, тепловое давление становится достаточным для того, чтобы остановить сжатие. Вот в этот момент и рождается звезда. Со стороны это выглядит как достижение звездой состояния равновесия, но химический состав ядра непрерывно меняется по мере того, как водород в нем в процессе горения превращается в гелий. Что происходит в ядре звезды, когда запасы водорода в нем истощаются, зависит от массы звезды. Здесь мы не хотим слишком углубляться в разбор различных возможностей звездной эволюции. Скажем только, что самые массивные звезды (с массой от десяти до ста масс Солнца) проходят через множество фаз равновесия, разделенных моментами сжатия, в процессе которого в ядре каждый раз происходит рост температуры и давления, вследствие чего опять начинаются новые реакции термоядерного синтеза. Это длится до тех пор, пока не образуется ядро, состоящее в основном из атомов железа.

Прежде чем обсуждать, что происходит на завершающих стадиях жизни звезд, мы вернемся к вопросу о том, как знание температуры поверхности и светимости звезды помогает нам определить ее массу. Пожалуй, проще подойти к этому вопросу с другой стороны: если мы знаем массу и химический состав звезды, мы можем вычислить температуру ее поверхности и светимость при помощи уравнений строения звезд. Здесь есть множество технических подробностей, но основные принципы следующие. Чтобы уравновесить силу тяжести, более массивной звезде требуется большее тепловое давление. Поэтому в ее недрах идет более интенсивное термоядерное горение, испускается больше фотонов, и звезда становится ярче. Самая высокая температура достигается в центре звезды, по мере удаления от центра она снижается, а на поверхности становится минимальной. Конкретное значение температуры поверхности звезды зависит от ее строения, но по крайней мере в начальной фазе водородного горения, которую астрономы называют фазой *главной последовательности*, у более массивных звезд наблюдается и более высокая температура поверхности. А она, в свою очередь, определяет видимый цвет звезды. Таким образом, на основе наблюдений цвета и яркости звезд астрономы могут выполнить обратные вычисления и оценить их массу и химический состав.

Так удалось установить, что в системе CygX-1 находится звезда с

температурой поверхности 30 000 кельвинов и массой 20 солнечных масс. При такой высокой температуре эта звезда выглядит голубой (хотя заметить это довольно трудно – она настолько далеко от Земли, что увидеть ее можно только в хороший бинокль или в телескоп). По размеру она по крайней мере вдесятеро больше Солнца и классифицируется как голубой сверхгигант.

По этим данным и по наблюдаемым доплеровским сдвигам спектральных линий астрономы смоделировали орбиту двойной и вычислили из этой модели массу невидимого компаньона: она оказалась равной примерно 15 массам Солнца. Почему же это непременно должна быть черная дыра? Ответ снова дает теория строения звезд. Как мы уже объясняли, за время своей эволюции массивная звезда проходит различные стадии выгорания своего ядерного топлива, и выделяемая при этом энергия обеспечивает давление, необходимое для уравнивания силы тяжести. Термоядерные реакции идут до тех пор, пока в недрах звезды не образуется ядро из атомов группы железа. Такие ядра наиболее устойчивы; любые дальнейшие процессы ядерного синтеза или распада требуют поступления энергии.^[11] На рассматриваемой стадии атомы в ядре звезды полностью ионизованы: все электроны сорваны с орбит и свободно «плавают», образуя специфическое состояние вещества: *ферми-газ*, или *вырожденный газ*. Одним из свойств этого вырожденного состояния является то, что даже при нулевой температуре оно может оказывать существенное давление. Для маломассивных звезд типа Солнца давления вырожденного электронного газа достаточно, чтобы поддерживать равновесие ядра, когда прекращается термоядерный синтез (заметим, что у маломассивных звезд это происходит еще до образования в их ядре железа). Такие звезды заканчивают жизнь, превращаясь в белые карлики.

Последние стадии эволюции массивных звезд происходят более бурно. Как только масса железного ядра становится больше так называемого *предела Чандрасекара*, составляющего примерно 1,4 массы Солнца, давление вырожденного электронного газа становится недостаточным для поддержания равновесия ядра звезды, и оно коллапсирует – обрушивается к центру. Температура и плотность растут с огромной скоростью, и высокоэнергетические фотоны начинают разрушать атомы железа. В этой крайне плотной среде свободные электроны и протоны быстро объединяются, образуя нейтроны, – формируется нейтронный газ. Нейтроны являются фермионами, а значит, они тоже создают давление вырожденного газа, и оно оказывается гораздо выше, чем у газа из вырожденных электронов, – таким высоким, что оно способно остановить

коллапс ядра. Происходит это довольно быстро и бурно, в результате чего сквозь всю толщу звезды наружу распространяется мощная ударная волна. Многие подробности всё еще остаются неясными, но в целом астрономы уверены, что именно так начинается то, что в конце концов наблюдается как взрыв сверхновой II типа. В ходе него внешние слои звезды выбрасываются в пространство, но некоторая часть вещества падает обратно на ядро, которое теперь можно назвать прото-нейтронной звездой.

Подобно тому как для массы звездных ядер, равновесие которых поддерживается давлением электронного вырожденного газа, существует предел Чандрасекара, аналогичная предельная масса может быть вычислена и для нейтронного вырожденного газа: ее иногда называют пределом *Толмена – Оппенгеймера – Волкова* (TOV). Физика ядерного вещества при критических плотностях, существующих в нейтронных звездах, еще не вполне понятна, и поэтому истинное значение предела TOV известно не вполне точно. Из наблюдений нейтронных звезд мы знаем, что оно составляет по крайней мере две массы Солнца. Теория при этом утверждает, что оно не может превышать примерно трех солнечных масс, если сделать разумное предположение о том, что звуковые волны в нейтронной звезде не могут распространяться быстрее скорости света. Если на ядро в результате аккреции свалится достаточно вещества, чтобы масса ядра превысила предел TOV, то прото-нейтронная звезда тоже сколлапсирует. При плотностях выше ядерной могут, конечно, существовать и еще не открытые фазовые состояния вещества, но если скорость звука и в этих состояниях меньше скорости света, то никакое ядро с массой выше трех солнечных не сможет оставаться в равновесии, и тогда общая теория относительности с неизбежностью предсказывает образование черной дыры.

Вернемся к CygX-1. Мы знаем, что масса компаньона около 15 солнечных. Существуют и гораздо более массивные видимые звезды (как раз видимая звезда в системе Cyg X-1 именно такая!), но так как компаньон невидимый, его равновесие не может поддерживаться за счет тепловыделения, как у обычных звезд. Однако 15 солнечных масс – это намного выше предела TOV. И мы поэтому заключаем, что компаньон не может быть ни обычной звездой, ни белым карликом, ни нейтронной звездой, ни вообще каким-либо звездообразным объектом, состоящим из обычного (барионного) вещества. Возможно, это «темная звезда», образовавшаяся из темного вещества? Это вещество должно состоять из гипотетических частиц, которые очень слабо взаимодействуют (или вообще не взаимодействуют) с обычным веществом. Поэтому мы и не можем

видеть ее: она слишком слабо взаимодействует с электромагнитным полем, чтобы быть способной порождать достаточно видимых фотонов. Гипотеза темного вещества возникла несколько десятилетий назад как попытка объяснить следующий наблюдательный парадокс: на масштабах размеров галактик и выше наблюдаемые звезды и галактики движутся так, как если бы на них действовали гравитационные силы гораздо большие, чем те, которые можно объяснить за счет всех известных форм окружающего их вещества: галактик, звезд, пыли, газа, света, нейтрино и т. д. Мы не имеем ни малейшего представления о том, чем обусловлена эта аномальная сила, но по крайней мере на сегодняшний день многие ученые уверены, что всё дело в присутствии некоторой формы темного вещества. Если основываться на этом допущении, то можно пойти дальше и предположить, что темное вещество может конденсироваться и образовывать темные компактные объекты, один из которых и мог бы быть невидимым компаньоном в двойной системе Cyg X-1. Однако сама по себе гипотеза темного вещества не противоречит возможности существования черных дыр (некоторые даже предполагали, что черные дыры *и есть* форма темного вещества). Чтобы показать, что «темная звезда» теоретически возможна и действительно может претендовать на роль невидимого компонента в системе Cyg X-1, придется принимать еще больше допущений, чем для черной дыры.

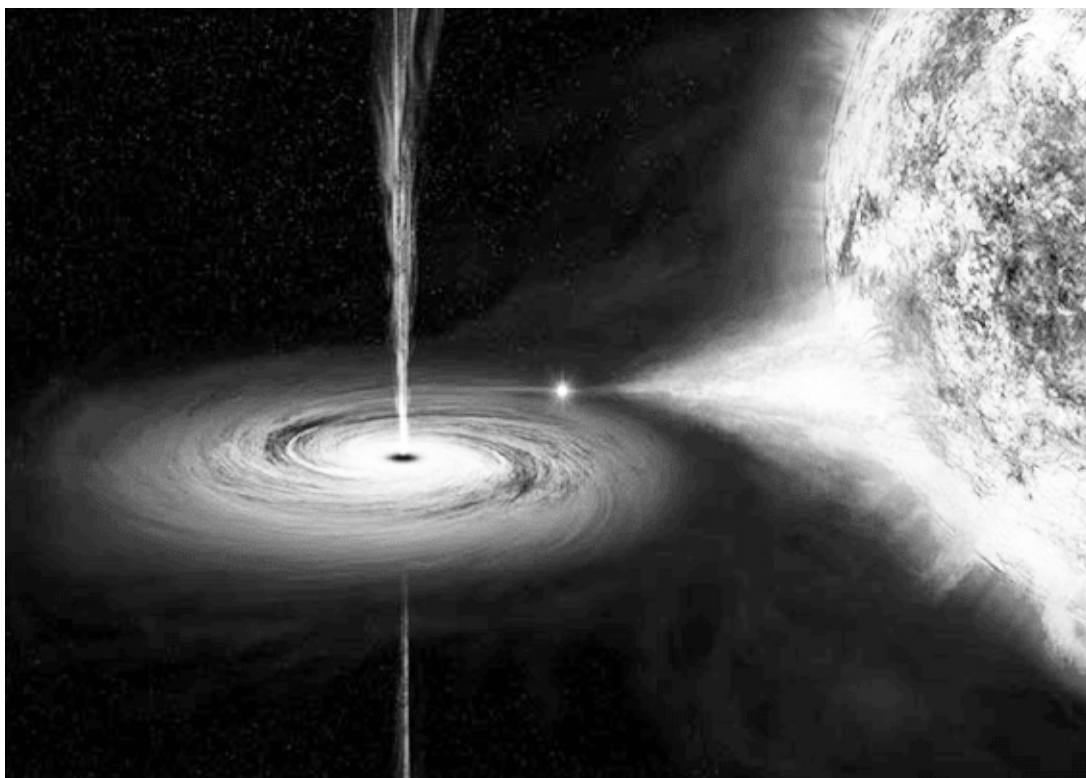


Рис. 5.1. Так могла бы выглядеть двойная система типа Cyg X-1, состоящая из звезды и черной дыры.

Звезда может иметь радиус в миллионы километров, в то время как черная дыра, притаившаяся в центре аккреционного диска, самое большое – несколько сотен. Поэтому внутренняя часть диска вокруг самой близкой из возможных устойчивых круговых орбит (где и возникает большая часть рентгеновского излучения) в масштабе этого рисунка показана быть не может. Из внутренних областей диска также может бить струя раскаленного вещества, энергию которого обеспечивает вращение черной дыры.

Есть еще одно, и, может быть, самое убедительное подтверждение предположения, что невидимый компаньон системы Cyg X-1 – черная дыра. Это яркое рентгеновское излучение из окрестностей системы. Хотя видимые звезды тоже излучают некоторое количество рентгеновских фотонов, их далеко не достаточно, чтобы объяснить наблюдаемую рентгеновскую светимость Cyg X-1. Если компаньон – черная дыра, то он расположен достаточно близко к звезде, чтобы захватывать большое количество газа и пыли, переносимых ее звездным ветром. Это вещество обращается вокруг черной дыры в виде толстого аморфного диска. Благодаря вязкости и магнитным эффектам, часть его постоянно мигрирует

в направлении черной дыры, пока не достигает самой внутренней устойчивой круговой орбиты (ISCO). Напомним, что в главе 3 уже говорилось, что это ближайшая к черной дыре орбита, на которой любая частица, движущаяся по геодезической, может обращаться вокруг черной дыры, не падая в нее. Для невращающейся шварцшильдовской черной дыры эта орбита находится на утроенном радиусе горизонта событий, но если черная дыра вращается, она может быть и ближе, а в случае вращающейся с максимальной скоростью кэрровской черной дыры эта орбита практически прилегает вплотную к горизонту событий. После достижения ISCO-орбиты газ быстро падает в черную дыру, которая, таким образом, постоянно подпитывается аккрецией вещества. Диск вокруг черной дыры называется аккреционным. В процессе продолжительной миграции на внутреннюю орбиту газ разогревается – источником энергии для этого служит гравитационная потенциальная энергия, высвобождающаяся по мере приближения газа к черной дыре^[12]. Чем ближе газ к черной дыре, тем больше он разогревается, а это означает, что излучаемые им фотоны имеют в среднем более высокие энергии. Самые высокоэнергетические фотоны, следовательно, приходят из окрестностей ISCO-орбиты. Размер этой орбиты связан с массой черной дыры, а это значит, что энергия фотонов, излученных аккреционным диском, несет информацию о размере черной дыры. Для черных дыр с массой в несколько солнечных масс, таких как та, что предположительно находится в системе Cyg X-1, эта энергия соответствует рентгеновскому диапазону. Более того, нерегулярный приток вещества в диск может обусловить изменения яркости рентгеновского потока, называемые *квазипериодическими осцилляциями*, и самая короткая шкала времени этих осцилляций соответствует орбитальному периоду частиц на ISCO-орбите. Для черных дыр звездной массы эта переменность имеет порядок величины в несколько сотен герц (что соответствует временной шкале в несколько миллисекунд), что и наблюдается в системе Cyg X-1 и многих других рентгеновских двойных системах, где, предположительно, тоже есть черные дыры.

Как ни прост ответ на вопрос, почему компаньон в системе Cyg X-1 является черной дырой (у него слишком большая масса, чтобы он мог ею не быть), этот ответ, как мы уже видели, опирается на длинную цепь теоретических аргументов. Некоторые из них довольно хорошо подтверждаются наблюдениями и экспериментами (звездная эволюция при плотностях ниже ядерных), другие выглядят несколько неопределенно (природа вещества при ядерных плотностях), а один аргумент в высшей степени правдоподобный, но полностью спекулятивный (что не существует

массивных, компактных «звезд» из темного вещества, излучающих в рентгеновском диапазоне). Поэтому более консервативным утверждением было бы то, что наблюдаемые свойства рентгеновских двойных больших масс наподобие Cyg X-1 хорошо описываются моделью с черной дырой и что никто пока не предложил альтернативного объяснения свойств таких систем в рамках общепринятых и хорошо проверенных теорий. И до 14 сентября 2015 года это был, пожалуй, самый хороший аргумент в пользу физической реальности черных дыр, какой только можно было придумать. Но в тот день все изменилось: установка LIGO зарегистрировала слияние двух черных дыр. Наука никогда не может дать стопроцентно однозначного толкования явлений такого рода, но наблюдение гравитационных волн от этого слияния с очевидностью лишает силы все негравитационные теоретические аргументы, которые могли бы использоваться для объяснения случая Cyg X-1 (или квазаров, о которых мы собираемся поговорить ниже), и может основываться только на свойствах общей теории относительности в вакууме. Мы более подробно расскажем об этих исторических наблюдениях, результатом которых стало ни больше ни меньше как рождение новой ветви астрономии, в главе 6.

Во Вселенной есть и другая популяция черных дыр, свидетельства существования которой постепенно накапливались с конца 1960-х. Это черные дыры, вначале ассоциировавшиеся с квазарами. Слово «квазар» появилось незадолго до этого. Оно происходит от термина «квазизвездный объект», что в то время просто значило: «мы не знаем, что это такое, – какая-то очень яркая штуковина, похожая на звезду». Сейчас мы считаем, что квазар – это разновидность *активного галактического ядра* (active galactic nucleus, AGN): небольшой области в центре галактики вокруг огромной черной дыры. Эта область заполнена веществом, которое испускает мощные потоки излучения, вливаясь по спирали в черную дыру. Квазары очень яркие и очень далекие: до них многие миллиарды световых лет. Чтобы представить себе, насколько это далеко, подумайте просто о том, что поперечник нашей Галактики около ста тысяч световых лет, а один световой год – это чуть меньше десяти триллионов километров. Квазар гораздо ярче целой галактики, содержащей миллиарды звезд. Считается, что черные дыры в центрах квазаров имеют массу от нескольких миллионов до нескольких миллиардов масс Солнца, поэтому их называют *сверхмассивными*. Таким образом, можно сказать, что квазары – явление гораздо более грандиозное, чем даже первое зарегистрированное приемником LIGO слияние черных дыр, в результате которого черные дыры с общей массой всего около 65 солнечных выплеснули в ходе своего

столкновения энергию, эквивалентную всего-навсего трем солнечным массам. Правда, эта энергия выделилась всего за несколько десятых долей секунды. Вообразите, что могло бы случиться, если бы слились две сверхмассивных черных дыры!

Как и тогда, когда мы говорили о рентгеновских двойных, мы должны проявить осторожность, думая о том, насколько уверенно мы можем утверждать, что ядра квазаров являются черными дырами. Это утверждение восходит к 1969 году, когда британский астрофизик Дональд Линден-Белл понял, что единственный способ объяснить фантастическую светимость AGN – это предположить, что источником их энергии являются черные дыры. Правда, он употреблял забавное выражение «горловина Шварцшильда» вместо термина «черная дыра», предложенного за несколько лет до того Джоном Уилером. Идея Линден-Белла для объяснения излучения квазара была все той же, что и для рентгеновской эмиссии источника Cyg X-1: аккреционный диск.

Отличие AGN состоит в том, что черные дыры в них гораздо больше, чем в двойных системах, поэтому пик светимости аккреционных дисков достигается на соответственно более длинных волнах. В результате AGN имеют наибольшую яркость в радио и оптическом диапазонах спектра. Большой размер объясняет также и наблюдаемую переменность излучения квазаров на шкале времени от минут до часов: она имеет ту же природу, что и миллисекундные квазипериодические осцилляции, наблюдаемые у Cyg X-1, а более длинные периоды связаны с тем, что у сверхмассивных черных дыр гораздо большие радиусы ISCO-орбит. Аккреционные диски вокруг сверхмассивных черных дыр состоят из газа и пыли, поступающих из окружающего их внутrigалактического пространства, а иногда и из случайных звезд, неосторожно подошедших слишком близко к черной дыре и разорванных на части мощными приливными силами вблизи ее горизонта. В целом количество вещества, поглощаемого черной дырой из ее аккреционного диска, может достигать десятков или даже сотен солнечных масс в год. Именно аккреционные диски, а не сами черные дыры испускают свет. Они – маяки ранней Вселенной: ведь свет, который доходит к нам от них, был испущен миллиарды лет назад.

