

Уильям Дж. Кауфман

Главы из книги

"Космические рубежи теории относительности"

1977, перевод 1981

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к переводу

Предисловие

1. Ориентирование в пространстве-времени
 2. Пространство-время и специальная теория относительности
 3. Следствия частной теории относительности
 4. Гравитация и общая теория относительности
 5. Эксперименты в общей теории относительности
 6. Звезды и их эволюция
 7. Белые карлики, пульсары и нейтронные звезды
 8. [Черные дыры](#)
 9. [Геометрия решения Шварцшильда](#)
 10. [Черные дыры с электрическим зарядом](#)
 11. [Вращающиеся черные дыры](#)
 12. [Геометрия решения Керра](#)
 13. Наблюдения черных дыр
 14. [Белые дыры и рождение частиц](#)
 15. Гравитационные волны и гравитационные линзы
 16. Взрывающиеся галактики и массивные черные дыры
 17. Первичные черные дыры
- Последние теоретические результаты, касающиеся первичных черных дыр
- [Словарь терминов](#)

Уже несколько десятилетий не стихает интерес к **черным дырам** среди интересующихся астрономией и физикой. Постоянно задаются и обсуждаются примерно одни и те же вопросы. Действительно, эти объекты настолько необычны и так сильно противоречат обычному здравому смыслу, что на них трудно не задержать внимание. Однако ответы на эти вопросы уже есть, более того, они написаны хорошим и понятным языком. Часть из них вы найдете в этой книге.

Эта книга была написана 25 лет назад, уже в то время теория черных дыр продвинулась в своем развитии в такие дали, куда не скоро сможет "добраться" эксперимент. Существенная часть книги, посвященная смежным с теорией черных дыр вопросам (таким как эволюция звезд, образование нейтронных звезд и белых карликов, гравитационные линзы и первичные черные дыры), устарела и не воспроизводится. Вместо них мы постараемся дать ссылки на более современные обзоры. А вот по структуре и свойствам черных дыр за это время ничего лучшего так и не появилось (по крайней мере на русском языке).

Всем интересующимся черными дырами мы рекомендуем прочитать эти несколько глав из книги Кауфмана ...

8. Черные дыры

Еще в 1795 г. великий французский математик Пьер-Симон Лаплас теоретическим путем пришел к выводу, что свет не может уйти от тела, если оно достаточно массивно или достаточно сильно сжато. Даже из ньютоновской теории следует, что

если скорость убегания для какого-либо объекта превышает величину скорости света, то этот объект для внешнего наблюдателя будет казаться абсолютно черным. Но на протяжении почти двухсот лет никому не приходило в голову, что в природе могут действительно существовать черные дыры. Однако к середине 1960-х годов астрофизикам удалось рассчитать подробно структуру звезд и ход их эволюции. Теперь, зная больше, астрономы отчетливо понимают, что не может существовать устойчивых мертвых звезд, масса которых превышала бы три солнечных массы. Поскольку во Вселенной звезды, обладающие намного большими массами, - широко распространенное явление, астрофизики стали всерьез обсуждать возможность существования черных дыр, рассеянных повсюду во Вселенной.

Как мы узнали из предыдущей главы, черная дыра - это один из трех возможных вариантов конечной стадии эволюции звезд. Однако в отличие от белых карликов и нейтронных звезд черная дыра - это пустое место. Это то, что остается после катастрофического гравитационного коллапса массивной звезды, когда она умирает. При коллапсе - катастрофическом сжатии звезды - напряженность силы тяготения над ее поверхностью становится настолько чудовищно большой, что окружающее звезду пространство-время свертывается, и звезда исчезает из Вселенной; остается только исключительно сильно искривленная область пространства-времени.

Исследовать свойства черных дыр лучше всего, изучая, как движутся в этих сильно искривленных областях пространства-времени объекты - малые тела (материальные точки) и лучи света. Рассмотрим, например, черную дыру, изображенную на рис. 8.1. Представим себе, что на нее падают лучи света. Тот луч, который проходит очень далеко от черной дыры, отклоняется от своего обычного прямолинейного пути лишь совсем немного.

