

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 вдобавок 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 вдобавок 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 враще-

ния) 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 кол-

лапс, пусть и короткий, то в результате должна образоваться какая-то форма сингулярности. В шварцшильдовском случае это всеобъемлющая и всесокрушающая 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 гори-

зонта 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 наблю-

дателя 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 первонач-



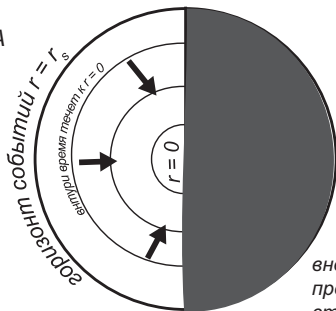
чально пересек. Зонд никогда не сможет вернуться в белую дыру, потому что, как и в шварцшильдовском случае, она теперь в его прошлом, а в будущем остается только новая черная дыра. Однако зонд может бесконечно повторять одни и те же стадии движения: нырять в очередную черную дыру, пересекать ее внутренний 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.

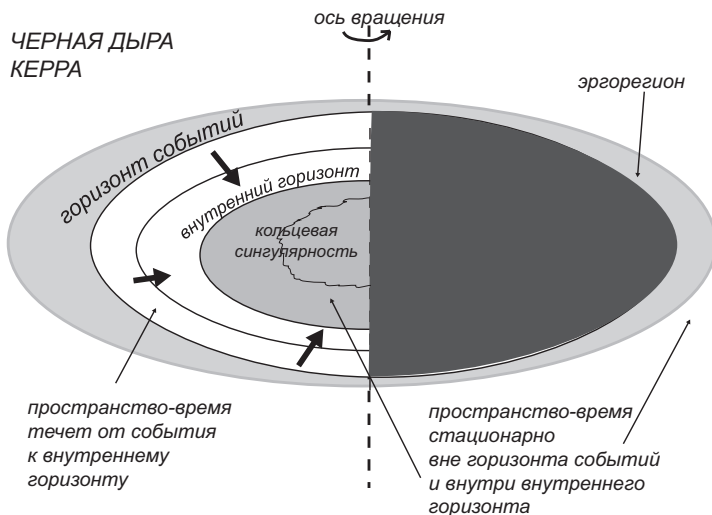
В сущности, в области замкнутых времениподобных кривых работает машина времени. Вдалеке от сингулярности не существует никаких замкнутых времениподобных кривых, и если не считать сил отталкивания в районе сингулярности, пространство-время выглядит совершенно обычно. Однако существуют траектории движения (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

ЧЕРНАЯ ДЫРА ШВАРЦШИЛЬДА



вне черной дыры пространство-время статично

ЧЕРНАЯ ДЫРА КЕРРА





**Рис. 4.3.** Схематический вид внутренней структуры черных дыр.

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 времениподобными 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).