На первый взгляд может показаться удивительным, что какой-то аккреционный диск может давать достаточно энергии для того, чтобы квазар мог затмевать своим сиянием все остальные звезды галактики, вместе взятые.

Источник этой энергии – гравитационная потенциальная энергия вещества, обращающегося по орбите вокруг черной дыры. Это та самая

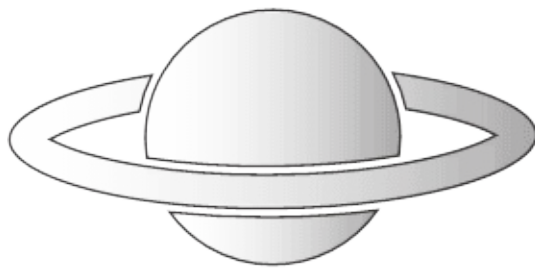
потенциальная энергия, с которой мы каждый день сталкиваемся на Земле. Например, именно ее преобразуют в электрический ток гидроэлектростанции. Вода, падающая с большой высоты, отдает свою гравитационную потенциальную энергию, которую электростанции преобразуют в то самое электричество, что заставляет светить наши настольные лампы. В квазарах происходит нечто похожее, только энергия, которую они производят, в миллион триллионов триллионов раз больше той, которую вырабатывает крупная гидроэлектростанция. Когда мы говорим о черных дырах, количество потенциальной энергии, которая может превращаться в другие формы энергии при падении вещества с большого расстояния на ISCO-орбиту, удобно характеризовать как долю потенциальной энергии от общей энергии, соответствующей массе покоя ($E = mc^2$) этого вещества. Эта величина зависит от вращения черной дыры, так как от него зависит положение ISCO-орбиты. Для невращающейся черной дыры она составляет 6 %, возрастая до 42 % для максимально быстро вращающейся^[13]. Это огромный процент! Ведь, например, потенциальная энергия воды, падающей с высоты 100 метров, составляет триллионную долю процента от ее общей энергии, соответствующей массе покоя^[14]. Наиболее эффективный доступный нам сегодня источник энергии – энергия распада ядер урана в ядерных реакторах. Если полностью использовать все урановое топливо в реакторе, эквивалент выделившейся энергии составит менее 0,1 % массы покоя урана. И все же энергия, выделяемая аккреционным диском, составляет лишь небольшую долю теоретически возможной для черной дыры. Считается, что большинство AGN «работают» с эффективностью, близкой к максимально возможной, но все-таки не равной ей. Главная причина этого вот в чем: когда газ нагревается и начинает излучать гигантскую энергию, тепловое давление в нем становится достаточно большим, чтобы противодействовать центроостремительному потоку газа. В результате часть его выбрасывается наружу, образуя подобие звездного ветра.

Когда концепция черных дыр окрепла и астрономы начали соглашаться с тем, что эти объекты могут объяснить природу квазаров, возник естественный вопрос: не могут ли сверхмассивные черные дыры находиться в центрах и тех галактик, которые не имеют активного ядра? Первым такую возможность предположил Линден-Белл в своей статье 1969 года. Такие черные дыры можно было бы назвать «спящими» в том смысле, что вокруг них нет большого количества газа для формирования мощного аккреционного диска, и поэтому они не могут быть такими же яркими, как

AGN. В близлежащих галактиках можно измерить доплеровские смещения линий в спектрах звезд, расположенных близ ядер этих галактик. Полученные из этих измерений данные о динамике орбитального движения звезд показывают, что в центральных областях практически всех крупных галактик действительно есть сверхмассивные черные дыры. Это, конечно, верно и для нашего Млечного Пути, центр которого находится достаточно близко к нам, чтобы в его окрестности можно было измерить движение звезд. Из этих измерений получается, что черная дыра в центре нашей Галактики имеет массу примерно в четыре миллиона масс Солнца. На шкале масс сверхмассивных черных дыр это значение ближе к ее нижнему концу, но все же согласуется с размером Млечного Пути (в бóльших галактиках обычно находятся и бóльшие черные дыры). Положение этой черной дыры совпадает с ярким радиоисточником Стрелец A* (или Sgr A*) в созвездии Стрельца. По-видимому, излучение источника Sgr A* порождается аккреционным диском вокруг черной дыры, но по сравнению с обычным AGN Sgr A* выглядит тусклым – наша черная дыра «спит».

В отличие от механизма происхождения черных дыр звездных масс, механизм образования сверхмассивных черных дыр пока неясен – на этот счет не существует общепринятой теории. Одна из возможностей заключается в том, что они зародились в результате коллапса первого поколения массивных звезд, образовавшихся спустя несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва (который произошел почти 14 миллиардов лет назад). Первоначальная масса этих черных дыр, должно быть, достигала от десяти до ста солнечных. Но после того как они оказывались в центрах новообразованных галактик, они должны были расти за счет аккреции газа и слияний с другими черными дырами. Трудность этой гипотезы вот в чем: как объяснить наблюдения некоторых очень далеких квазаров, свет от которых, регистрируемый нами сейчас, был излучен всего примерно через миллиард лет после Большого взрыва? Из этих наблюдений следует, что в эту эпоху сверхмассивные черные дыры уже существовали, и значит, гипотеза аккреции/слияния каким-то образом должна объяснить, как они успели вырасти до таких размеров за столь космологически короткое время: каких-то несколько сотен миллионов лет. Другая гипотеза предполагает, что зародыши современных сверхмассивных черных дыр появились во Вселенной в гораздо более раннюю эпоху (или даже и вовсе в ходе того, что мы называем Большим взрывом, а может, и еще раньше). Этот гипотетический класс черных дыр называется первичными черными дырами. В настоящее время нет ни убедительных теоретических механизмов их образования, ни наблюдательных

подтверждений их существования.



диск вокруг сферического
объекта в рамках
ньютоновской теории
тяготения (например,
кольца Сатурна)

вокруг черной дыры (например, «Гаргантюа»)

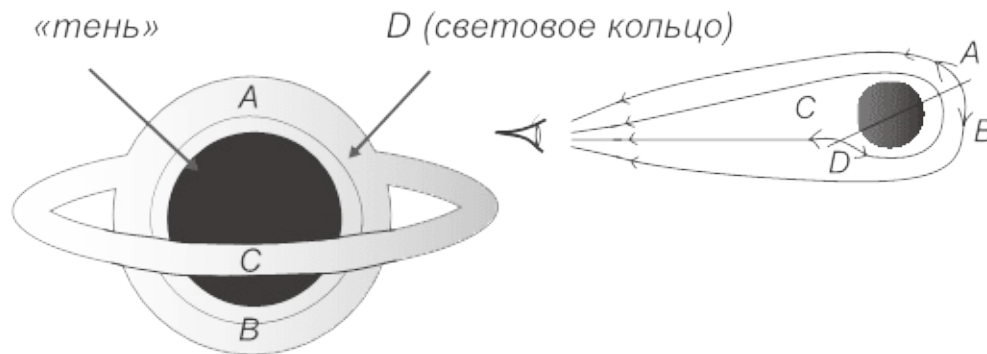


Рис. 5.2. «Тень» черной дыры. В теории тяготения Ньютона (вверху) лучи света, выходящего из диска вокруг массивного объекта, не искривляются. В этом случае мы видим неискаженное изображение доступной взгляду части диска. Вокруг черной дыры (внизу) кривизна пространства-времени настолько велика, что лучи света сильно искривляются – настолько, что мы видим все части диска, включая те, что находятся за черной дырой. Траектории нескольких из этих световых лучей показаны внизу справа, что позволяет построить изображение, приведенное внизу слева.

Мы закончим эту главу кратким упоминанием одного увлекательного астрономического проекта. Он называется «Телескоп горизонта событий», и в его рамках сделана попытка получить изображения так называемой тени сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики. Кроме того, с ним планируются наблюдения черного монстра массой более чем в миллиард Солнц в галактике М87, которая расположена относительно близко к нам: на расстоянии всего немногим более 50 миллионов световых лет. Эти две черные дыры выбраны для наблюдений потому, что из всех известных черных дыр их шварцшильдовские радиусы имеют самые

большие угловые размеры на небе. Для черной дыры в Sgr A* это объясняется тем, что она находится очень близко к нам (относительно, конечно), а для дыры в M87 – тем, что она такая огромная. Телескоп горизонта событий представляет собой группу больших радиотелескопов, разбросанных по всему земному шару и работающих как единый инструмент. Это позволяет реализовать что-то вроде измерения параллакса: одновременно регистрируя на разных телескопах радиоволны от одного и того же источника в рамках метода, называемого интерферометрией, можно достичь такого углового разрешения, какое было бы у телескопа размером с весь земной шар. Поэтому такие интерферометры способны разглядеть у космических объектов крайне мелкие детали, что и необходимо, если мы хотим увидеть окрестности горизонта черной дыры! Например, угловые размеры горизонта событий источника Sgr A* составляют всего 6 наноградусов. Пытаться рассмотреть такие детали – все равно что различить в телескоп цифры на поверхности серебряного доллара, лежащего на поверхности Луны! Правда, интерферометрические методы не способны обеспечить составному телескопу ту же светособирающую силу, которую имел бы гипотетический телескоп размером с Землю (мы можем использовать только тот свет, который собрали все антенны наших индивидуальных телескопов, вместе взятые). Но для целей, которые мы преследуем, наблюдая Sgr A* и M87, именно разрешающая сила наиболее важна. Конечно, наши телескопы не смогут «увидеть» ни одной из самих черных дыр. Но зато они смогут зарегистрировать свет, выходящий из вихрящихся вокруг них аккреционных дисков. Этот свет (большая его часть) будет следовать геодезическим пространства-времени черной дыры. Но, как мы видели в главах 3 и 4, очень близко к горизонту сворачивание пространства-времени столь сильно, что траектории фотонов будут крайне искривлены, а некоторые из фотонов, прежде чем отправиться к нам, даже опишут несколько оборотов вокруг черной дыры, вблизи ее светового кольца. В результате аккреционный диск будет выглядеть довольно сильно искривленным. Внутренняя круговая часть его изображения, соответствующая области, в несколько раз превышающей размер радиуса Шварцшильда, будет казаться темнее (назовем это «тенью»), за исключением яркого ободка, отмечающего положение светового кольца. Если мы смотрим на аккреционный диск с ребра, ближняя к нам часть диска будет пересекать его «тень». Кроме того, над и под тенью мы, по сути, сможем увидеть часть диска *позади* черной дыры – снова оттого, что в процессе выхода наружу фотоны движутся по изогнутым траекториям.

Глава 6

Столкновения черных дыр

В главах 3–5 мы говорили о черных дырах, находящихся вдали друг от друга, другими словами, об изолированных черных дырах. Нам было важно понять, как звезды обращаются по орбитам вокруг сверхмассивных черных дыр и как вокруг черных дыр образуются аккреционные диски – эти вопросы были и остаются очень интересными, так как именно такие явления наилучшим образом доказывают само существование черных дыр. Во всяком случае, это *было* так – до тех самых пор, пока детектор LIGO не зарегистрировал гравитационные волны от столкновения двух черных дыр, которое произошло более миллиарда лет назад на расстоянии в примерно столько же световых лет^[15]. В этой главе мы расскажем о теории, объясняющей наблюдавшееся событие. Что такое гравитационные волны? Почему сталкиваются черные дыры и почему эти столкновения порождают гравитационные волны? Почему прошло целых сто лет с тех пор, как Эйнштейн опубликовал свою общую теорию относительности, до момента, когда ученые сумели впервые прямо их зарегистрировать?

Столкновения черных дыр – самые мощные явления, какие только возможны в рамках общей теории относительности. Ни в каких других событиях во Вселенной не выделяется столько энергии. Большой взрыв, с которого началась история Вселенной, конечно, был еще мощнее, но для того, чтобы описать начало времени как такового, требуется еще более всеобъемлющая теория, чем общая теория относительности. И физики еще только нащупывают правильный теоретический подход, в рамках которого можно было бы дать полное описание Большого взрыва. Столкновения черных дыр не требуют создания более общих теорий, чем уже существующие: судя по всему, вполне достаточно просто уравнений Эйнштейна, $G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}/c^4$. Более того, во многих случаях столкновений черных дыр мы, вероятно, можем не принимать во внимание тензор энергии-импульса $T_{\mu\nu}$, который обращается в нуль при отсутствии какого-либо вещества: полная энергия вещества вокруг черных дыр исчезающе мала по сравнению с энергией покоя самих черных дыр. Следовательно, чтобы описать столкновения черных дыр, нам надо всего лишь решить систему уравнений исключительно простого вида: $G_{\mu\nu} = 0$. На знаменитой

фотографии Эйнштейна он как раз записывает эквивалентную систему $R_{\mu\nu} = 0$, где $R_{\mu\nu}$ – так называемый тензор Риччи, тесно связанный с тензором Эйнштейна и по сути эквивалентный ему при отсутствии вещества. Правда, на фото (рис. 6.1) Эйнштейн пользуется индексами i и k , но это дело вкуса: он вполне мог бы написать и $R_{\mu\nu} = 0$.

Хоть мы уже и обсуждали эйнштейновские уравнения поля, но прежде чем приступить к подробному разбору столкновений черных дыр, стоит пересмотреть наши интуитивные представления о том, что эти уравнения описывают. Коротко можно сказать, что уравнения поля выражают в математической форме способ, которым вещество определяет искривление пространства-времени. Что уравнения поля позволяют пространству-времени делать, когда вещество отсутствует? Один из примеров разрешенных в этом случае состояний пространства-времени – это просто отсутствие какой-либо кривизны. Другими словами, совершенно плоское пространство-время является решением уравнений Эйнштейна в вакууме, но это решение не единственное. Действительно, есть и другой пример конфигурации пространства-времени, допускаемой уравнениями поля в вакууме: изолированная черная дыра. Как мы видели, внутри горизонта черной дыры могут существовать сингулярности или другие необычные особенности, которые можно было бы связать с ненулевым тензором энергии-импульса. Но снаружи горизонта вполне возможно полное отсутствие всякого вещества. У нас нет никаких обязательств по поводу внутренности черной дыры, так как оттуда до нас все равно не могут прийти никакие сигналы. Поэтому из соображений экономии проще всего считать, что изолированная черная дыра – это пример искривления пространства-времени даже и при отсутствии вещества. Пара черных дыр, обращающихся друг вокруг друга, дает нам еще один пример решения уравнений поля в вакууме. Такие черные дыры будут постепенно сближаться друг с другом по спирали и в конце концов сольются в быстро вращающуюся керровскую черную дыру. Именно такое событие и наблюдалось на установке LIGO 14 сентября 2015 года.

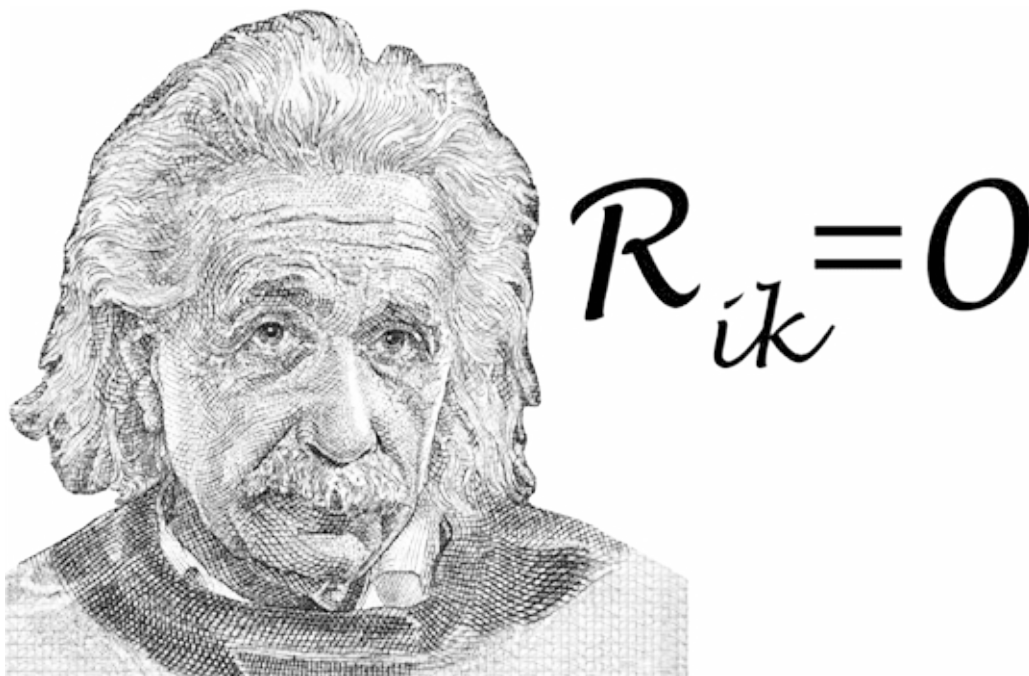


Рис. 6.1. Эйнштейн и уравнение поля в вакууме, полученное в рамках общей теории относительности. Это уравнение – частный случай уравнений Эйнштейна в отсутствие вещества.

Еще более важный класс решений уравнений поля в вакууме – гравитационно-волновые геометрии. Как мы уже объясняли в главе 1, гравитационные волны следует понимать в терминах, похожих на те, в каких Максвелл описывал свет. Вспомним, что свет – это распространяющаяся в пространстве волна электрического и магнитного полей, связанных между собой так, что пространственное изменение электрического поля влечет временное изменение магнитного и наоборот, в полном соответствии с максвелловскими уравнениями электромагнетизма.

Обычно мы представляем себе электрические поля возникающими от присутствия электрических зарядов, тогда как магнитные поля вызываются электрическими токами. Но в случае света электрическое и магнитное поля, однажды возникнув, продолжают распространяться вечно или, по крайней мере, до тех пор, пока не встретят на своем пути вещество, которое поглотит или рассеет световую волну. Гравитационная волна ведет себя точно так же: возмущение плоской метрики пространства-времени распространяется вечно, причем в соответствии с уравнениями поля в вакууме пространственноподобные изменения метрики вызывают времениподобные изменения.