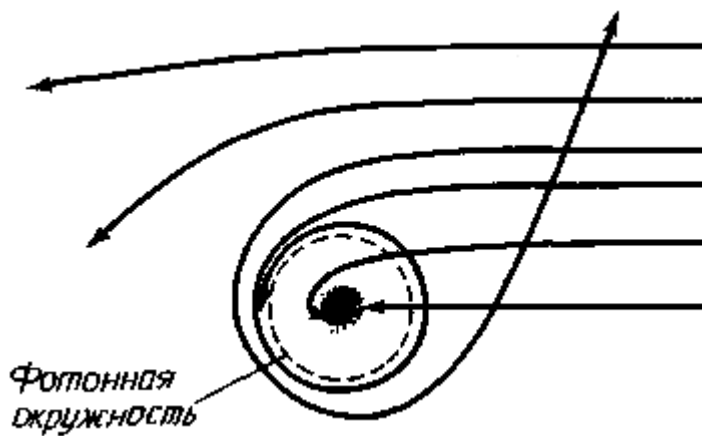


Рис. 8.1. Как идут световые лучи вблизи черной дыры? Лучи света отклоняются мощным гравитационным полем, окружающим черную дыру. Вдали от дыры лучи искривляются слабо. Если же луч проходит совсем рядом с дырой, она может захватить его на круговую орбиту или засосать в себя совсем.

Вдалеке от черной дыры пространство-время почти плоское, и там световые лучи распространяются прямолинейно. Это - важный факт. Утверждения в некоторых недавно опубликованных книжках, что черные дыры представляют угрозу для нас, совершенно неверны. Черные дыры не могут странствовать по Вселенной, "заглатывая" там и сям планеты, звезды и галактики. Всего в нескольких тысячах километров от

черных дыр с массой в 10-20 солнечных масс пространство-время практически плоское и релятивистские эффекты несущественны. Если однажды ночью Солнце с помощью какого-либо волшебства превратится в черную дыру, вы будете спокойно спать в своей постели, не замечая ничего необычного, по крайней мере пока не наступит утро. Рассвет не наступит, но Земля будет продолжать двигаться по своей орбите с радиусом 150 миллионов километров, как она это делала все предыдущие пять миллиардов лет.

Возвращаясь к рис. 8.1, отметим, что лучи света, проходящие ближе к черной дыре, отклоняются на более значительные углы. Когда свет распространяется через область пространства-времени с большей кривизной, его мировая линия становится все более искривленной. Можно даже направить луч света точно в таком направлении относительно черной дыры, чтобы этот свет оказался пойман на круговую орбиту вокруг дыры. Эта сфера вокруг черной дыры иногда называется "фотонной сферой" или "фотонной окружностью"; она образована светом, оббегающим вокруг черной дыры по всевозможным круговым орбитам. Каждая звезда во Вселенной посылает хоть немного света именно на такое расстояние от черной дыры, что этот свет захватывается на фотонную сферу.

Следует помнить, что эти круговые орбиты на фотонной сфере чрезвычайно неустойчивы. Чтобы понять смысл этого утверждения, представим себе почти