Продолжим аналогию между гравитационной волной и светом

немного дальше. Электромагнитные волны порождаются ускоряющимися электрическими зарядами. Например, в радиомачте во время работы в проводниках возбуждаются высокочастотные переменные токи. Эти токи являются не чем иным, как электрическими зарядами, ускоряющимися то в одном, то в другом направлении. Они порождают электрические и магнитные поля, которые затем распространяются во все стороны, чтобы быть принятыми нашими радиоприемниками. Радиоволны по сути являются тем же светом, только с более длинными волнами, и добиться излучения видимого света также можно ускорением зарядов то в одном, то в противоположном направлении. Подобным же образом гравитационные волны порождаются ускоряющейся материей. Обычной формой ускорения в гравитационных системах является центростремительное ускорение на круговых орбитах. Пример, которым мы подытожили главу 2, заключался в том, что двойные звездные системы порождают гравитационное излучение из-за орбитального движения звезд друг вокруг друга. Убыль энергии, уносимой из системы этим излучением, приводит к тому, что орбиты звезд начинают постепенно сближаться по спирали, и это сближение можно зарегистрировать. Тогда, вероятно, вас не слишком удивит и то, что и черные дыры, сближаясь по спирали друг с другом, тоже должны продуцировать гравитационное излучение. Однако, с философской точки зрения, в высшей степени удивительно, что гравитационное излучение может выходить из системы, в которой нет ничего, кроме пустого пространства (под словом «пустое» мы подразумеваем, что оно является решением уравнений поля в вакууме). Этот парадокс заставляет нас вспомнить уже высказанную нами ранее мысль: тяготение само по себе притягивает!

Гравитационные волны, зарегистрированные установкой LIGO, кто-то сравнил со звуком; возможно, самую большую известность из всех высказываний руководителей группы LIGO приобрело то, в котором они назвали щебет и стук, которые они слышали, переведя гравитационные волны в звуки (а частота принятых гравитационных волн случайно совпала именно с характерной для звуковых волн частотой в пару сотен герц), «музыкой космоса». Эта аналогия остроумна и глубока, но здесь мы хотели бы подчеркнуть как раз отличие гравитационных волн от звуковых. Звук – распространяющаяся в воздухе волна сжатия. Это означает, что звук состоит из перемежающихся областей высокого и низкого давления, распространяющихся сквозь массу воздуха. Отдельные молекулы газов, из которых состоит воздух, находятся в состоянии постоянного хаотического теплового движения, но «поверх» этих сложных случайных движений

участие в звуковой волне заставляет эти молекулы в среднем то подаваться немного вперед к слушателю, когда они вступают в область высокого давления и оно толкает их вперед, то немного сдавать назад от слушателя, когда область низкого давления отсасывает их назад. Это пример продольной волны: здесь слово «продольный» отражает тот факт, что внутреннее движение молекул, составляющее волну, происходит в направлении «вперед-назад» вдоль одной и той же продольной оси, которая определяется направлением распространения волны звука. В отличие от этого, обычный пример поперечной волны – это волна на струне, натянутой горизонтально. Если ударить по одному из концов струны молоточком сверху вниз, можно будет увидеть, как это вертикальное колебание бежит по струне в горизонтальном направлении. Слово «поперечный» обозначает, что внутреннее, локальное движение струны, составляющее собственно волну (в описанном нами примере вертикальное) происходит перпендикулярно к направлению распространения волны (горизонтальному). Гравитационные волны (и световые тоже) – это волны поперечные. Интересно, что, как следует из вышесказанного, при взрыве, где все вещество ускоряется во внешнем направлении в форме идеальной сферической оболочки, никакого гравитационного излучения не возникает^[16]. Пытаться таким способом породить гравитационную волну было бы похоже на попытку создать вертикальное поперечное колебание натянутой струны, просто натягивая ее ту же, вместо того чтобы стучать по ней молоточком или щипком оттягивать вниз. Со звуком все совершенно иначе: при взрыве разлетающаяся во все стороны оболочка породила бы оглушительный грохот – именно потому, что при взрыве движение происходит в том же направлении вовне, в каком распространяется и сам звук.

Еще более существенное различие между звуком и гравитационной волной заключается в том, что звуку требуется среда, в которой он мог бы распространяться. Обычно это воздух, но звук может распространяться и в воде, и в твердом веществе. Но в вакууме звука не существует. А свет может распространяться в вакууме, и гравитационные волны тоже. По современным представлениям, средой для гравитационной волны является пространство-время, аналогично тому, как для звуковой волны средой является вещество. С этой точки зрения именно поперечный характер гравитационных волн, а вовсе не присутствие или отсутствие материальной среды как таковой, отличает их от звуковых.

Поперечность гравитационных волн принципиально определяет устройство для их регистрации, детектирования. Потому давайте

попробуем сосредоточиться и представить себе, как «выглядит» гравитационная волна. Для лучшей визуализации представим себе, что она распространяется в направлении детектора LIGO в Ливингстоне, штат Луизиана, вертикально сверху вниз. Гравитационная волна не представляет собой ничего, кроме возмущения пространственно-временной метрики, поэтому все, что она может делать, – это менять расстояния. Чтобы разобраться в том, как она это делает, представим себе, что на месте детектора LIGO мы установили трехмерную кубическую решетку измерительных устройств, снабженных синхронизированными часами, так что, обмениваясь световыми сигналами, эти устройства могут отслеживать временные изменения пространственных расстояний между ними. (Возможно, ученые, работающие на установке LIGO, делали бы именно это, если бы им позволял бюджет!) Когда гравитационные волны отсутствуют, конфигурация устройств остается неизменной. Что происходит, когда приходит волна? Прежде всего, надо осознать, что вертикальные расстояния вообще не изменятся: гравитационная волна поперечна, а наша волна распространяется вертикально вниз. Однако в горизонтальном направлении «север-юг» расстояния между устройствами сначала увеличатся до некоторого максимального удаления, а потом уменьшатся до минимального, и так будет происходить с каждым новым циклом проходящей волны. В направлении «восток-запад» будут наблюдаться такие же изменения расстояний, но в фазе, в точности противоположной изменениям расстояний в направлении «север-юг». Другими словами, гравитационная волна одновременно растягивает пространство в направлении «север-юг» и сжимает его в направлении «восток-запад», а потом наоборот.

Детектор LIGO в Ливингстоне гораздо проще нашей воображаемой кубической решетки измерительных устройств. Одно его плечо тянется на 4 километра, отклоняясь на несколько градусов к востоку от направления строго на юг по мере удаления от центрального узла установки, а другое – на 4 километра под прямым углом к первому, отклоняясь на несколько градусов на юг от направления строго на запад. Для наших целей точные направления плеч не имеют значения, поэтому в этом пояснении будем считать, что они идут точно на юг и на запад. Не будет слишком большой идеализацией сказать, что, в сущности, LIGO представляет собой три измерительных устройства такого же типа, как мы описали в предыдущем абзаце: одно в центральном узле и по одному на конце каждого плеча. И вся виртуозная лазерная интерферометрия, на основе которой работает установка LIGO, может в идеале быть представлена как обмен световыми

сигналами между устройствами с целью проследить, как будут меняться с течением времени расстояния между ними. В действительности LIGO фиксирует изменения со временем не абсолютных расстояний, а *разностей* расстояний вдоль двух плеч установки. Короче говоря, LIGO измеряет пространство-время в гораздо меньших подробностях, чем наша воображаемая кубическая батарея измерительных устройств, но все же этого вполне достаточно, чтобы зарегистрировать структуру сжатий и растяжений пространства, обусловленных гравитационной волной такого типа, какой мы описали в предыдущем абзаце.

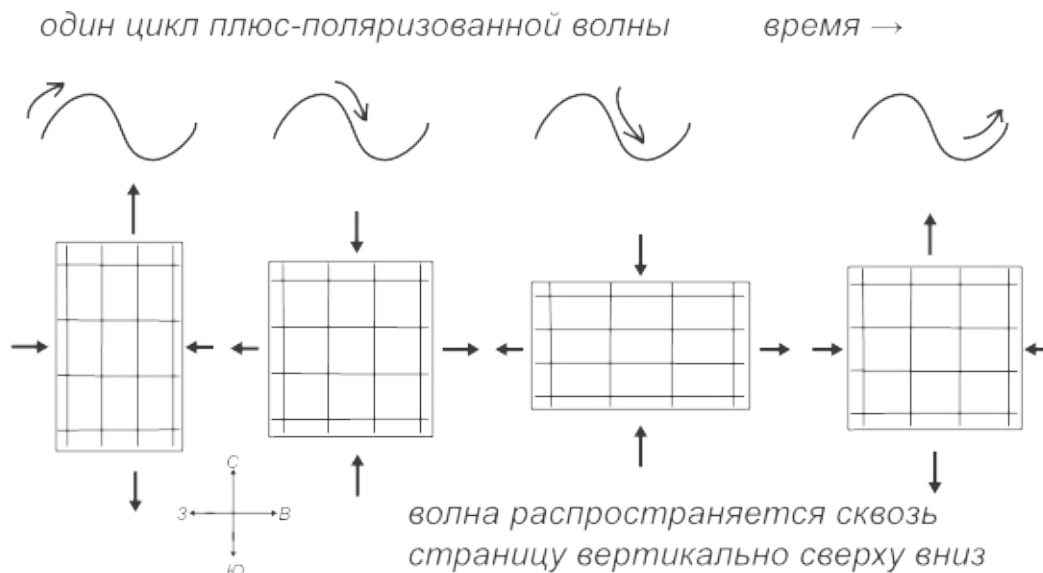


Рис. 6.2. Прохождение гравитационной волны через кубическую решетку. Во всех точках решетки можно представить себе детекторы, которые измеряют изменения расстояний между элементами решетки с течением времени.

Теперь предположим, что к нам приходит гравитационная волна, которая растягивает пространство-время по оси «северо-запад – юго-восток», одновременно сжимая его по оси «северо-восток – юго-запад». Понятно, что гравитационные волны такого типа должны быть столь же обычным явлением, как и волна, которую мы рассматривали до этого. Мы будем называть структуру сжатий и растяжений, ориентированную вдоль направлений «север-юг» и «восток-запад» *плюс-поляризованной* волной, а структуру, ориентированную вдоль осей «северо-запад – юго-восток» и «северо-восток – юго-запад» – *кросс-поляризованной*. Эти названия происходят просто от внешнего сходства этих структур с символами + и × соответственно. Иначе говоря, структура *плюс-поляризованной* волны – это

повернутая на 45° кросс-поляризованная волна.

А теперь внимание! Установка LIGO в Ливингстоне кросс-поляризованных гравитационных волн просто не видит! Это происходит оттого, что структура кросс-волны не меняет разностей расстояний вдоль плеч, ориентированных с севера на юг и с востока на запад. Когда кросс-волна попадает на детектор, меняется – увеличивается и уменьшается – только угол между плечами, причем на нерегистрируемо малую величину. Но, к счастью, большая часть гравитационного излучения не является ни чисто кросс-поляризованной, ни плюс-поляризованной, а представляет собой некоторую смесь этих ориентаций. Поэтому чувствительность установки LIGO в Ливингстоне только к одной из двух возможных ориентаций волны ничуть не является ограничением, как могло бы показаться. Вспомним, что мы решили рассматривать только гравитационные волны, приходящие в строго вертикальном направлении, – на деле, конечно, они могут приходить с любой стороны. Таким образом, чувствительность установки LIGO в Ливингстоне к гравитационным волнам фактически зависит и от их направления, и от «поляризации»; то же самое можно сказать о детекторе LIGO в Хэнфорде, штат Вашингтон. Эта ситуация не слишком отличается от той, что была характерна для старинных уголкового (V-образных) телевизионных антенн, которые иногда приходилось осторожно поворачивать и наклонять, чтобы поймать сигнал лучшего качества.

Итак, предмет измерений обоих детекторов LIGO очень простой: это разности расстояний вдоль двух плеч. Но эти измерения делаются с невероятной точностью. Например, когда LIGO достигнет планируемого окончательного уровня чувствительности (что ожидается примерно в 2018–2020 годах), он будет способен измерять изменения в расстоянии в 10^{-19} метров! Это одна десятитысячная часть диаметра протона! Такая фантастическая точность необходима, так как растяжение и сжатие пространства-времени гравитационными волнами чрезвычайно мало. Например, движение Меркурия по орбите вокруг Солнца тоже создает гравитационные волны, но LIGO не может их зарегистрировать не только потому, что они слишком слабые, но и потому, что их частота слишком низка, чтобы LIGO мог их почувствовать. До 14 сентября 2015 года не существовало измерительного устройства достаточно чувствительного, чтобы заметить вообще какие бы то ни было гравитационные волны. Путь к первой их регистрации был длинным и тернистым: множество ученых во всем мире десятилетиями пытались разработать все более и более чувствительные детекторы гравитационных волн. Сейчас, на заре эры

гравитационно-волновой астрономии, LIGO способен зарегистрировать только катаклизмические события, такие как слияние черных дыр. Но есть надежда, что когда чувствительность приемников гравитационных волн улучшится, мы сможем, наконец, принимать и более слабые сигналы, такие как гравитационные волны от столкновений нейтронных звезд. Таким образом, изучение гравитации демонстрирует нам одно из глубоких противоречий природы: с одной стороны, это единственная сила, способная преодолеть все другие и привести к образованию черных дыр, а с другой – она оказывается настолько слабой, что гравитационное «эхо», возбуждаемое даже столь грандиозными событиями, как столкновение нейтронных звезд, все еще остается недоступным для регистрации нашими самыми чувствительными измерительными приборами^[17].

Сделаем теперь небольшую паузу, чтобы подытожить все, что мы узнали к настоящему моменту о столкновениях черных дыр и об их регистрации. Суть проста: все, что мы делаем, – это исследуем решения уравнений Эйнштейна в вакууме $G_{\mu\nu} = 0$. Но, как мы сейчас объясним подробнее, беда в том, что на практике эти уравнения решить крайне трудно. Решения, которые нас интересуют, описывают сближение двух черных дыр по спирали, их слияние и сопутствующее этому процессу испускание гравитационного излучения. Это излучение распространяется через пространство-время и регистрируется установкой LIGO в виде пространственно-временной деформации: расстояния слегка сжимаются в одном направлении и растягиваются в другом, перпендикулярном первому, а затем растягиваются в первом направлении и сжимаются во втором. Что мы хотим к этому добавить? Мы хотим теперь дать более полное описание того, что происходит при столкновениях черных дыр и как это описание в рамках общей теории относительности преобразуется в практические методы, используемые в детекторе LIGO для поисков гравитационных волн.

Выражение «столкновение черных дыр» может вызвать в воображении вполне естественную картину: две черные дыры несутся друг к другу и сталкиваются лоб в лоб. В принципе, такое событие могло бы произойти, и даже сопровождалось бы сильным гравитационным излучением, но вероятность его, по-видимому, крайне мала. Дело в том, что черные дыры (к счастью для нас!) не так уж часто встречаются во Вселенной и их разделяет громадное в сравнении с их размерами пространство. Даже в густонаселенных областях, таких как шаровые скопления, в ядрах которых может содержаться по несколько сотен черных дыр и среднее расстояние

между ними должно составить всего лишь около светового месяца, такие столкновения могут случаться раз в миллиард лет, а то и реже. Повторим: крайне маловероятно, чтобы две черные дыры случайно оказались на встречных курсах и столкнулись лоб в лоб.

Гораздо более обычной является ситуация, когда в двойной звездной системе обе звезды достаточно массивны, чтобы в конце своей жизни коллапсировать в черные дыры. В результате из двойной звезды образуется двойная черная дыра. Это не значит, что в такой системе черные дыры сразу сольются друг с другом, но в конечном счете они обречены на это, потому что не обладают достаточной скоростью, чтобы преодолеть притяжение друг друга. Сначала они просто будут обращаться по своим орбитам друг вокруг друга, а точнее, вокруг общего центра масс. Для определенности примем, что рассматриваемые нами черные дыры похожи на те, сигнал от которых приняла установка LIGO 14 сентября 2015 года. Чтобы еще больше упростить наши рассуждения, будем считать, что каждая из этих черных дыр имеет массу в 32 солнечных, а начальное расстояние между ними равно 384 000 километров – среднему расстоянию от Земли до Луны. Предположим также, что ни одна из черных дыр не имеет заметного вращения, так что когда расстояние между ними велико, каждая из них хорошо описывается решением Шварцшильда. И пусть каждая из них обладает сферическим горизонтом событий радиусом 95 километров. Тогда медленное спиральное сближение их орбит в результате потерь энергии на гравитационное излучение займет около 210 лет и закончится в момент соприкосновения их горизонтов. Чем больше первоначальное расстояние между черными дырами, тем медленнее (и, значит, дольше) будет происходить сближение, причем это замедление пропорционально четвертой степени начального расстояния. Другими словами, если бы черные дыры из нашего примера первоначально находились вдвое дальше друг от друга, их спиральное сближение продолжалось бы в 16 раз дольше. Отсюда становится ясно, что спиральное сближение начинается медленно и становится быстрее и быстрее по мере приближения черных дыр друг к другу. Ранние стадии сближения черных дыр, зарегистрированных установкой LIGO, возможно, продолжались миллиарды лет! А конечная фаза, сигнал от которой и принял детектор LIGO, продолжалась, как мы вскоре увидим, всего несколько миллисекунд.

Частота гравитационных волн, излучаемых двойной черной дырой, которую мы здесь обсуждаем, равна удвоенной частоте орбитального вращения пары. Вначале эта частота очень низкая, но по мере того как черные дыры сближаются по спирали, она растет, так как, сближаясь,

черные дыры обращаются друг вокруг друга все быстрее и быстрее. На первый взгляд выглядит парадоксально, что потери энергии на гравитационное излучение не замедляют, а, наоборот, ускоряют движение черных дыр по орбите. Это происходит потому, что должен соблюдаться баланс потенциальной и кинетической энергии: когда черные дыры сближаются, их гравитационная потенциальная энергия падает настолько быстро, что они способны одновременно и увеличивать свою кинетическую энергию, и излучать гравитационные волны.

Постепенное увеличение частоты гравитационного излучения играет важную роль в методе, которым детектор LIGO ищет сталкивающиеся черные дыры. LIGO чувствителен к частотам гравитационных волн в диапазоне от 30 до 1000 герц; звуковые волны такой частоты попадают в диапазон человеческого слуха. Поэтому, безотносительно к нашему обсуждению поперечных и продольных волн, теперь понятно, почему исследователи, работающие на LIGO, говорят, что, принимая гравитационные волны, они «слушают голос Вселенной». «Голос» двойной системы черных дыр, которую мы обсуждаем, в начале их спирального сближения звучит на частоте 30 Герц (глубокий низкий контрабас) при расстоянии между объектами в 990 километров, всего за 290 миллисекунд до слияния. На этой стадии черные дыры носятся друг вокруг друга со скоростью 47 000 километров в секунду, немного более 15 % скорости света. Но частота быстро растет, и когда начинается слияние, она составляет примерно 190 Герц («соль» малой октавы, примерная частота обычного человеческого голоса). В этот момент черные дыры мчатся уже со скоростями около 86 000 километров в секунду, что составляет почти треть скорости света. Горизонты событий сливаются в единую структуру, напоминающую по форме вращающуюся арахисовую скорлупу.