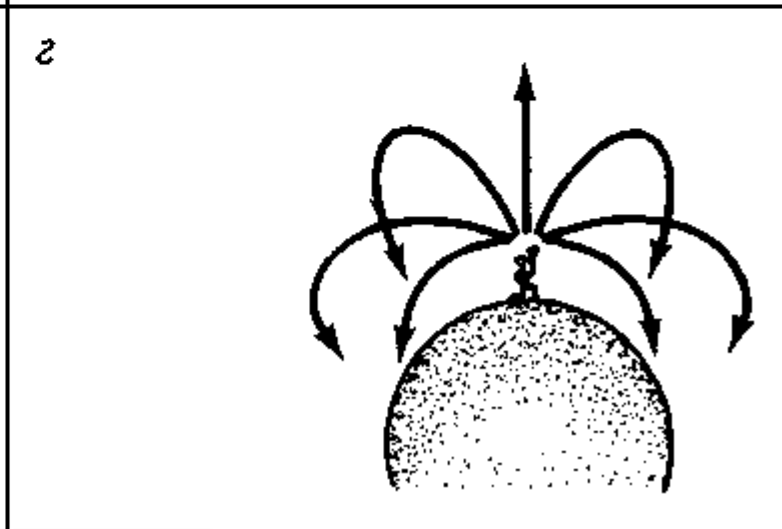
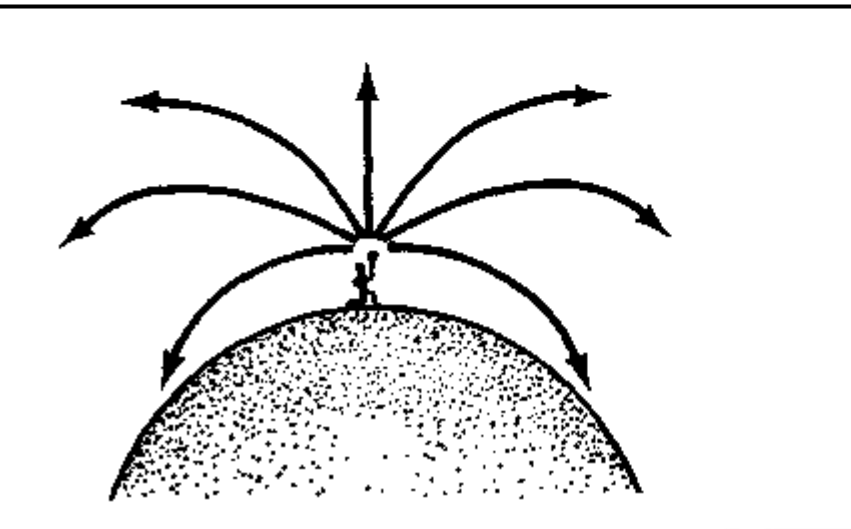
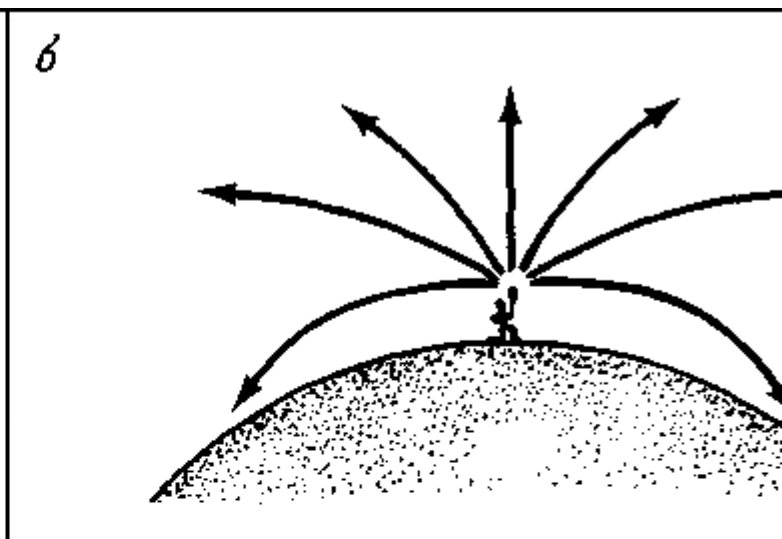
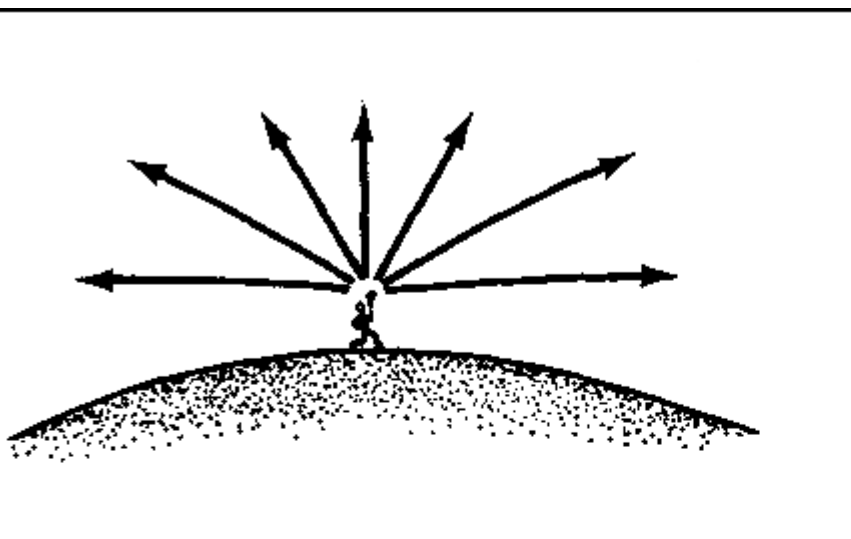
круговую орбиту Земли вокруг Солнца. Орбита Земли устойчива. Если Землю слегка толкнуть то не случится ничего особенного. Однако если луч света хоть немного отклонится от своего идеального кругового пути на фотонной сфере, то он очень быстро уйдет по спирали либо внутрь черной дыры, либо обратно в космическое пространство. Самое ничтожное возмущение, куда бы оно ни было направлено - внутрь или наружу, уводит свет с фотонной сферы. Именно в этом смысле говорят о неустойчивости всех круговых орбит на фотонной сфере.

Наконец, те лучи света, которые нацелены почти прямо на черную дыру, "всасываются" в нее. Такие лучи навсегда уходят из внешнего мира - черная дыра их буквально поглощает.

Представленный здесь сценарий описывает поведение самого простого из возможных типов черных дыр. В 1916 г., всего через несколько месяцев после того как Эйнштейн опубликовал свои уравнения гравитационного поля, немецкий астроном Карл Шварцшильд нашел их точное решение, которое, как оказалось впоследствии, описывает геометрию пространства-времени вблизи идеальной черной дыры. Это решение Шварцшильда описывает сферически симметричную черную дыру, характеризующуюся только массой. Породившая эту черную дыру гипотетическая умирающая звезда должна не вращаться и быть лишенной как электрического заряда, так и магнитного поля. Вещество такой умирающей звезды падает по радиусу "вниз" к центру звезды, и говорят, что получившаяся черная дыра обладает сферической симметрией. Если бы черная дыра возникала при коллапсе вращающейся звезды, то у нее было бы некое "привилегированное" направление, а именно дыра обладала бы осью вращения. Решение Шварцшильда свободно от подобных усложнений. Такая шварцшильдовская черная дыра представляет собою самый простой из всех возможных тип черной дыры. В этой и в следующей главе мы ограничимся рассмотрением лишь этого простого случая. Последующие главы будут посвящены электрически заряженным и вращающимся черным дырам.

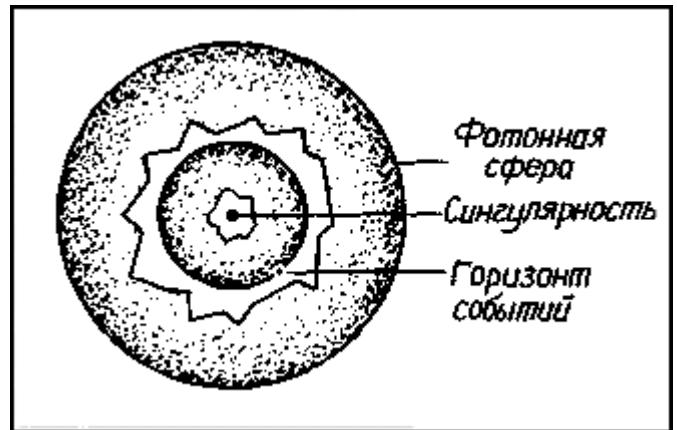
Понять природу шварцшильдовской черной дыры можно, рассматривая массивную (но не вращающуюся и не имеющую заряда) умирающую звезду в процессе гравитационного коллапса. Пусть некто стоит на поверхности такой умирающей звезды, у которой только что иссякло ядерное топливо (рис. 8.2). Непосредственно перед началом коллапса наш наблюдатель берет мощный прожектор и направляет