Читателю может прийти в голову, что этот диапазон частот – от десятков до сотен герц – лишь немного ниже частот квазипериодических осцилляций, упоминавшихся в связи с источником Cyg X-1. Есть ли здесь связь? Конечно, есть! Вспомним, что диапазон частот в несколько сотен герц, соответствующий шкале времени в несколько миллисекунд, характеризовал самую короткую шкалу времени переменности рентгеновского излучения аккреционного диска в Cyg X-1, и объяснялось это тем, что эта шкала времени должна соответствовать орбитальному периоду частиц на ISCO-орбите черной дыры в системе Cyg X-1. Похожим образом немного более низкий диапазон частот, соответствующий несколько большему масштабу времени, характеризует бешеный вихрь вертящейся друг вокруг друга пары черных дыр массой в 32 Солнца на

пороге их слияния. Памятуя о «теореме об отсутствии волос», мы интуитивно представляем себе, чего следует ожидать, как только горизонты событий черных дыр сольются: черная дыра неправильной арахисовидной формы должна упорядочиться и превратиться в слегка сплюснутую сфероидальную керровскую черную дыру. Этот процесс называется «затуханием», но поначалу он идет довольно бурно. В ходе него излучаются гравитационные волны на многих частотах, но самые сильные из них имеют частоту 300 герц («ре» первой октавы). Волна затухания быстро идет на спад: каждые 8,6 миллисекунды амплитуда вибраций падает в 10 раз. Поэтому через 8,6 миллисекунды после слияния колебания вдесятеро слабее, чем при слиянии, через 17 миллисекунд – в 100 раз слабее, через 26 миллисекунд – в тысячу, и т. д. Выходит, что за долю секунды вибрации продукта слияния угасают, и он становится идеально спокойной керровской черной дырой.

Подведем краткий итог: гравитационные волны порождаются в ходе длительного и постепенного спирального сближения компонентов двойной черной дыры до момента, когда горизонты черных дыр сливаются и происходит затухание вибраций образовавшейся единой черной дыры до стационарного керровского решения. При этом самое мощное гравитационное излучение, намного превосходящее по интенсивности все предшествовавшее, испускается в интервале нескольких миллисекунд до и после момента слияния. Частота этого излучения лежит в звуковом диапазоне, меняясь от низкого «урчания» до финального звонкого «вскрика». Форма волнового фронта в целом соответствует тому, что мы называем «гравитационно-волновым чириканьем», и в области звуковых частот, в которой в основном и лежит зона чувствительности приемника LIGO, оно длится всего долю секунды. Столкновения черных дыр большего размера давали бы «чириканье» более низкого тона – при слиянии черных дыр с массой, значительно превосходящей 60 Солнц, оно было бы уже слишком низкочастотным, чтобы LIGO мог его услышать. И наоборот, при слиянии менее массивных черных дыр «чириканье» было бы более длительным и частоты его лежали бы в диапазоне чувствительности LIGO, а заканчивалось бы оно более пронзительным «взвизгом». Высота тона «чириканья» связана с общей массой сливающихся черных дыр, потому что оно исходит с уровня последних нескольких витков перед слиянием, а продолжительность нахождения на этих орбитах пропорциональна радиусу последнего горизонта, в свою очередь, пропорционального общей массе объектов.

Первое событие, которое зарегистрировала установка LIGO,

произошло более миллиарда лет назад. Это достаточно много для того, чтобы, благодаря расширению Вселенной, то есть эффекту, подобному доплеровскому красному смещению, профиль волны сместился в «красную» сторону почти на 10 %. Другими словами, к моменту, когда гравитационно-волновое «чириканье» достигло Земли, оно звучало так, как если бы «чирикали» черные дыры на 10 % более тяжелые, чем те, что слились на деле. Вы могли бы спросить: как же мы можем отличить десятипроцентное красное смещение «чириканья», возникшее благодаря огромному расстоянию до черных дыр, от понижения тона «чириканья», обусловленного тем, что черные дыры оказались бы на 10 % более массивными и настолько же более близкими к нам? Ответ в том, что амплитуда сигнала от расположенных ближе к нам черных дыр была бы гораздо больше. Амплитуда обратно пропорциональна расстоянию. Поэтому если из наших главных принципов (то есть решая эйнштейновские уравнения поля в вакууме) мы вычислили интенсивность и частоту «чириканья», издаваемого сливающимися черными дырами, то по интенсивности и частоте принимаемого «чириканья» мы можем судить и о расстоянии до места слияния, и об общей массе сливающихся объектов.

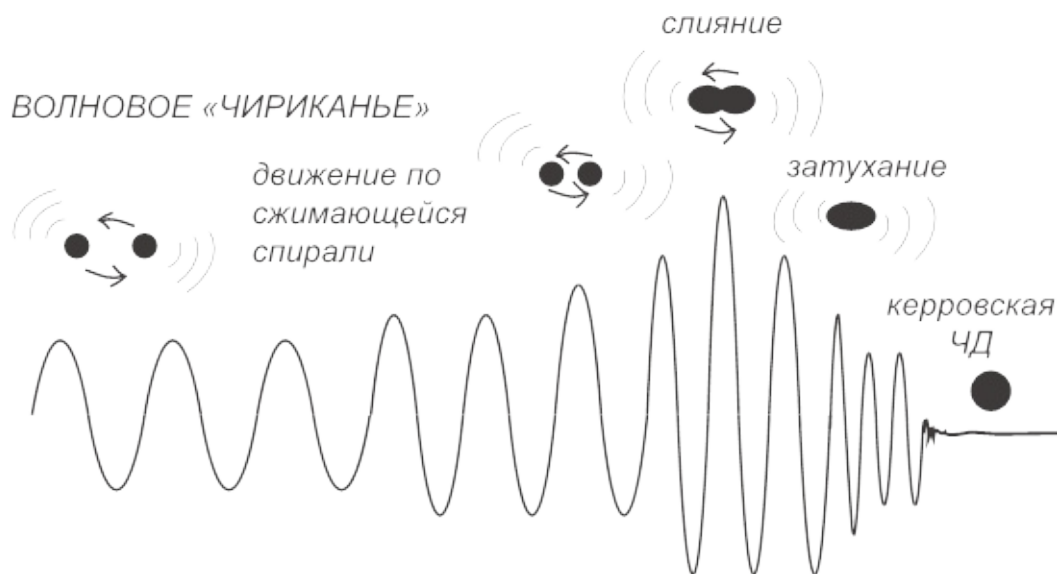


Рис. 6.3. Форма гравитационного волнового импульса («чириканья»), распространяющегося от двух сталкивающихся черных дыр.

Несмотря на гигантские потери энергии на гравитационное излучение, у конечного продукта слияния черных дыр остается еще внушительное количество энергии в форме быстрого вращения. Насколько быстро вращается образовавшаяся черная дыра, зависит еще и от того, как

вращались две исходных черных дыры. В нашем примере они изначально были невращающимися, и поэтому образовавшаяся новая керровская черная дыра имеет спин до 70 % от максимального, допускаемого общей теорией относительности. Ее масса равна 61 солнечной, так как гравитационные волны унесли в виде энергии эквивалент еще трех масс Солнца. Общая энергия при использовании формулы $E = mc^2$ сохраняется: мы начали с $32 + 32 = 64$ солнечных масс, а закончили 61 солнечной массой результирующего продукта слияния плюс три солнечных массы, унесенные гравитационным излучением. Таким образом, в гравитационное излучение переходит около 5 % общей массы двойной системы, причем подавляющая часть этой энергии излучается на нескольких последних орбитальных витках, в момент слияния и на стадии затухания. Сама по себе пятипроцентная доля выглядит не очень впечатляюще. Однако мощность (то есть скорость высвобождения этой энергии) оказывается почти непредставимой: этот эквивалент трех Солнц выделился в виде энергии в течение доли секунды, а пиковая светимость достигла 4×10^{49} ватт. Нелегко вообразить это число, поэтому давайте вспомним следующее: светимость Солнца составляет 4×10^{26} ватт, что примерно в 20 триллионов раз больше энергии, которую потребляет все человечество за секунду. В нашей Галактике около 100 миллиардов звезд, а в наблюдаемой Вселенной около 100 миллиардов галактик. Если в грубом приближении принять, что у каждой звезды светимость примерно равна солнечной, то общая светимость всех звезд Вселенной составляет примерно 10 000 миллиардов миллиардов Солнц. Так вот, эта мощность едва доходит до одной десятой энергии, выделяемой парой черных дыр в последние несколько миллисекунд их слияния! Таков масштаб катаклизма, необходимого для того, чтобы вызванную им «рябь» пространства-времени оказалось возможным измерить на Земле.

Но разве такая колоссальная энергия в точке своего выделения не сможет разорвать ткань пространства-времени в клочья? Возможно, стоит сформулировать этот вопрос не в таких легкомысленных выражениях; говоря серьезнее, не может ли возбуждение столь мощных вибраций в геометрии пространства и времени привести к образованию новых сингулярностей, «одетых» или «голых», помимо тех, что уже существуют в столкнувшихся черных дырах? Ответ на этот вопрос будет отрицательным: несмотря на всю свою мощь, гравитационные волны все равно недостаточно сильны, чтобы сделать это. Вот если бы была достигнута светимость в 4×10^{52} ватт — так называемая планковская светимость,

которую можно вычислить, получив из ньютоновской гравитационной постоянной и скорости света в величину с размерностью мощности, – тогда ответ мог бы быть и другим.

Насколько же в итоге велики вибрации пространства-времени, вызванные слиянием черных дыр? В непосредственной близости к двойной системе было бы очень трудно сказать, какой аспект изменений геометрии мог бы быть приписан действию гравитационной волны, а какой следовало бы просто ассоциировать с движением двух черных дыр. На расстояниях больших, чем примерно десятикратный радиус последней устойчивой орбиты, становится уже возможным ясно различить плюс- и кросс-поляризованные гравитационные волны, описанные выше, – и конечно, оба этих типа волн здесь присутствуют. Отойдем теперь на 5000 километров от точки слияния, что примерно в 50 раз больше радиуса последней орбиты. На этом расстоянии максимальное относительное растяжение-сжатие составит примерно 0,3 %. Представим себе, что Алиса, шести футов ростом, присутствует там и наблюдает за событием. От макушки до пят она будет растягиваться и сжиматься приблизительно на пятую часть дюйма – на полсантиметра, и это растяжение-сжатие легко будет измерить, хотя это вряд ли будет ей приятно. И это совсем не то, что происходит с установкой LIGO – здесь, на Земле, на расстоянии примерно в миллиард световых лет. Из-за огромного расстояния амплитуда растяжения-сжатия будет меньше, чем то, что произошло бы с Алисой, примерно в 2×10^{18} раз. Вот потому-то установка LIGO и была спроектирована так, чтобы иметь такую до смешного высокую чувствительность: быть в состоянии измерить изменение длины в одну десятитысячную размера протона на расстоянии в четыре километра.

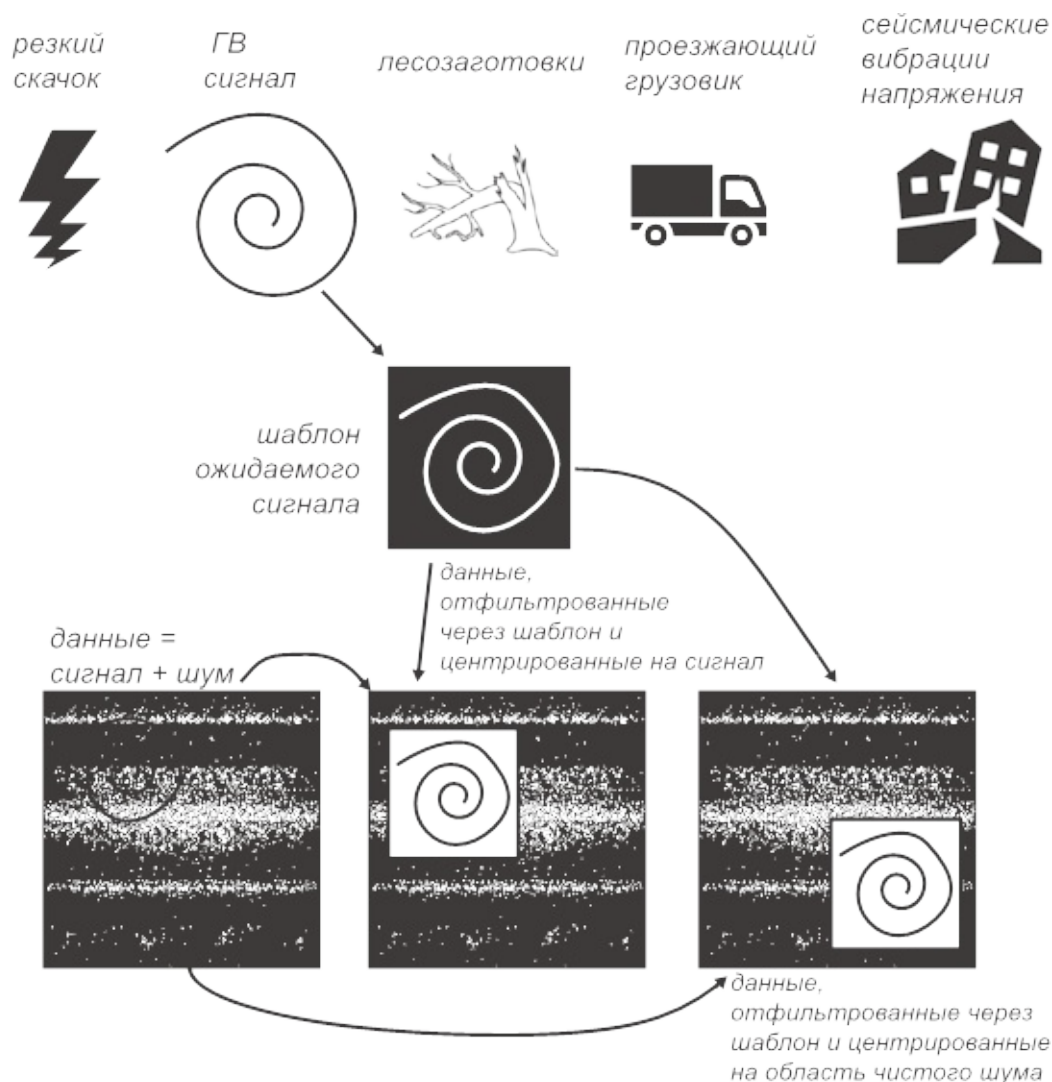


Рис. 6.4. Как шаблоны могут помочь выявить сигнал, утонувший в шумах.

Когда шаблон центрирован на сигнал, воспроизводится ясный и устойчивый рисунок шаблона, а когда он центрирован на шум, возникает картина, состоящая из беспорядочно разбросанных пятен. Аббревиатура ГВ означает «гравитационная волна».

Раз уж мы снова вспомнили о невероятной чувствительности LIGO, посвятим ей еще немного времени: в работе детекторов, подобных LIGO, есть одна не упоминавшаяся нами до сих пор важная особенность. Дело в том, что *шумы*, то есть все факторы, из-за которых расстояния вдоль измерительных плеч вибрируют и этим мешают различить вибрации гравитационных волн, в установке LIGO довольно велики. Только при очень редких, очень «громких» событиях, как раз таких, как столкновение

черных дыр, зарегистрированное 14 сентября 2015 года, сигнал бывает различим на фоне этого шума. Но LIGO может измерить и сигналы, находящиеся под уровнем шума: для этого разработаны хитроумные методы анализа данных на основе того, что называется «библиотеками шаблонов»: обширные коллекции теоретических форм сигнала для всевозможных видов гравитационных волн, которые могут прийти на LIGO. Можно сравнить такой шаблон с уникальным «отпечатком пальцев» события, в том числе и такого, как спиральное сближение двух невращающихся черных дыр с массой в 32 солнечных. Источники шума: дрожание почвы, вызванное проезжающим по окрестному шоссе грузовиком или лесозаготовками вблизи городка Ливингстон, где расположена установка LIGO, тоже обладают своими характерными «отпечатками пальцев», и их форма отличается от тех, что свойственна «чириканию» сливающихся черных дыр. Детектор LIGO постоянно бомбардируется шумом, и поэтому то, что он измеряет, представляет собой смесь всех этих шумовых «отпечатков пальцев», наложившихся друг на друга вместе с появляющимися то здесь, то там «отпечатками» гравитационных волн. Таким образом, шаблон действует как маска, пропускающая через себя «отпечаток пальцев» гравитационной волны, который этому шаблону в точности отвечает, и в то же время блокирующая не соответствующие ему «отпечатки» шумовых сигналов. Хотя с помощью этой методики и нельзя полностью избавиться от влияния шума, она очень помогает – во всяком случае, достаточно для того, чтобы детектор LIGO улавливал гравитационно-волновые события, происходящие на невообразимых расстояниях от Земли.

Чтобы установка LIGO полностью реализовала свой потенциал в качестве гравитационно-волновой обсерватории, когда она достигнет планируемого уровня чувствительности, придется (и сейчас уже приходится) преодолевать некоторые дополнительные трудности, связанные с методом шаблонов. Первая из них заключается просто в вычислении всех возможных шаблонов формы сигнала для столкновений черных дыр и других событий, способных быть источниками гравитационных волн: столкновений между черными дырами и нейтронными звездами, слияний двух нейтронных звезд, вспышек сверхновых. Гравитационные волны могут приходить от быстровращающихся нейтронных звезд с выпуклостями на поверхности^[18], из космического «океана» первичных гравитационных волн, порожденных на заре эволюции Вселенной, и, наконец, возникать при разрывах, перекручивании и пересечениях в сети космических струн,

которые, согласно гипотезам некоторых космологов, составляют основу Вселенной^[19]. Решать эйнштейновские уравнения поля во всех этих разнообразных ситуациях – задача не из легких, но делать это необходимо, чтобы построить требующиеся для работы LIGO шаблоны. Труднее всего в этом отношении иметь дело со столкновениями. Но после нескольких десятилетий совместных усилий десятков исследователей теоретически задача слияния двойных черных дыр теперь в целом решена. Этого удалось достичь, сочетая аналитические методы (хорошо работающие на ранних стадиях спирального сближения) и численное моделирование на суперкомпьютерах (необходимое при расчетах поздних этапов сближения и собственно столкновения двух черных дыр). Нейтронные звезды выводят проблему на новый уровень сложности: для этого случая требуется также решать уравнения, описывающие динамику вещества, из которого состоят нейтронные звезды. Фактически, как уже было сказано в главе 5, мы не обладаем подробной информацией о свойствах ядерного вещества при исключительно высокой плотности, по всей видимости, существующей в нейтронных звездах. Можно построить шаблоны, количественно выражающие неопределенность наших знаний о сверхплотном ядерном веществе, и тогда есть обоснованные надежды на то, что наблюдения гравитационных волн, порождаемых слияниями нейтронных звезд или столкновениями черных дыр с нейтронными звездами, дадут нам много новых сведений о свойствах вещества при крайне высокой его плотности.

Второй вопрос, возникающий в связи с шаблонами, значительно более трудный. Как мы собираемся наблюдать гравитационно-волновые события, которых не предвидели и поэтому не построили для них шаблонов? Есть и другой вопрос, связанный с первым и столь же тревожный: что, если наши теоретические модели предсказываемых событий не вполне верны? Тогда на первый взгляд может показаться, что LIGO – измерительное устройство, отягощенное систематическими ошибками и, возможно, неспособное обнаруживать полностью новые и непредвиденные события. Однако на деле все обстоит вовсе не так ужасно: ведь LIGO использует и методы анализа, не связанные с применением шаблонов, благодаря чему может заметить достаточно «громкую» гравитационную волну, даже если ее форма не соответствует ни одному из шаблонов, хранящихся в базе данных. Подобным же образом, если вследствие неправильностей шаблона проходящая через детектор гравитационная волна лишь частично совпадает с ним по форме, свободный от применения шаблонов анализ при сравнении с шаблоном тут же приведет к появлению так называемых *невязок*: сигналов, остающихся после вычитания оптимальной версии шаблона,

вычисленной по расхождениям с чистым шумом. Проще говоря, шаблоны позволяют нам «слышать» более удаленные события, чем те, которые можно было бы регистрировать без них, и сопоставлять эти сигналы с предсказанными источниками, но они не исключают возможности, что LIGO зарегистрирует аномальный гравитационно-волновой сигнал, чье таинственное происхождение еще потребует выяснить.

Мы закончим эту главу обсуждением численного моделирования сталкивающихся черных дыр. Такие модели являются ключевым ингредиентом для создания используемых в детекторе LIGO шаблонов. Надо подчеркнуть, что использование численных методов для решения уравнений часто является последним средством, к которому мы прибегаем, когда все аналитические вычисления на бумаге оказались не способны дать адекватное физическое описание явления. Но вспомним, что мы ограничились простым случаем столкновений черных дыр в отсутствие вещества, так что уравнения, которые требуется решить, – это знакомые эйнштейновские уравнения поля в вакууме $G_{\mu\nu} = 0$. Откуда же здесь взяться трудностям?

Они в том, что полевые уравнения Эйнштейна являются дифференциальными уравнениями, а это значит, что они локальны: метрика изменяется в пределах бесконечно малой области в пространстве и времени. Дифференциальные уравнения почти всегда трудны для решения; невероятное количество исследований в различных областях математики, физики, химии и технических наук посвящено методам поиска приближенных решений таких уравнений. Взглянем на это вот с какой стороны: компьютер можно запрограммировать так, что он будет складывать, вычитать, умножать и делить, и эти основные арифметические операции он умеет делать с поразительной быстротой. Но верное решение дифференциального уравнения включает в себя в принципе бесконечно много основных операций, потому что в результате мы получаем не просто число, но некоторую непрерывную кривую – или, в случае уравнений Эйнштейна, – искривленное пространство-время, – а это требует определения бесконечно большого количества чисел. И конечно, ни один компьютер не может выполнить бесконечное количество вычислений за конечное время. Поэтому надо стремиться не к этому, а к отысканию некоторой стратегии выполнения хотя и большого, но конечного объема вычислений, в результате которых мы, тем не менее, получили бы результат, очень близкий к точному решению наших дифференциальных уравнений. Точнее говоря, мы хотим получить стратегию построения

последовательности приближенных численных решений, каждое из которых дает все лучшее приближение к точному решению наших дифференциальных уравнений. И мы не считаем численную задачу решенной до тех пор, пока не убедимся, что приближенные численные решения настолько близки к точному решению, насколько нам это требуется, при наличии достаточного времени работы компьютера. В качестве аналогии представьте себе, что вы смотрите видео при медленном интернет-соединении. Если у вас хороший браузер, вы увидите размытое, пятнистое изображение, которое, впрочем, демонстрируется с нормальной скоростью, более или менее правильной цветопередачей и не очень искаженными масштабами. Но если соединение станет работать быстрее или если, прежде чем начинать просмотр, вы немного подождете, пока большая часть видео загрузится, компьютер сможет разбить фрагменты каждого изображения на блоки меньшего размера, в результате чего в изображении будет видно больше подробностей и цвета станут менее размытыми. А если вы дождетесь загрузки всего видео или если соединение будет работать еще быстрее, вы увидите ваше видео с максимально возможным разрешением, которое допускает ваш компьютер. Примерно так же обстоит дело и с последовательными аппроксимациями численных решений дифференциальных уравнений, с той разницей, что, в принципе, вы можете улучшать ваше решение бесконечно. Единственным ограничением будет время работы компьютера, которое вы хотите или можете потратить. Говоря о численном «моделировании» уравнений Эйнштейна, мы рискуем впасть в заблуждение, будто это выражение подразумевает, что наша цель состоит в имитации существенных свойств искривленного пространства-времени при игнорировании каких-то подробностей. В действительности же нашей целью является выработка стратегии поиска именно всех деталей структуры пространства-времени с любой предустановленной точностью за конечное время. При численном моделировании сталкивающихся черных дыр дополнительным признаком успеха служит достижение хорошего согласования ваших результатов с приближенным описанием режимов спирального сближения и затухания, которое существовало до того, как были разработаны действующие современные численные методы.

Какую же стратегию следует нам применять для численного моделирования эйнштейновских уравнений поля в вакууме? Подумаем, каким бы мог быть ответ на этот вопрос. Мы хотим найти численное представление метрики, описывающей геометрию пространства-времени. Вспомним, что метрика – это правило определения расстояния между

любыми двумя точками. Дифференциальная геометрия позволяет нам сосредоточить внимание только на соседних точках. Так называемый метрический тензор описывает расстояние от данной точки до любой другой, достаточно близкой к ней. В практическом смысле метрический тензор – это матрица чисел размерностью 4×4 . Получить точное решение уравнений поля означает иметь точное значение метрического тензора в каждой точке пространства-времени. Решения Шварцшильда и Керра для черной дыры обеспечивают эту информацию в виде очень сложных математических формул. В численных моделях точных формул нет, и, разумеется, мы не можем определить метрический тензор в бесконечно большом количестве точек пространства-времени. Поэтому мы делаем так: изолируем ту область пространства-времени, которая нас в первую очередь интересует (скажем, некоторую область вокруг пары черных дыр, которые вот-вот сольются) и заполняем ее сетью точек. Каждой из конечного числа точек этой сети мы хотим приписать приблизительное значение метрического тензора. Если вернуться к аналогии с медленно загружающимся видео, нашей целью является всё большее и большее измельчение сети точек на экране, и с каждым циклом улучшения мы хотим устанавливать всё более и более точные значения всех компонентов изображения (в нашем случае – метрики) в каждой точке сети. Коротко говоря, мы дискретизируем искривленное пространство-время, чтобы свести его к математической конструкции, с которой может работать компьютер. И суть нашей стратегии численного моделирования в том, чтобы эта дискретизация происходила со всё большим и большим пространственным разрешением сети на всё большем и большем числе точек. Сегодня в типичной масштабной задаче численного моделирования задействованы сотни миллионов или даже миллиарды точек сети.

Наложить ограничения на уравнения Эйнштейна в вакууме означает, что пространство-время не может искривляться любым способом, но только в соответствии с определенными условиями, которые определяют, как именно растягивается и сжимается метрика в соседних точках пространства. Исходные уравнения Эйнштейна – это дифференциальные уравнения, а это значит, что «соседние» следует понимать как «сколь угодно близкие». Когда мы имеем дело с дискретизированным пространством-временем, приходится немного изменять уравнения Эйнштейна так, чтобы они стали теми правилами, по которым метрика в данной точке растягивает и сжимает метрику в соседних точках сети^[20]. Эти дискретизированные уравнения Эйнштейна могут, по крайней мере в принципе, быть введены в компьютер, потому что их система состоит из

конечного числа уравнений с конечным числом переменных.

Остаются, правда, две трудности, которые выглядят необычно для общей теории относительности: сингулярности и ограничения. Проблема сингулярностей, вообще говоря, нам знакома и является вполне физической: в недрах черных дыр спрятаны сингулярности, в которых эйнштейновские уравнения поля теряют смысл. Если мы не проявим осторожности, численные модели пространства-времени могут распространиться и на внутренние области черных дыр, и, когда компьютер встретится с сингулярностью, возникнут проблемы. Может показаться, что это мелочь: физическая интуиция подсказывает нам, что любые проблемы, с которыми компьютерная модель встречается внутри горизонта черной дыры, можно проигнорировать, так как никакие сигналы все равно не могут появиться оттуда и «испортить» остальную часть моделирования. Но в действительности этот вопрос более тонкий, чем кажется. Если в какой-то точке некоторого слоя вычислительной сети встретилась сингулярность, – а это значит, что метрический тензор содержит некоторые бесконечные компоненты, – тогда растяжения-сжатия, закодированные в дискретизированных уравнениях Эйнштейна, сделают сингулярными и соседние точки в других слоях. Те «заразят» сингулярностью своих соседей и т. д. Очень трудно, оказывается, написать программу, которая предотвращает неконтролируемое распространение сингулярности. Правильный подход заключается в том, чтобы идентифицировать горизонт вскоре после его формирования и запрограммировать компьютер так, чтобы он не позволял модели заглядывать под него слишком глубоко. Фиксируя внутри горизонта тонкий слой пространства-времени, мы можем добиться того, чтобы вблизи горизонта физика классической теории относительности правильно отображалась дискретизированными уравнениями Эйнштейна; но исключая из рассмотрения глубокие внутренние слои, мы тем самым удерживаем компьютер от встречи с сингулярностью. В этой стратегии исключения усиленно используется принцип космической цензуры Пенроуза, согласно которому сингулярность в решениях уравнений Эйнштейна не может появиться нигде, кроме как внутри горизонта событий. И тот факт, что численное моделирование уравнений Эйнштейна успешно работает, когда мы применяем стратегию исключения в том виде, как мы ее только что описали, дает впечатляющее подтверждение принципа космической цензуры.

Проблема ограничений сама по себе более технического свойства, но ее тоже стоит упомянуть, потому что ее анализ позволяет лучше понять, как в действительности строится численное моделирование уравнений

Эйнштейна. Обычно мы начинаем с некоторой исходной геометрии, например с двух невращающихся черных дыр, движущихся по орбитам друг вокруг друга, и ставим вопрос: что произойдет, когда мы отправимся вперед по оси времени? На практике это означает, что мы рассматриваем нашу большую сеть, дискрети-зирующую четырехмерное пространство-время, как разделенную на трехмерные пространственные элементы и что мы определяем течение времени в терминах функции хода, чтобы соединить эти элементы воедино. Обычно для каждого такого трехмерного пространственного элемента употребляется термин «квант времени», так как мы думаем о нем как о множестве точек в определенный момент времени. Что мы теперь должны сделать, так это задать нашему компьютеру метрику всего на нескольких (может быть, только на двух) последовательных квантах времени и затем запрограммировать его на продвижение на следующий квант посредством дискретизированных уравнений Эйнштейна. Мы планируем повторять эту процедуру, применяя стратегию исключения, чтобы избежать сингулярности, столько, сколько нам понадобится для того, чтобы черные дыры в нашей модели слились. И мы рассчитываем на то, что геометрия будет эволюционировать до тех пор, пока на последнем кванте времени в нашей модели мы не увидим единую слившуюся черную дыру плюс моментальную картину всех гравитационных волн, порожденных столкновением и уносящихся от его центра.

Но тут-то нас и ждет подвох. Как только выбор кванта времени сделан, оказывается, что некоторые из уравнений Эйнштейна не могут нам помочь в продвижении от одного кванта к следующему. Вместо этого их хватает всего лишь на то, чтобы ограничить тип геометрии, разрешенный для каждого кванта. Даже если мы сумеем со всей осторожностью добиться идеального удовлетворения этих ограничений для одного кванта времени, мы обычно обнаруживаем, что при использовании дискретизированных уравнений Эйнштейна для развития модели по оси времени ограничения для следующего кванта времени выполняются уже неидеально. Что еще хуже, это несовершенство растет со временем, и вся наша модель полностью теряет смысл! Решение этой проблемы оказывается столь же изощренным, как и сама проблема. Вместо того чтобы пытаться идеально удовлетворить ограничения на каждом кванте времени, мы должны заранее предвидеть, что в точности добиться этого не удастся – но зато мы можем изменить дискретизированные уравнения Эйнштейна, добавляя к ним то, что можно условно охарактеризовать как возвращающую силу. Она каждый раз будет как бы подталкивать решение обратно к удовлетворению

ограничений. Эта возвращающая сила действует очень похоже на возвращающую силу пружины: растяните пружину от состояния равновесия, и она сожмется опять, чтобы вернуться в равновесное состояние, причем сила эта будет тем больше, чем дальше мы отошли от равновесия. В уравнения Эйнштейна мы, конечно, не вводим никакой физической силы – это скорее математический трюк, и в этом случае «равновесию» соответствует решение, удовлетворяющее ограничениям. В результате такого подхода работа с ограничениями, наряду с тщательным отбором вариантов представления уравнений Эйнштейна в дискретизированном пространстве-времени, приводит к созданию моделей, которые вполне способны отразить все детали структуры пространства-времени, проявляющиеся при столкновениях черных дыр, – конечно, при условии, что мы рассматриваем только геометрию вне горизонта.

Подведем итоги. Большинство столкновений черных дыр во Вселенной, вероятно, происходят по сценарию сближения по спирали с последующим слиянием. Этот сценарий хорошо описывается численным моделированием эйнштейновских уравнений поля в вакууме $G_{\mu\nu} = 0$. Проводя такое моделирование для широкого набора начальных условий, мы можем понять, какого рода гравитационное излучение порождают черные дыры при слиянии. В этих процессах высвобождение энергии происходит поразительно быстро – настолько, что гравитационная светимость сливающихся черных дыр может на короткое время превзойти общую усредненную светимость всех звезд Вселенной, вместе взятых. Но светимость звезд относится к оптическому диапазону, гравитационная же светимость проявляется в гравитационном излучении, которое распространяется во все стороны от сливающихся черных дыр и может быть зарегистрировано L-образными детекторами гравитационных волн, такими как LIGO. Мы надеемся, что в будущем сможем извлечь из гравитационных волн столько же информации о свойствах Вселенной, сколько мы извлекли из видимого света. Следующим большим открытием может стать регистрация гравитационных волн от сливающихся нейтронных звезд. И если удастся принять гравитационные волны из очень ранней Вселенной, они смогут нам рассказать многое о том, какой была Вселенная на заре своего существования. Лучшим подарком было бы открытие гравитационных волн такого типа, который никто не предсказывал! Тогда теоретикам пришлось бы разобраться, какие экзотические физические процессы могли их породить.

Глава 7

Термодинамика черных дыр

До сих пор мы рассматривали черные дыры как астрофизические объекты, которые образовались при взрывах сверхновых или лежат в центрах галактик. Мы наблюдаем их косвенно, измеряя ускорения близких к ним звезд. Знаменитая регистрация гравитационных волн приемником LIGO 14 сентября 2015 г. стала примером более прямых наблюдений столкновения черных дыр. Математические инструменты, которыми мы пользуемся для достижения лучшего понимания природы черных дыр, таковы: дифференциальная геометрия, уравнения Эйнштейна и мощные аналитические и численные методы, применяемые для решения уравнений Эйнштейна и при описании геометрии пространства-времени, которое порождают черные дыры. И как только мы сможем дать полное количественное описание порождаемого черной дырой пространства-времени, с астрофизической точки зрения тема черных дыр сможет считаться закрытой. В более широкой теоретической перспективе остается еще очень много возможностей для исследования. Цель этой главы – рассказать о некоторых теоретических достижениях современной физики черных дыр, в которых идеи термодинамики и квантовой теории объединяются с общей теорией относительности, порождая неожиданные новые концепции. Основная идея заключается в том, что черные дыры не просто геометрические объекты. У них есть температура, они обладают огромной энтропией и могут демонстрировать проявления квантовой запутанности. Наши рассуждения о термодинамических и квантовых аспектах физики черных дыр будут более отрывочными и поверхностными, чем представленный в предыдущих главах анализ чисто геометрических особенностей пространства-времени в черных дырах. Но и эти, и в особенности квантовые, аспекты являются существенной и жизненно важной частью ведущихся теоретических исследований черных дыр, и мы очень постараемся передать если не сложные детали, то по крайней мере дух этих работ.

В классической общей теории относительности – если говорить о дифференциальной геометрии решений уравнений Эйнштейна – черные дыры являются истинно черными в том смысле, что из них ничто не может выбраться наружу. Стивен Хокинг показал, что эта ситуация полностью

меняется, когда мы принимаем во внимание квантовые эффекты: черные дыры, оказывается, испускают излучение определенной температуры, известной как температура Хокинга. Для черных дыр астрофизических размеров (то есть от черных дыр звездных масс до сверхмассивных) температура Хокинга пренебрежимо мала по сравнению с температурой космического микроволнового фона – излучения, заполняющего всю Вселенную, которое, кстати, само может рассматриваться как вариант излучения Хокинга. Расчеты, выполненные Хокингом для определения температуры черных дыр, являются частью более обширной программы исследований в области, называемой термодинамикой черных дыр. Другую большую часть этой программы составляет изучение энтропии черных дыр, которая характеризует количество информации, теряющейся внутри черной дыры. Обычные объекты (такие, как кружка воды, брусок из чистого магния или звезда) тоже обладают энтропией, и одним из центральных утверждений термодинамики черных дыр является то, что черная дыра данного размера обладает большей энтропией, чем любая другая форма материи, которую можно вместить в область такого же размера, но без образования черной дыры.

Но прежде чем мы глубоко погрузимся в разбор проблем, связанных с излучением Хокинга и энтропией черных дыр, давайте предпримем быстрый экскурс в области квантовой механики, термодинамики и запутанности. Квантовая механика была разработана в основном в 1920-х годах, и ее основной целью было описание очень маленьких частиц материи, таких как атомы. Разработка квантовой механики привела к размыванию таких базовых понятий физики, как точное положение индивидуальной частицы: оказалось, например, что положение электрона при его движении вокруг атомного ядра не может быть точно определено. Вместо этого электронам были приписаны так называемые орбиты, на которых их действительные положения могут быть определены только в вероятностном смысле. Для наших целей, однако, важно не переходить к этой – вероятностной – стороне дела слишком быстро. Возьмем простейший пример: атом водорода. Он может находиться в определенном квантовом состоянии. Самое простое состояние водородного атома, называемое основным, – это состояние с наименьшей энергией, и эта энергия точно известна. В более общем смысле, квантовая механика позволяет нам (в принципе) знать состояние любой квантовой системы абсолютно точно. Вероятности выходят на сцену, когда мы задаем определенного вида вопросы о квантово-механической системе. Например, если определено известно, что атом водорода находится в основном

состоянии, мы можем спросить: «Где находится электрон?» и по законам квантовой механики получим на этот вопрос лишь некоторую оценку вероятности, приблизительно что-то вроде: «вероятно, электрон находится на расстоянии до половины ангстрема от ядра атома водорода» (один ангстрем равен 10^{-10} метров). Но у нас есть возможность посредством определенного физического процесса найти положение электрона гораздо точнее, чем до одного ангстрема. Этот довольно обычный в физике процесс состоит в том, чтобы запустить в электрон фотон с очень короткой длиной волны (или, как говорят физики, рассеять фотон на электроне) – после этого мы сможем реконструировать местоположение электрона в момент рассеяния с точностью, примерно равной длине волны фотона. Но этот процесс изменит состояние электрона, так что после этого он уже не будет находиться в основном состоянии водородного атома и не будет иметь точно определенной энергии. Зато на некоторое время его положение будет почти точно определено (с точностью до длины волны использованного для этого фотона). Предварительная оценка положения электрона может быть проведена только в вероятностном смысле с точностью около одного ангстрема, но как только мы измерили его, мы точно знаем, чему оно было равно. Короче говоря, если мы некоторым способом измеряем квантово-механическую систему, то, по крайней мере в общепринятом смысле, мы «наильно» придаем ей состояние с определенным значением величины, которую измеряем.