его лучи в разные стороны. Так как вещество звезды пока распределено в достаточно большом объеме пространства, гравитационное поле у поверхности звезды остается довольно слабым. Поэтому луч прожектора распространяется прямолинейно или почти прямолинейно. Однако после начала коллапса вещество звезды сжимается во все меньшем и меньшем объеме. По мере уменьшения размеров звезды тяготение у ее поверхности возрастает все больше и больше. Увеличение кривизны пространства-времени приводит к отклонению светового луча от прежнего прямолинейного распространения. Сначала лучи, исходящие из прожектора под малым углом к горизонту, отклоняются вниз к поверхности звезды (см. рис. 8.2,6). Но в дальнейшем, по мере развития коллапса, нашему исследователю приходится направлять лучи вверх все ближе к вертикали, чтобы они могли навсегда уйти от звезды. В конце концов на некоторой критической стадии коллапса исследователь обнаружит, что уже никакой луч не в состоянии уйти от звезды. Как бы наш исследователь ни направлял свой прожектор, его луч все равно изменяет свое направление так, что снова падает вниз, на звезду. Тогда говорят, что звезда прошла свой горизонт событий. Ничто, очутившееся за горизонтом событий, не может выйти наружу, даже свет. Исследователь включает свой радиопередатчик и обнаруживает, что он ничего не может передать оставшимся снаружи, поскольку радиоволны не способны вырваться за горизонт событий. Наш исследователь буквально исчезает из внешней Вселенной.



8.2 Как идут световые лучи от коллапсирующей звезды? Обреченный на гибель космонавт посылает лучи света с поверхности умирающей звезды (а) гравитационное поле было сравнительно слабым, и траектории световых лучей оказывались почти прямыми. На поздней стадии коллапса пространство-время около звезды сильнейшим образом искривлено, и световые лучи отклоняются очень заметно.

Термин "горизонт событий" - очень удачное название для той поверхности в пространстве-времени, из которой ничто не может выбраться. Это действительно "горизонт", за которым все "события" пропадают из виду. Иногда горизонт событий, окружающий черную дыру, называют ее поверхностью.



Зная решение Шварцшильда, можно рассчитать положение горизонта событий, окружающего черную дыру.

Рис. 8.3. Шварцшильдовская черная дыра. Простейшая идеальная черная дыра (незаряженная и не вращающаяся) окружена фотонной сферой. Сферический горизонт событий представляет собою "поверхность" черной дыры. В центре дыры находится сингулярность.

Например, поперечник сферы горизонта событий черной дыры с массой, равной 10 солнечным массам, составляет около 60 км. Как только умирающая звезда с массой в 10 солнечных масс сожмется до поперечника в 60 км, пространство-время столь сильно искривится, что вокруг звезды возникнет горизонт событий. В результате звезда исчезнет.

В момент, когда умирающая звезда уйдет за свой горизонт событий, ее размеры еще довольно велики, но никакие физические силы уже не смогут остановить ее дальнейшее сжатие. И звезда в целом продолжает сжиматься, пока, наконец, не прекратит свое существование в точке в центре черной дыры. В этой точке бесконечно давление, бесконечна плотность и бесконечна кривизна пространства-времени. Это "место" в пространстве-времени именуется сингулярностью.

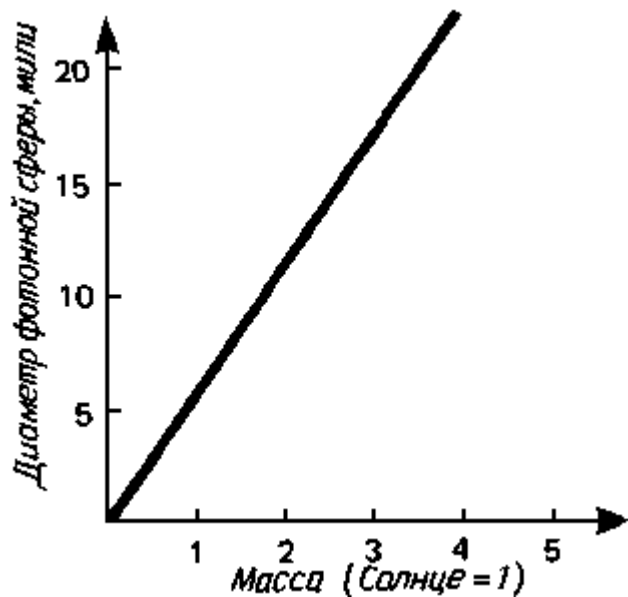


Рис. 8.4. Размеры фотонной сферы. График показывает, как зависит диаметр фотонной сферы, окружающей шварцшильдовскую черную дыру, от ее массы. Так, например, дыра с массой в 3 солнечных массы окружена фотонной сферой с поперечником около 26 км.