Квантовая механика приложима не только к малым, но и (как мы полагаем) ко всем системам, однако для больших систем квантово-механические правила быстро становятся очень сложными. Ключевой концепцией является квантовая запутанность, простым примером которой может служить понятие спина (вращения). Индивидуальные электроны обладают спином, поэтому на практике единичный электрон может иметь спин, направленный вверх или вниз по отношению к выбранной пространственной оси. Спин электрона является наблюдаемой величиной, потому что электрон порождает слабое магнитное поле, подобное полю магнитного бруска. Тогда спин, направленный вверх, означает, что северный полюс электрона указывает вниз, а спин, направленный вниз, означает, что северный полюс «смотрит» вверх. Два электрона могут быть поставлены в сопряженное квантовое состояние, в котором у одного из них спин направлен вверх, а у другого вниз, но сказать, у какого из электронов какой спин, при этом невозможно^[21]. В сущности, в основном состоянии атома гелия два электрона находятся именно в таком состоянии,

называемом спин-синглетным, так как суммарный спин обоих электронов равен нулю. Если мы разделим эти два электрона, не меняя их спинов, то сможем продолжать утверждать, что они вместе спин-синглетны, но по-прежнему не сможем сказать, каков будет спин у любого из них по отдельности. Вот если мы измерим один из их спинов и установим, что он направлен вверх, тогда мы будем полностью уверены, что второй направлен вниз. В этой ситуации мы говорим, что спины *запутаны* – ни один сам по себе не имеет определенного значения, в то время как вместе они находятся в определенном квантовом состоянии.

Эйнштейна очень беспокоило явление запутанности: оно, казалось, угрожает основным принципам теории относительности. Рассмотрим случай двух электронов в спин-синглетном состоянии, когда они отстоят далеко друг от друга в пространстве. Для определенности, пусть один из них возьмет себе Алиса, а другой – Боб. Допустим, что Алиса измерила спин своего электрона и обнаружила, что он направлен вверх, а Боб ничего измерять не стал. Пока Алиса не выполнила свое измерение, невозможно было сказать, каков спин его электрона. Но как только она свое измерение завершила, она абсолютно точно узнала, что спин электрона Боба направлен вниз (в направлении, обратном направлению спина ее собственного электрона). Значит ли это, что ее измерение мгновенно перевело электрон Боба в состояние, когда его спин направлен вниз? Как это могло произойти, если электроны пространственно разделены? Эйнштейн и его сотрудники Натан Розен и Борис Подольский чувствовали, что история с измерением запутанных систем настолько серьезна, что угрожает самому существованию квантовой механики. Сформулированный ими парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР) использует мысленный эксперимент, похожий на тот, что мы сейчас описали, чтобы сделать вывод: квантовая механика не может быть полным описанием реальности. Сейчас на основании последовавших за этим теоретических изысканий и множества измерений установилось общее мнение, что ЭПР-парадокс содержит ошибку, а квантовая теория верна. Квантово-механическая запутанность реальна: измерения запутанных систем будут коррелировать, даже если эти системы далеко разнесены в пространстве-времени.

Вернемся к ситуации, где мы поставили два электрона в спин-синглетное состояние и раздали их Алисе и Бобу. Что мы можем сказать об электронах до того, как проведены измерения? Что оба вместе они находятся в определенном квантовом состоянии (спин-синглетном). Спин Алисиного электрона с одинаковой вероятностью направлен вверх или

вниз. Точнее, квантовое состояние ее электрона с одинаковой вероятностью может быть одним (спином вверх) или другим (спином вниз). Теперь для нас понятие вероятности приобретает более глубокий смысл, чем раньше. Прежде мы рассматривали определенное квантовое состояние (основное состояние атома водорода) и видели, что есть некоторые «неудобные» вопросы, такие, например, как «Где находится электрон?», – вопросы, ответы на которые существуют только в вероятностном смысле. Если бы мы задавали «хорошие» вопросы, например: «Какова энергия этого электрона?», мы получали бы на них определенные ответы. Теперь же нет «хороших» вопросов, которые мы могли бы задать об Алисином электроне, ответы на которые не зависели бы от электрона Боба. (Мы не говорим о глупых вопросах вроде «А есть ли у Алисиного электрона вообще спин?» – вопросах, на которые существует только один ответ.) Таким образом, для определения параметров одной из половин запутанной системы нам придется использовать вероятностный язык. Определенность возникает только, когда мы рассматриваем связь между вопросами, которые могут задать о своих электронах Алиса и Боб.

Мы нарочно начали с одной из простейших квантово-механических систем, которые нам известны: системы спинов индивидуальных электронов. Есть надежда, что на базе подобных простых систем будут построены квантовые компьютеры. Система спинов индивидуальных электронов или другие эквивалентные квантовые системы сейчас называются кубитами (сокращение от «квантовые биты»), что подчеркивает их роль в квантовых компьютерах, аналогичную роли, которую играют обычные биты в компьютерах цифровых.

Представим себе теперь, что мы заменили каждый электрон гораздо более сложной квантовой системой со многими, а не только двумя квантовыми состояниями. Например, дали Алисе и Бобу бруски из чистого магния. Прежде чем Алиса и Боб разойдутся по своим делам в разные стороны, их бруски могут взаимодействовать, и мы договоримся, что при этом они приобретают определенное общее квантовое состояние. Как только Алиса и Боб расходятся, их магниевые бруски перестают взаимодействовать. Как и в случае с электронами, каждый брусок находится в неопределенном квантовом состоянии, хотя вместе, как мы считаем, они образуют состояние вполне определенное. (В этом обсуждении мы предполагаем, что Алиса и Боб способны перемещать свои магниевые бруски, никак не нарушая их внутреннего состояния, точно так же как прежде мы предполагали, что Алиса и Боб могли разделять свои запутанные электроны, не меняя их спинов.) Но различие между этим

мысленным экспериментом и экспериментом с электронами заключается в том, что неопределенность квантового состояния каждого бруска огромна. Брусек вполне может приобрести больше квантовых состояний, чем число атомов во Вселенной. Вот тут-то на сцену и выходит термодинамика. Очень неточно определенные системы могут, тем не менее, иметь некоторые хорошо определенные макроскопические характеристики. Такой характеристикой является, например, температура. Температура – это мера того, с какой вероятностью любая часть системы имеет определенную среднюю энергию, причем более высокая температура соответствует большей вероятности иметь большую энергию. Другой термодинамический параметр – энтропия, по сути, равная логарифму количества состояний, которые система может принимать. Еще одна термодинамическая характеристика, которая была бы существенна для бруска магния, – это его суммарная намагниченность, то есть, в сущности, параметр, показывающий, насколько больше в бруске может быть электронов со спином, направленным вверх, чем со спином, направленным вниз.

Мы привлекли к нашему рассказу термодинамику как способ описывать системы, квантовые состояния которых точно неизвестны из-за их запутанности с другими системами. Термодинамика – мощный инструмент анализа таких систем, но ее создатели вовсе не предполагали такого ее применения. Сади Карно, Джеймс Джоуль, Рудольф Клаузиус были деятелями промышленной революции XIX столетия, и интересовал их самый практический из всех вопросов: как работают двигатели? Давление, объем, температура и теплота – плоть и кровь двигателей. Карно установил, что энергия в виде теплоты никогда не может быть полностью превращена в полезную работу вроде подъема грузов. Часть энергии всегда будет расходоваться впустую. Клаузиус внес основной вклад в создание идеи энтропии как универсального инструмента определения энергетических потерь в ходе любого процесса, связанного с теплотой. Главным его достижением было осознание того, что энтропия никогда не уменьшается – почти во всех процессах она растет. Процессы, в которых энтропия увеличивается, называются необратимыми – именно потому, что они не могут пойти вспять без уменьшения энтропии. Следующий шаг на пути развития статистической механики был сделан Клаузиусом, Максвеллом и Людвигом Больцманом (в числе многих других) – они показали, что энтропия является мерой беспорядка. Обычно чем больше вы действуете на что-то, тем больше вносите туда беспорядка. И даже если вы разработали процесс, целью которого является наведение порядка, в ходе его неизбежно образуется больше энтропии, чем будет уничтожено, –

например, при выделении теплоты. Подъемный кран, который укладывает стальные балки в идеальном порядке, создает упорядоченность в смысле расположения балок, но в ходе его работы выделится столько тепла, что общая энтропия все равно растет. Но всё же отличие взгляда на термодинамику физиков XIX века от взгляда, связанного с квантовой запутанностью, не так велико, каким кажется. Каждый раз, когда система взаимодействует с внешним агентом, ее квантовое состояние запутывается с квантовым состоянием агента. Обычно эта запутанность ведет к увеличению неопределенности квантового состояния системы, другими словами, к росту числа квантовых состояний, в которых система может находиться. В результате взаимодействия с другими системами энтропия, определяемая в терминах количества доступных системе квантовых состояний, как правило, растет.

В общем, квантовая механика дает новый способ характеризовать физические системы, в которых некоторые параметры (например, положение в пространстве) становятся неопределенными, зато другие (например, энергия) часто известны точно. В случае квантовой запутанности две принципиально раздельные части системы имеют известное общее квантовое состояние, а каждая часть по отдельности – состояние неопределенное. Стандартный пример запутанности – пара спинов в синглетном состоянии, в котором невозможно сказать, какой спин направлен вверх, а какой – вниз. Неопределенность квантового состояния в большой системе требует термодинамического подхода, при котором макроскопические параметры, такие как температура и энтропия, известны с большой точностью, несмотря на то что у системы существует множество возможных микроскопических квантовых состояний.

Закончив наш краткий экскурс в область квантовой механики, запутанности и термодинамики, попробуем теперь понять, как всё это приводит к пониманию того факта, что черные дыры имеют температуру. Первый шаг к этому сделал Билл Унру – он показал, что ускоряющийся наблюдатель в плоском пространстве будет обладать температурой, равной своему ускорению, деленному на 2π . Ключ к вычислениям Унру в том, что наблюдатель, движущийся с постоянным ускорением в определенном направлении, может видеть только половину плоского пространства-времени. Вторая половина, по сути, находится за горизонтом, подобным горизонту черной дыры. Сначала это выглядит невозможным: как может плоское пространство-время вести себя как горизонт черной дыры? Чтобы понять, как это выходит, призовем на помощь наших верных наблюдателей Алису, Боба и Билла. По нашей просьбе они выстраиваются в линию,

причем Алиса оказывается между Бобом и Биллом, а между наблюдателями в каждой паре расстояние составляет ровно 6 километров. Договорились, что в нулевой момент времени Алиса прыгнет в ракету и полетит в сторону Билла (а значит, от Боба) с постоянным ускорением. Ракета у нее очень хорошая, способная развивать ускорение в 1,5 триллиона раз больше гравитационного ускорения, с которым движутся объекты вблизи поверхности Земли. Конечно, выдерживать такое ускорение Алисе нелегко, но, как мы сейчас увидим, эти цифры выбраны с определенной целью; в конце концов, мы просто обсуждаем потенциальные возможности, вот и всё. Ровно в тот момент, когда Алиса прыгает к себе в ракету, Боб и Билл машут ей рукой. (Мы вправе употреблять выражение «ровно в тот момент, когда...», потому что пока Алиса еще не начала полет, она находится в той же системе отсчета, что и Боб с Биллом, так что все они вполне могут синхронизировать свои часы.) Машущего ей Билла Алиса, конечно, видит: правда, находясь в ракете, она увидит его раньше, чем это случилось бы, если бы она оставалась там, где была, ведь ее ракета вместе с ней летит именно к нему. От Боба же она, наоборот, удаляется, так что мы можем резонно предположить, что она увидит, как он ей машет, несколько позже, чем увидела бы, останься она на прежнем месте. Но истина еще более удивительна:

Боба она вообще не увидит! Иначе говоря, фотоны, которые летят от машущего рукой Боба к Алисе, никогда ее не догонят, даже учитывая, что она никогда не сможет достичь скорости света. Если бы Боб начал махать, находясь чуть ближе к Алисе, тогда фотоны, которые улетели от него в момент ее отправления, ее бы настигли, а если бы он находился чуть дальше, то тем более не настигли бы. Именно в этом смысле мы говорим, что Алисе видна только половина пространства-времени. На момент, когда Алиса начинает движение, Боб находится чуть-чуть дальше горизонта, который наблюдает Алиса.

В нашем обсуждении квантовой запутанности мы уже привыкли к идее, что даже если квантово-механическая система в целом обладает определенным квантовым состоянием, какие-то ее части могут им не обладать. На самом деле, когда мы обсуждаем сложную квантовую систему, какая-то ее часть может быть наилучшим образом охарактеризована именно в рамках термодинамики: ей может быть приписана вполне определенная температура, несмотря на в высшей степени неопределенное квантовое состояние всей системы. Наша последняя история с участием Алисы, Боба и Билла немного похожа на эту ситуацию, но квантовая система, о которой мы здесь говорим, является пустым пространством-

временем, и Алиса видит только его половину. Оговоримся, что пространство-время в целом находится в своем основном состоянии, что означает отсутствие в нем частиц (конечно, не считая Алисы, Боба, Билла и ракеты). Но та часть пространства-времени, которую видит Алиса, будет находиться не в основном состоянии, а в состоянии, запутанном с той его частью, которой она не видит. Воспринимаемое Алисой пространство-время находится в сложном неопределенном квантовом состоянии, характеризуемом конечной температурой. Вычисления Унру показывают, что эта температура составляет примерно 60 нанокельвинов. Коротко говоря, по мере своего ускорения Алиса как бы окунается в теплую ванну излучения с температурой, равной (в соответствующих единицах) ускорению, деленному на 2π .

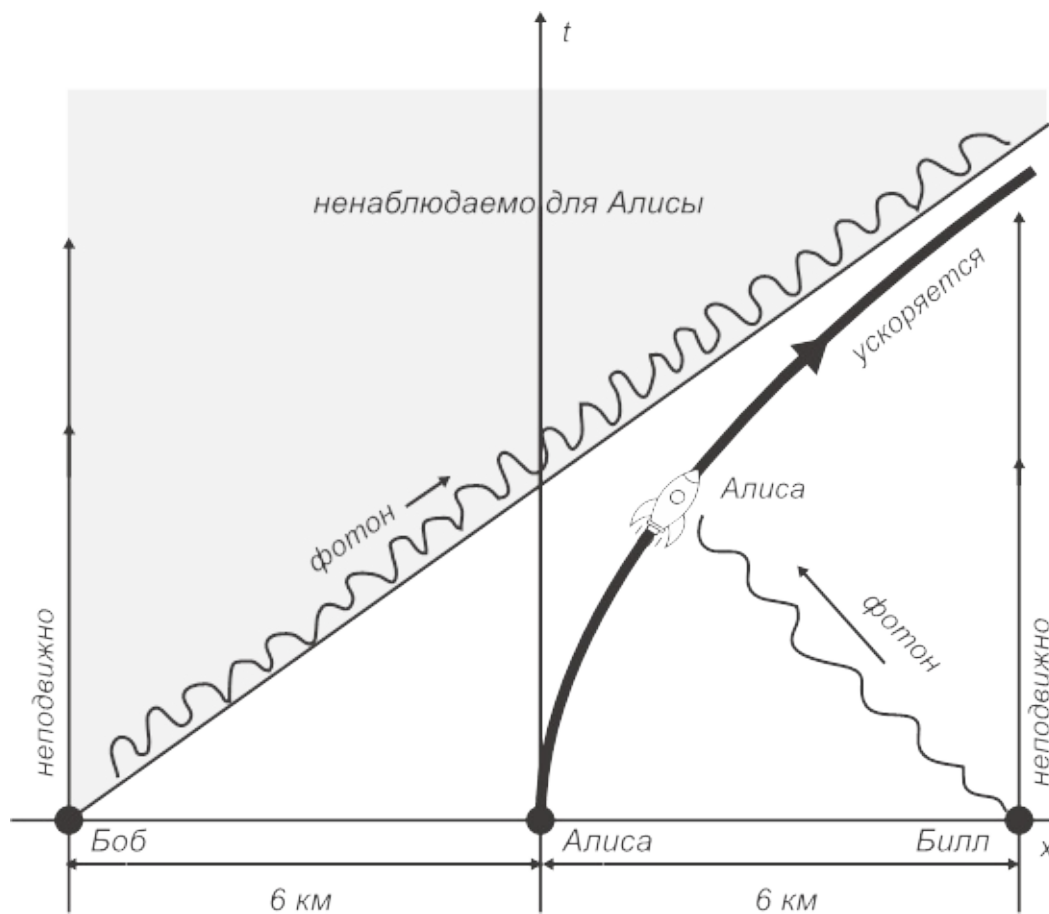


Рис. 7.1. Алиса движется с ускорением из состояния покоя, в то время как Боб и Билл остаются неподвижными.

Ускорение Алисы как раз такое, чтобы она никогда не увидела фотонов, которые отправляет в ее сторону Боб в момент $t = 0$. Однако она получает фотоны, которые в момент $t = 0$ ей послал Билл. В результате

получается, что Алиса способна наблюдать только одну половину пространства-времени.

Странность вычислений Унру состоит в том, что хотя они от начала до конца относятся к пустому пространству, они противоречат известным словам короля Лира «из ничего не выйдет ничего». Как может пустое пространство быть столь сложным? Откуда в нем могут взяться частицы? Дело в том, что согласно квантовой теории пустое пространство отнюдь не пустое. В нем здесь и там постоянно появляются и исчезают короткоживущие возбуждения, называемые виртуальными частицами, энергия которых может быть и положительной, и отрицательной. Наблюдатель из далекого будущего – назовем ее Кэрол, – которая способна видеть практически всё пустое пространство, может подтвердить, что в нем нет продолжительно существующих частиц. При этом присутствие частиц с положительной энергией в той части пространства-времени, которую Алиса может наблюдать, благодаря квантовой запутанности связано с возбуждениями равной и противоположной по знаку энергии в ненаблюдаемой для Алисы части пространства-времени. Вся правда о пустом пространстве-времени в целом открыта для Кэрол, и эта истина в том, что там нет частиц. Однако опыт Алисы говорит ей, что частицы там есть!