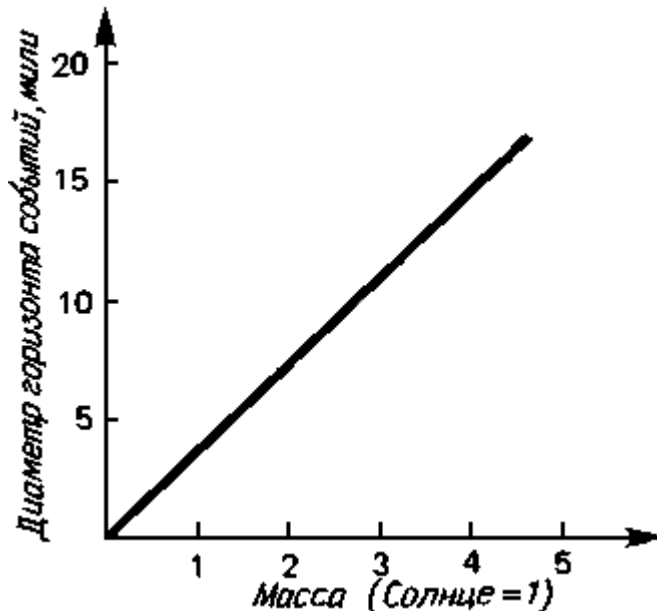


Рис. 8.5. Размеры горизонта событий. Поперечник горизонта событий, окружающей шварцшильдовскую черную дыру, зависит от ее массы. Например, дыра с массой в 3 массы Солнца окружена горизонтом событий с поперечником около 18 км.

Данные о структуре шварцшильдовской черной дыры подытожены на рис. 8.3. Прежде всего черную дыру окружает фотонная сфера, состоящая из лучей света, движущихся по неустойчивым круговым орбитам. Внутри фотонной сферы находится горизонт событий - односторонне пропускающая поверхность в пространстве-времени, из которой ничто не может вырваться. Наконец, в центре черной дыры находится сингулярность. Все то, что проваливается сквозь горизонт событий, засасывается в сингулярность, где оно под действием бесконечно сильно искривленного пространства-времени прекращает свое существование. На рис. 8.4 и 8.5 показаны соответственно зависимости между массой черной дыры и поперечниками ее фотонной сферы и горизонта событий.

После того как умирающая звезда заходит за свою фотонную сферу и приближается к горизонту событий, от нее в окружающую Вселенную может вырваться все меньше и меньше световых лучей. Иллюстрированные на рис. 8.2 эффекты становятся все более заметными. Подобный захват лучей света коллапсирующей звездой можно описать с помощью воображаемого конуса, показанного на рис. 8.6 и называемого конусом выхода. Навсегда уйти от звезды могут только те лучи, которые покидают ее в пределах конуса