Но тогда выходит, что вычисленная Унру температура, похоже, просто фикция – она является не столько свойством плоского пространства как такового, сколько свойством наблюдателя, испытывающего в плоском пространстве постоянное ускорение. Однако и само тяготение является такой же «фиктивной» силой в том смысле, что «ускорение», которое им вызывается, есть не что иное, как движение по геодезической в искривленной метрике. Как мы уже объясняли в главе 2, эйнштейновский принцип эквивалентности состоит в том, что ускорение и тяготение, в сущности, эквивалентны. С этой точки зрения нет ничего особенно шокирующего в том, что горизонт черной дыры имеет температуру, равную вычисленной Унру температуре ускоряющегося наблюдателя. Но, можем мы спросить, какое же значение ускорения нам следует использовать для определения температуры? Удаляясь на достаточно большое расстояние от черной дыры, мы можем сделать ее гравитационное притяжение сколь угодно слабым. Следует ли из этого, что для определения измеряемой нами эффективной температуры черной дыры нам надо использовать соответствующее малое значение ускорения? Этот вопрос оказывается довольно коварным, ведь, как мы полагаем, температура объекта не может

произвольно уменьшаться. Предполагается, что она обладает некоторым фиксированным конечным значением, которое может измерить даже очень удаленный наблюдатель.

Точка зрения, более или менее соответствующая духу трактовки температуры черной дыры Хокинга, заключается в том, что для ее определения мы должны использовать ускорение наблюдателя, «висящего» в непосредственной близости от горизонта черной дыры, но затем уменьшить это значение температуры на коэффициент гравитационного красного смещения, испытываемого этим наблюдателем. Такой взгляд в наибольшей степени соответствует хокинговской процедуре вычисления температуры. Давайте шаг за шагом рассмотрим эту процедуру для случая шварцшильдовской черной дыры. Говоря о «парящем» или «подвешенном» наблюдателе, мы имеем в виду такого, который остается на фиксированном радиусе над горизонтом, но при этом не совершает орбитального движения вокруг черной дыры. Для того чтобы этого добиться, этому статическому наблюдателю – назовем ее Анной – придется постоянно отталкиваться от черной дыры, к примеру, при помощи ракетного двигателя. Если Анна пользуется только своей локальной геометрией, то принцип эквивалентности говорит ей, что она не сможет отличить ее от плоского пространства, через которое она движется с постоянным ускорением. Чем ближе Анна к фактическому горизонту черной дыры, тем большим становится это видимое ускорение. В соответствии с вычислениями Унру, Анна будет ощущать температуру, равную своему ускорению, деленному на 2π . Похоже, мы снова оказываемся в той же ловушке: ощущаемая наблюдателем температура зависит от его положения. Выход из этого тупика в том, что Анна также испытывает и значительное гравитационное красное смещение по сравнению с другим наблюдателем – назовем его Барт, – который держится от черной дыры на почтительном расстоянии. (В данном контексте это значит, что расстояние от Барта до черной дыры многократно превышает радиус Шварцшильда.) Чем ближе будет Анна к горизонту, тем выше будет ей казаться температура Унру. Но то, что ее гравитационное красное смещение возрастает, означает, что к тому моменту, как видимое Анной излучение выкарабкается из гравитационного поля черной дыры и достигнет Барта, оно будет соответствовать конечной температуре, которая не будет изменяться по мере того, как Анна будет приближаться к горизонту. Эта конечная температура и есть температура Хокинга, и, умножая ее на 2π , мы получим величину, называемую *поверхностным тяготением* черной дыры, – это ускорение, которое бы понадобилось испытать Алисе в плоском пространстве, чтобы

почувствовать такую же температуру излучения Унру, как температура излучения Хокинга, которую чувствует Барт^[22].

Выше мы говорили, что выбрали численные величины для иллюстрации эффекта Унру с определенной целью. Дело в том, что ускорение Алисы, в полтора триллиона раз превышающее гравитационное ускорение на Земле, как раз равно поверхностному тяготению на горизонте черной дыры с массой Солнца. Соответственно, и хокинговская температура этой черной дыры такая же, как ощущаемая Алисой температура Унру: 60 нанокельвинов. У больших черных дыр температуры будут меньше: они обратно пропорциональны массе.

Говоря о температуре Унру, подчеркнем тот факт, что инерциальный наблюдатель в далеком будущем (как помните, мы назвали ее Кэрол) обладал бы полной квантовой истиной: что квантовое состояние пространства-времени в целом представляет собой вакуум без каких-либо возбуждений. Тепловое состояние Алисы включает в себя положительные энергетические возмущения, квантово-механически запутанные с отрицательными возмущениями в области пространства-времени, которую она воспринимать не может. Оказывается, что аналогичная ситуация возникает и в случае излучения Хокинга, однако с некоторыми существенными отличиями.

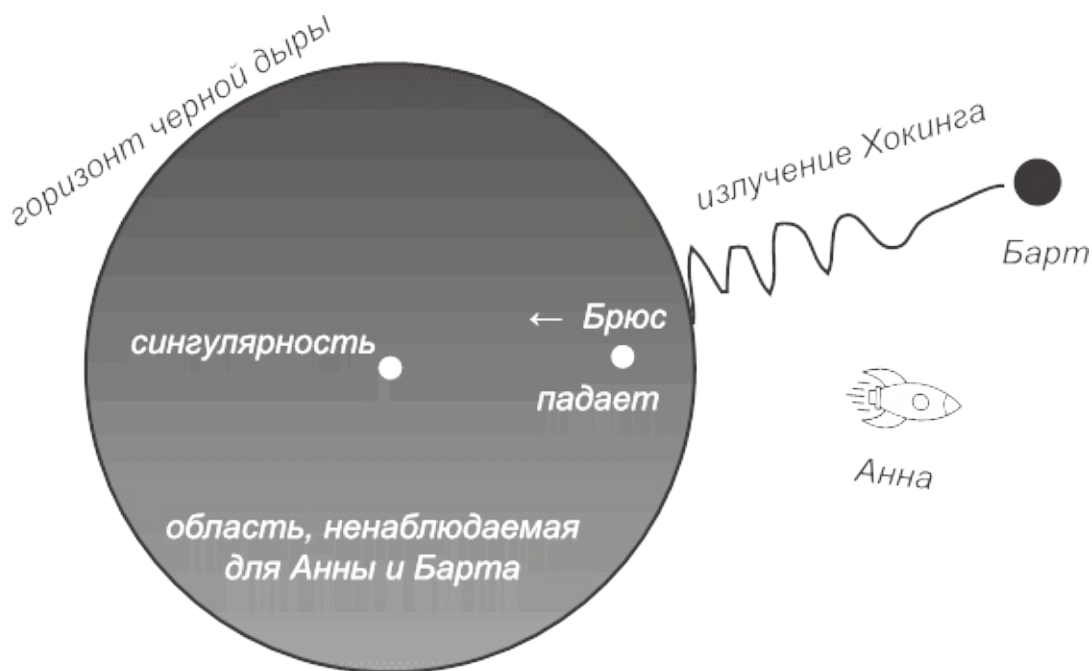


Рис. 7.2. Схема возникновения излучения Хокинга. Анну, остающуюся на фиксированном радиусе у горизонта, можно считать ускоряющимся наблюдателем, так как она испытывает гравитационное притяжение черной

дыры. Она видит излучение по тем же причинам, по которым возникает эффект Унру. Это излучение на своем пути наружу к Барту подвергается гравитационному красному смещению. Барт, так же как и Анна, находится в стационарном состоянии, но он настолько далеко от черной дыры, что едва ли чувствует ее притяжение. Падающий в черную дыру извне наблюдатель Брюс при пересечении горизонта не видит излучения Хокинга.

Когда мы начали обсуждать эффект Унру, аналогом ускоряющейся наблюдательницы Алисы была висящая над горизонтом черной дыры статическая наблюдательница Анна, а Боб находился за горизонтом, скрывающим от Алисы половину плоского пространства-времени. В контексте черной дыры аналогом Боба будет свободно падающий внутрь горизонта наблюдатель – пусть его зовут Брюсом. Будущее у бедняги Брюса незавидное: он неизбежно окажется в сингулярности. Однако если черная дыра достаточно большая, этого печального конца ему, возможно, придется ждать долго, и есть смысл узнать, какие наблюдения Брюс успеет за это время сделать. Ответ: за горизонтом он не сможет измерить вообще никакую температуру, поскольку внутрь черной дыры не поступает никакого излучения от какого-либо источника. По крайней мере, локально, вблизи горизонта черной дыры, Брюс сможет сказать, что никаких квантовых возбуждений он не видит.

Описания, которые дают Анна и Барт, отличаются от описания Брюса тем, что они видят частицы с положительной энергией. Точно так же как это было с эффектом Унру, эти положительные энергетические возбуждения должны быть квантово-механически связаны с возбуждением отрицательной энергии внутри горизонта черной дыры. Вспомним каверзную аргументацию, которая тогда применялась: когда Брюс, двигаясь внутрь, пересекает горизонт, он на самом деле не только не видит возбуждений отрицательной энергии – он не видит вообще никаких возбуждений. Возбуждения отрицательной энергии внутри горизонта необходимы только для того, чтобы внешние наблюдатели Анна и Барт согласовали свои наблюдения с квантовой теорией. И все же эти необычные возбуждения играют важную физическую роль. Они служат для уменьшения общей массы черной дыры, которое компенсирует энергию, излучаемую ею с точки зрения Анны и Барта.

Исходящие положительные и входящие отрицательные возбуждения энергии квантово-механически запутаны, и по крайней мере вблизи горизонта мы можем утверждать, что эта запутанность служит цели

согласования в рамках квантовой теории описания ситуации наблюдателем, падающим в черную дыру (Брюс), и статическим наблюдателем (Анна и Барт). Именно это достигаемое посредством запутанности квантовое согласование лежит в основе эффекта Хокинга. Таким образом, наложение одной тонкости на другую дает вполне осязаемый результат: излучение черными дырами положительных энергетических возбуждений!

Разительный контраст этой ситуации с эффектом Унру заключается в том, что для наблюдателя из далекого будущего очень трудно обеспечить возможность видеть всё пространство-время: ведь внутри черной дыры никакого далекого будущего не существует, а снаружи ее мы не можем заглянуть внутрь. Может быть, если черная дыра полностью испарится, о наблюдателе, который видит весь этот процесс, можно будет сказать, что он обладает полной квантовой истиной, описывающей пространство-время. Или, наоборот, возможно, что никакой наблюдатель не может иметь полной информации о пространстве-времени, заключающем в себе черные дыры, что означает, что информация о квантовом состоянии действительно потеряна. Загадка сосуществования квантовой эволюции из прошлого в будущее и черных дыр известна под названием *парадокса потери информации*, и она до сих пор не решена.

В общем и целом картина возникновения излучения Хокинга такова: квантово-механические возбуждения покидают черную дыру, претерпевая при этом красное смещение, и наблюдаются удаленным наблюдателем в виде потока излучения с температурой, равной поверхностному тяготению черной дыры, деленному на 2π . Тем временем потеря энергии на это излучение приводит к тому, что масса черной дыры медленно уменьшается, или «испаряется». Над трудным вопросом о квантовом опыте наблюдателей, перемещающихся по различным путям в пространстве-времени черной дыры, ломают головы поколения теоретиков. Но ясно одно: если мы остаемся на достаточно большом расстоянии от черной дыры и если рассматриваемая черная дыра столь велика, что не успевает полностью испариться, то мы будем наблюдать от нее тепловое излучение с температурой Хокинга.

Излучение Хокинга – наиболее знаменитое термодинамическое свойство черных дыр. Однако не менее важно для них понятие энтропии Бекенштейна – Хокинга, названной в честь Якоба Бекенштейна и Стивена Хокинга. Вспомним, что энтропия – это мера количества доступных системе квантовых состояний, а точнее, логарифм этого количества. Самое важное свойство энтропии заключается в том, что в ходе физических процессов она никогда не уменьшается, а, как правило, увеличивается.

Другим ее важным свойством является то, что энтропия объединения двух систем не может превосходить сумму энтропий этих систем по отдельности. В обычном веществе мы, как правило, обнаруживаем, что энтропия целого равна сумме энтропий частей. Например, энтропия двух обычных чашек воды при комнатной температуре вдвое больше энтропии одной чашки. Если две системы запутаны, тогда их объединенное квантовое состояние может быть точно известно, и в этом случае они как целое вообще не имеют энтропии; и все же каждая из них сама по себе может обладать значительной энтропией!

В случае черных дыр энтропия оказывается равной площади горизонта, деленной на постоянную, связанную с силой тяготения. Она вычисляется по формуле $S = A/4G_N$, где G_N – постоянная Ньютона, которая появляется и в уравнениях Эйнштейна. Эта формула столь много значит в теории черных дыр, что она обычно называется законом площадей. Из теорем классической общей теории относительности следует, что в ходе таких процессов, как столкновения черных дыр, общая площадь горизонтов черных дыр должна расти. Этот результат легко понять как версию второго начала термодинамики в приложении к черным дырам. При этом важно не забывать, что эти теоремы остаются классическими, то есть они справедливы только при отсутствии квантовых эффектов, таких как излучение Хокинга. Действительно, излучение Хокинга приводит к тому, что черные дыры медленно теряют массу, что означает уменьшение площади их горизонтов, однако этот процесс протекает крайне медленно.

Закон площадей говорит о том, что термодинамика черных дыр весьма отличается от термодинамики обычного вещества. И в самом деле, обычное вещество обычно имеет энтропию, пропорциональную объему. Вспомним, например, что две чашки воды обычно имеют энтропию, равную двойной энтропии одной чашки. Мы могли бы с тем же основанием утверждать, что энтропия воды пропорциональна ее массе, так как масса двух чашек воды равна удвоенной массе одной чашки. Пропорциональность энтропии черных дыр их площади, по-видимому, свидетельствует о том, что большие черные дыры имеют гораздо меньшую энтропию, чем мы могли бы наивно предполагать на основании информации об их объемах, но гораздо большую, чем на основании их масс. Чтобы проверить, насколько это предположение оправдывается, рассмотрим слияние двух черных дыр, каждая из которых имеет массу, равную солнечной, в одну. Наш мысленный эксперимент будет грубым, так как мы собираемся проигнорировать выброс гравитационных волн, который, как мы знаем из главы 6,

неприменно произошел бы при этом слиянии. Итак, образовавшаяся черная дыра будет иметь массу в две солнечных – вдвое больше, чем каждая из исходных. А энтропия слившейся черной дыры будет вчетверо больше энтропии каждой из исходных дыр. Это больше, чем мы могли бы предположить на основании наших сведений о массах компонентов, – ведь если энтропия пропорциональна массе, энтропия слившейся черной дыры была бы всего вдвое больше энтропии каждой из исходных черных дыр. С другой стороны, это меньше, чем мы могли бы предположить, опираясь на то, что мы знаем об объемах: с наивной точки зрения результирующая черная дыра заключает в себе восемь объемов каждого из исходных объектов, а у нас получается, что энтропия выросла только вчетверо. Правильное масштабирование вытекает из связи между энтропией и горизонтом: каждый раз при добавлении нового кубита энтропии горизонт увеличивается в G_N раз.

Бекенштейн сформулировал необыкновенно сильное утверждение: черные дыры несут в себе больше энтропии, чем любая другая форма вещества, способная занять тот же объем пространства-времени. Более простая версия этого утверждения выглядит так: для того, чтобы обычное вещество, уложенное в конечную область пространства-времени, обладало большой энтропией, этого вещества должно быть очень много – настолько, что дело начинает пахнуть гравитационным коллапсом. Прежде чем энтропия обычного вещества превысит теоретическую энтропию черной дыры, это вещество сколлапсирует в черную дыру. В этом смысле коллапс в черную дыру представляет собой самое неупорядоченное и необратимое событие из всех возможных.

Микроскопическое обоснование закона площадей предлагает – при некоторых ограниченных условиях – теория струн, но в целом этот закон из фундаментальных физических принципов не выводится. Однако Тед Якобсон утверждает, что если мы будем исходить из термодинамики черных дыр, в частности из закона площадей, объединив этот подход с некоторыми основными положениями дифференциальной геометрии, то придем к уравнениям Эйнштейна – основе общей теории относительности. Более того, известно, что если модифицировать уравнения Эйнштейна с сохранением их внутренней симметрии, закон площадей изменится, а вычисления Хокинга по сути останутся теми же. Так что выходит, что энтропия черной дыры – хороший инструмент для описания динамики пространства-времени. И все-таки, что же представляет собой энтропия черной дыры?

Недавно Хуан Малдасена и Леонард Сасскинд внесли предложение, которое должно более тесно увязать энтропию запутанности с энтропией черной дыры. Вот в чем это предложение состоит. Вспомним парадокс ЭПР, где два спина были вначале запутаны, а затем разделены, и парадоксальным образом ни один из них не имел определенного квантового состояния сам по себе, хотя оба вместе его имели. Каждый спин является кубитом, и каждый сам по себе имеет равное кубиту количество энтропии. Не могли бы мы предположить, что на некотором микроскопическом уровне каждый из них является черной дырой и что их запутанность геометрически проявляется в виде кротовой норы между ними? Тут есть два очевидных возражения. Во-первых, черная дыра только с одним кубитом энтропии так мала, что геометрические соображения могут для нее не иметь никакого значения. Во-вторых, как уже говорилось в главе 3, кротовые норы непроходимы. Чтобы понять, как можно обойти эти возражения, давайте сначала представим себе системы большего размера с большим числом возможных квантовых состояний и, следовательно, с большими значениями энтропии. Но при этом будем настаивать на том, что две из этих более крупных систем, которыми распоряжаются, как обычно, наши Алиса и Боб, идеально запутаны, так что их объединенное квантовое состояние точно определено. Выше мы в качестве примеров систем больших размеров брали бруски чистого магния, но теперь мы хотим использовать более сложное состояние вещества, которое через некоторое время должно сколлапсировать в черную дыру. Короче говоря, Алиса и Боб оказываются вдалеке друг от друга, каждый по отдельности в окрестности своей черной дыры, и по крайней мере значительная часть энтропии каждой из этих черных дыр обязана своим существованием квантово-механической запутанности между этими двумя системами. Затем мы предполагаем, что эти черные дыры соединены кротовой норой, и она является геометрическим проявлением их запутанности.

Но как можно было бы проверить эту идею? Рассмотрим мысленный эксперимент, в котором и Алиса, и Боб занимаются измерениями каждый в своей системе. Изучать на близком расстоянии систему, в которой происходит гравитационный коллапс, – рискованная затея, так как, по всей вероятности, в процессе измерений наблюдатель будет всосан в черную дыру. Это безрадостная перспектива даже в концептуальном смысле, так как она исключает возможность для Алисы и Боба выполнить свои измерения и затем сравнить их результаты для того, чтобы убедиться, что их системы действительно были запутаны.

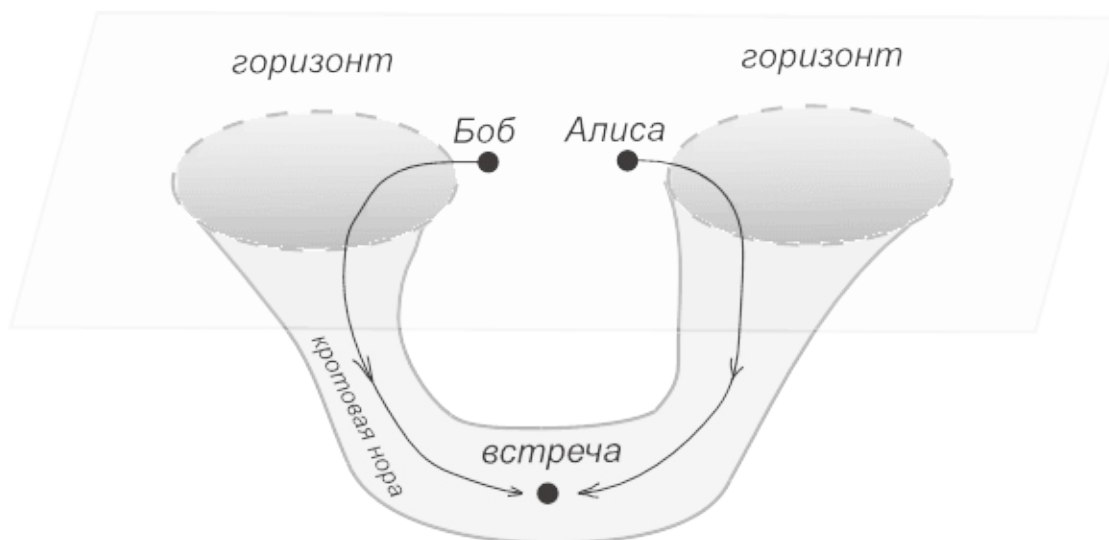


Рис. 7.3. Кротовая нора, соединяющая области пространства-времени вблизи Алисы и Боба соответственно. Кротовые норы, возникающие из запутанных квантовых состояний, позволяют Алисе и Бобу встретиться друг с другом, прыгая в черные дыры. Затем они еще могут успеть сверить свои квантовые запутанности, прежде чем их ждет роковое поглощение сингулярностью черной дыры.

Но постойте! Мы же допустили, что две наши черные дыры соединены кротовой норой! Алиса и Боб действительно могут быть затянуты в недра своих черных дыр, но так как их соединяет кротовая нора, то на самом деле эти черные дыры имеют одно и то же внутреннее пространство. Для единственного наблюдателя невозможно перебраться по кротовой норе из одного внешнего пространства в другое, но это оказывается вполне возможно для двух наблюдателей, которые входят в кротовую нору с двух противоположных концов внутреннего пространства и встречаются. Так что выходит, Алиса и Боб все же могли бы сравнить свои измерения. Это важный аргумент в первую очередь в пользу возможности образования кротовой норы: ведь если бы такая нора не могла образоваться, Алиса и Боб не могли бы сравнить результаты своих измерений, и сам принцип квантовой запутанности оказался бы в опасности. Для Алисы и Боба такой аргумент был бы слабым утешением, потому что за конечное время падения в свои черные дыры они бы столкнулись с обычными для черных дыр сингулярностями. Но, по крайней мере, они могли бы под конец выполнить последнюю и окончательную проверку принципов квантовой механики!

Отступим на минуту от этих интенсивных теоретических обсуждений

и зададим резонный вопрос: есть ли хоть какой-то практический интерес в мысленных экспериментах только что *описанного* вида, в ходе которых наблюдателям приходится прыгать в черные дыры? Наблюдатели, остающиеся снаружи, никогда не смогут удостовериться (по крайней мере, классическими средствами) в том, встретились Алиса и Боб или нет. Может, все это просто схоластика? По общему мнению теоретиков, нет. Мы должны помнить о том, что горизонты черной дыры – это вопрос нашей будущей судьбы, а не сиюминутного опыта. Возможно, мы все в этот момент пересекаем горизонт космической черной дыры, чья сингулярность отстоит от нас в будущем на большее время, чем то, которое отделяет нас от начала Вселенной. Многие космологи провидят в конце непрекращающегося расширения Вселенной ее окончательный коллапс. Так не может ли некоторое созидательное разрушение в конце самого пространства-времени открыть нашему восприятию нечто, о чем мы сейчас не можем и мечтать?

Эпилог

Мы не верим в путешествия во времени и не склонны к мистицизму. Но что, если бы мы могли написать письмо Альберту Эйнштейну, чтобы рассказать ему в нескольких словах о тяготении и черных дырах? Мы написали бы что-то вроде следующего.

Июль 2017

Дорогой Альберт, Прежде всего, Вы величайший гений. Ваше $E = mc^2$ — единственное физическое уравнение, известное буквально всем. Журнал «Тайм» назвал Вас человеком столетия. Анекдотов про Эйнштейна больше не рассказывают просто потому, что с первого слова все уже знают, в чем соль. Благодаря Вашим открытиям человечество наделало сикстильон сикстильонов ядерных зарядов и, как ни странно, пока еще с их помощью само себя не взорвало. Фактически атомные бомбы, сброшенные в конце Второй мировой войны, так и остались единственными ядерными зарядами, использованными для уничтожения людей.

Мы, пишущие Вам это письмо, очень интересуемся общей теорией относительности и черными дырами, потому что большой инструмент под названием LIGO зарегистрировал гравитационные волны, возникшие при столкновении двух черных дыр, которое случилось больше миллиарда лет назад. Мы написали книгу о черных дырах, и так как мы знаем, что Вас очень интересовало решение Шварцшильда и что, возможно, Вы сомневались иногда в его физическом смысле, мы подумали, что стоит рассказать Вам о том, что произошло за шестьдесят с лишним лет с тех пор, как Вы нас покинули.

Начнем с того, что в решении Шварцшильда называется «горизонтом событий». Если нырнуть под него, то назад уже никогда не выйдешь, разве что если двигаться быстрее света. Если Вы помните математическую формулу решения Шварцшильда, то знаете, что в нем возникали странные особенности, когда радиус был равен массе с точностью до ньютоновского множителя. В частности, времениподобная часть метрики исчезает: это то, что мы теперь называем функцией хода.

Это происходит как раз там, где находится горизонт событий. Еще у решения Шварцшильда есть странные особенности, когда радиус обращается в нуль, и лучшее, что мы можем предложить для их объяснения, – это что они соответствуют сингулярности пространства-времени, то есть месту, где сама геометрия больше не работает. Если войти в черную дыру Шварцшильда, придется столкнуться с этой сингулярностью, но мы понятия не имеем, что будет потом – и даже будет ли в этом случае какое-нибудь «потом».

Очень жаль, что Вы не увидели, как много всего мы поняли и открыли благодаря общей теории относительности за двадцать с лишним лет после Вас. В центре всех этих работ стоял Джон Уилер. Мы оба были знакомы с ним некоторое время в Принстоне, он умер в 2008 году. Именно благодаря ему стал популярен термин «черная дыра» для описания решения Шварцшильда и связанной с ним метрики. Новозеландец по имени Рой Керр нашел обобщение метрики Шварцшильда, описывающее вращающиеся черные дыры. Его метрика довольно сложная! Но она очень важна, так как именно она описывает конечное состояние коллапсирующих звезд, у которых момент импульса никогда не бывает нулевым. Теперь мы совершенно уверены в том, что во Вселенной множество черных дыр. Еще в 1930-х гг. Чандрасекар, Толмен, Оппенгеймер и Волков говорили, что если собрать очень много массы в одном месте, ничто не сможет помешать ей схлопнуться. Точное значение этой предельной массы вычислить трудно, но если после того, как звезда израсходует все свое ядерное горючее, в ней останется около трех солнечных масс, они обязательно коллапсируют в черную дыру. Что еще удивительнее, это то, что в центрах галактик находятся гораздо бóльшие черные дыры. В центре нашей Галактики, Млечного Пути, прячется черная дыра массой примерно в четыре миллиона Солнц – да, это не шутка! Сейчас общепризнано, что в центрах многих галактик есть гораздо большие черные дыры, возможно, имеющие массу в миллиарды солнечных. Мы не очень хорошо представляем себе, как они могли образоваться, но в случае Млечного Пути мы абсолютно уверены в существовании черной дыры, основываясь на форме орбит отдельных звезд в ее окрестности и измерениях гравитационных эффектов. А уж регистрация гравитационных

волн приемником LIGO – это просто потрясающе! По сути, LIGO представляет собой большой интерферометр Майкельсона с длиной плеча четыре километра. Аббревиатура LIGO означает «Лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория» (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Лазеры – это замечательные монохроматические источники света, так хорошо сфокусированные и такие мощные, что с их помощью можно сваривать металл, и одновременно настолько дешевые, что мы встраиваем их в современные проигрыватели вместо иголок. Летящих автомобилей у нас пока нет, но лазеры – классная штука. Так или иначе, вышло, что приемник LIGO был создан для серьезных научных измерений как раз в тот момент, когда на Землю пришла великолепная гравитационная волна. Это вышло почти случайно! Зарегистрированная картина замечательно укладывается в схему слияния двух черных дыр, каждая из которых имеет массу порядка 30 солнечных. И снова все восхищаются общей теорией относительности, потому что она смогла успешно описать как области сильного поля тяготения в окрестности черных дыр, где пространство-время практически разорвано на куски, так и области, где гравитационные поля очень слабы и где гравитационные волны можно сравнить с тихим шепотом, скользящим сквозь пространство-время.

И еще одна из Ваших идей прошла долгий путь развития – это идея космологической постоянной. Хотя Вы и называли ее своей крупнейшей ошибкой, сейчас мы думаем, что она представляет собой просто малую поправку в Ваших уравнениях поля. Но на больших масштабах расстояний она становится важной: астрономы не в состоянии объяснить недавнюю эволюцию расширяющейся Вселенной иначе, чем полагая, что целых 70 % всей энергии Вселенной берется из космологической постоянной, или, другими словами, из чего-то, что мы называем «темной энергией», но что, по сути, ведет себя именно как эта постоянная. Когда Вы вводили в свою теорию космологическую постоянную, то надеялись, что она поможет сохранить картину статической Вселенной. А на деле (держитесь крепче!) темная энергия, наоборот, ускоряет расширение Вселенной, делая его экспоненциальным. Или возьмем другое направление: поиски «объединенной теории всего» привели к интенсивным

исследованиям типов пространства-времени с отрицательной космологической постоянной. Общая теория относительности в пяти измерениях с отрицательной космологической постоянной естественно связана с квантовой теорией четырехмерной границы пространства-времени. Это почти означает, что квантовая теория как бы является проекцией общей теории относительности!

А мы – вы уж простите – твердо уверены, что квантовая теория верна. Как показал британский физик Стивен Хокинг, из квантовой теории следует, что черные дыры испускают излучение, хотя и с очень низкой температурой. Еще у черных дыр гигантская энтропия, несмотря на то что они почти уникальны в качестве решений Ваших уравнений поля. Если Вам от этого станет хоть немного легче, знайте, что статья, которую Вы написали вместе с Подольским и Розеном, оказалась очень важной. Используя идеи, связанные с этой статьей, люди сейчас даже пытаются построить квантово-механические компьютеры.

Многие принстонские профессора больше не ходят на работу в галстуках, но носки большинство из нас все-таки носит. Озеро Карнеги все так же прекрасно. Парусных лодок на нем немного, но у самого берега орел вьет гнездо. Мы пока не смогли построить единую теорию поля, но упорно пытаемся это сделать. Лучшее еще впереди.

Искренне Ваши,

Стив и Франс

notes

СНОСКИ

Для обычного поезда, идущего из Принстона в Нью-Йорк, эффект замедления времени составит примерно одну стомиллиардную долю секунды – так что не бойтесь из-за него опоздать на работу.

Идея эфира может показаться экстравагантной, но исторически она сыграла очень серьезную роль. В сущности, конструкция приемников LIGO тесно связана с так называемым интерферометром Майкельсона, который изначально и был построен в конце XIX века именно для измерения скорости света в различных направлениях с целью заметить движение Земли относительно эфира.

Вас может беспокоить, что на собственное время сильно повлияет исходное ускорение. По сути, исходя из принципа оптимального собственного времени, мы должны сравнивать траектории с одинаковыми начальным и конечным положениями, но, возможно, с различными начальными скоростями. Чтобы дать полное и точное объяснение парадокса близнецов и его гравитационного варианта, мы должны позволить Алисе иметь некоторую начальную скорость в момент, когда мы запускаем ее часы. А когда она возвращается в точку, где ее ждет Боб, она обладает некоторой конечной скоростью. Мы должны остановить часы в момент, когда Алиса и Боб встречаются, а значит, мы можем не беспокоиться о том, как именно она будет тормозить.

Многие современные теории предполагают существование пятого измерения или даже нескольких дополнительных измерений, но это не отменяет того факта, что для описания тяготения, с которым мы сталкиваемся в нашем ежедневном опыте, имеет значение только внутренняя кривизна четырехмерного пространства-времени.

В русский язык мы вводим этот термин впервые. В оригинале он соответствует английскому *zoom-whirl orbit*. – *Примеч. науч. ред.*

Замедление времени в соответствии со специальной теорией относительности также играет роль в покраснении фотонов, летящих прямо вверх с орбиты почти постоянного радиуса. Обычно интуиция говорит нам, что замедление времени «встроено» в эффект Доплера, но для фотонов, испускаемых под прямым углом к направлению движения источника, это не совсем так.

Поведение фотона несколько отличается от поведения Алисы и ее челнока, потому что фотоны лишены массы. В частности, круговая орбита фотона на полутора радиусах Шварцшильда является для него единственной круговой орбитой, тогда как для Алисы и ее челнока существует множество возможных круговых орбит, как устойчивых, так и неустойчивых.

Притяжение к Солнцу тоже вызывает приливы, но для простоты мы здесь об этом забудем и сосредоточимся на более сильном влиянии Луны.

Термин «эргорегион» здесь, по-видимому, впервые вводится в русский язык, хотя в английском *ergoregion* уже утвердился. Так называют область между эргосферой и горизонтом событий. – *Примеч. науч. ред.*

Вы могли бы возразить, что Земля не холодная; ее ядро раскалено почти до 6000 кельвинов. Это правда, но твердой Земле не нужно тепловое давление, чтобы удерживать ее массу от коллапса. Если бы мы могли представить себе, что Земля охладилась до температуры абсолютного нуля, оставшегося у нее электростатического давления и давления вырожденных электронов все равно было бы достаточно, чтобы уравновесить силу тяжести.

Обычное ядро атома железа, состоящее из 56 протонов и нейтронов, имеет самую маленькую среди всех элементов массу покоя на один нуклон. Но изотоп никеля с 62 протонами и нейтронами имеет более высокую энергию связи. Для того чтобы понять, почему обычные атомы железа образуются в большем количестве, чем никель-62, требуется довольно подробное знание теории эволюции звезд. Для целей нашего рассказа важно только, что наиболее устойчивые ядра принадлежат к группе железа и что на них естественным образом заканчивается процесс термоядерного синтеза элементов.

Это та самая потенциальная энергия, о которой мы говорили, обсуждая вопрос об орбитах в главе 4. Различие здесь в том, что кинетическая энергия, которую молекулы газа приобретают за счет уменьшения их потенциальной энергии при переходе на более близкую к черной дыре орбиту, равномерно распределяется по всей массе газа благодаря столкновениям соседних молекул. Этот процесс в результате регистрируется как соответствующий рост температуры газа. Гравитационная потенциальная энергия представляет собой тот тип энергии, который мы ассоциируем с объектами, находящимися на разных высотах относительно Земли. Ниже мы обсудим этот вид энергии и его связь с аккреционными дисками немного более подробно.

Заметим, что эта гравитационная потенциальная энергия отличается от энергии, которая возникает при вращении черной дыры благодаря процессу Пенроуза. У вращающейся черной дыры аккреционный диск отдает бóльшую долю потенциальной энергии потому, что вращение приближает ISCO к горизонту и отбор потенциальной энергии от газа продолжается на большем расстоянии его миграции. Как только вещество достигает ISCO-орбиты, оно поглощается черной дырой так быстро, что приобретенная им кинетическая энергия не успевает преобразоваться в тепло и нагреть окружающий газ.

Однако если мы мысленно сожмем Землю до размеров черной дыры, ее ISCO-орбита будет проходить на расстоянии нескольких сантиметров от ее центра, и тогда энергия воды, падающей на нее с расстояния ста метров, тоже будет гигантской.

Из-за расширения Вселенной расстояние между нами и местом столкновения черных дыр сейчас несколько больше, чем расстояние, которое прошли возникшие при столкновении гравитационные волны.

В природе примерами взрывов, происходящих в виде разлета почти идеально сферической или, по крайней мере, близкой к сферической оболочки являются некоторые сверхновые: несмотря на гигантское энерговыделение и огромное ускорение, с которым разлетается оболочка, при этом не возникает заметных гравитационных волн.

Впервые гравитационную волну от столкновения нейтронных звезд детекторы LIGO и европейский детектор Virgo зарегистрировали 17 августа 2017 года. Это событие наблюдалось и в широком диапазоне электромагнитных волн – от гамма-лучей до радиоволн. – *Примеч. науч. ред.*

Эти выпуклости аналогичны земным горным вершинам, но на поверхности нейтронных звезд из-за крайне высокой плотности вещества и сильных гравитационных полей высота таких «гор» не превышает нескольких миллиметров.

Космическая струна представляет собой очень тонкий, но крайне плотный поток энергии. Существование струн предсказывается некоторыми теориями, но пока ни разу не подтверждалось наблюдениями.

Парадоксальным образом хорошая стратегия в численном моделировании – разрешить сжатиям и растяжениям распространяться на несколько или даже на много междуточечных расстояний в сети, а не на одно-два, хотя в идеале проще всего представить себе взаимодействие только с ближайшей соседней точкой.

Информированный читатель мог бы беспокоиться тем фактом, что все электроны идентичны друг другу. В нашем обсуждении ни разу не упоминалось о необходимости введения каких-либо специальных свойств волновых функций, учитывающих идентичность частиц. Мы, например, могли бы взять для образования нашего комбинированного квантового состояния электрон и протон, но все равно не могли бы сказать, у какой из этих частиц спин направлен вверх, а у какой вниз.

Поверхностное тяготение можно определить и вычислить без привлечения температуры или квантовых эффектов, в терминах пространственного изменения гравитационного красного смещения с приближением наблюдателя к горизонту. Оно оказывается равным ускорению, которое испытал бы под воздействием ньютоновского тяготения гипотетический наблюдатель, находящийся на поверхности сферы с такими же радиусом и массой, как у черной дыры, – отсюда и название «поверхностное тяготение».