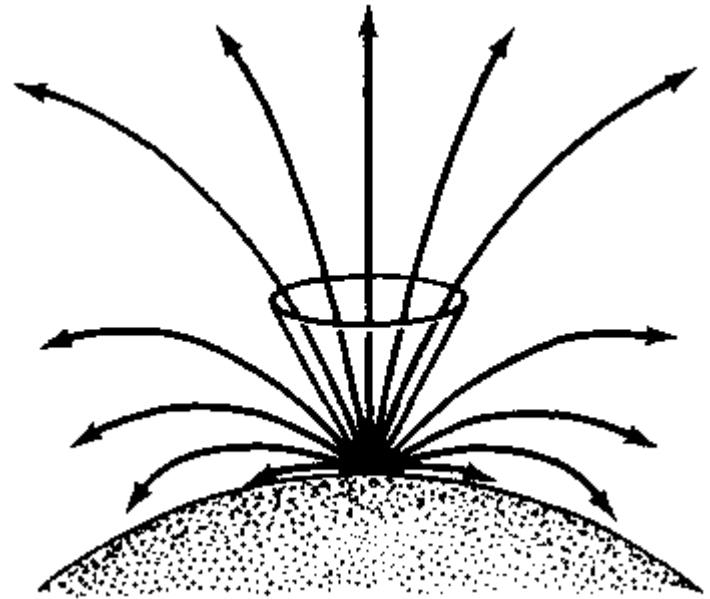


Рис. 8.6. Конус выхода. С помощью этого воображаемого конуса удобно разделять световые лучи на способные покинуть звезду и на те лучи, которые она от себя не отпускает. Уйти в окружающую Вселенную удастся только тем лучам, которые испущены с поверхности звезды под углами, заключенными во внутренней части конуса выхода.

выхода. Лучи же, идущие от поверхности звезды вне конуса выхода, отклоняются назад, к ее поверхности. По мере приближения катастрофического коллапса массивной звезды к его неизбежному концу, лучам света с поверхности звезды становится все труднее и труднее уйти навсегда от звезды. Эти уходящие вовне лучи должны быть испущены внутри все более сужающегося конуса с осью, направленной вдоль вертикали. Иными словами, по мере того как звезда подходит к своему горизонту событий, конус выхода схлопывается. Непосредственно над границей фотонной сферы конус выхода широко раскрыт. От звезды могут уйти лучи света, испущенные под любыми углами. Но когда звезда подходит к своему горизонту событий, конус выхода становится настолько узким, что все лучи света в конечном итоге заворачиваются назад к поверхности звезды. Поведение конуса выхода дает первое важное указание на то, как должна выглядеть звезда, превращающаяся в черную дыру. По мере схлопывания конуса выхода от звезды уходит все меньше и меньше света. Поэтому астроном, наблюдающий подобную звезду издалека, видит ее все более и более слабой. Фактически такое убывание яркости умирающей звезды происходит очень

быстро. Рассмотрим, например, образование черной дыры из звезды с массой в 10 солнечных масс. Как показано на рис. 8.7, с приближением поверхности звезды к горизонту событий ее яркость убывает с невероятной быстротой. Спустя всего $1/1000$ с после начала гравитационного коллапса конус выхода становится настолько узким, что лишь одна квадрильонная (10^{-15}) света звезды может ускользнуть во внешнюю Вселенную. Всего миг - и бывшая яркая звезда становится почти совершенно черной!

Одновременно с быстрым ослаблением яркости умирающей звезды вступает в игру и другой важный эффект. Вспомним, что в гл. 5 упоминалось о том, что тяготение вызывает замедление течения времени. Этот эффект именуется гравитационным красным смещением, ибо свет, испускаемый атомами, погруженными в гравитационное поле, "смещается" в сторону более длинных волн. Поэтому в ходе усиления гравитационного поля вблизи звезды

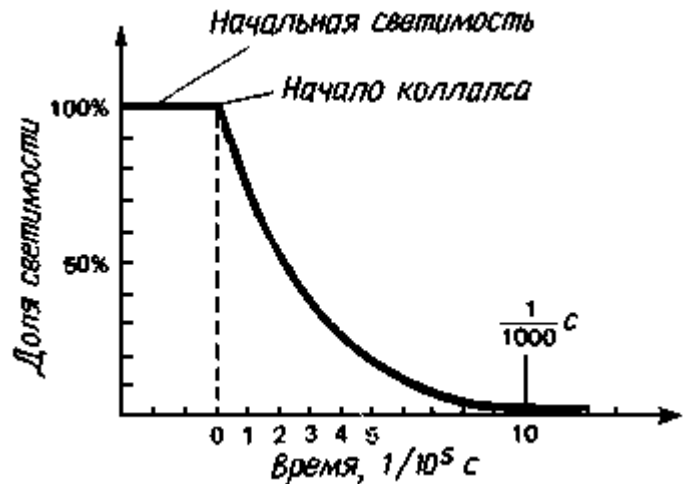


Рис. 8.7. Светимость коллапсирующей звезды. Сразу после начала конечного этапа коллапса звезда становится чрезвычайно слабой за очень короткий промежуток времени. График построен для звезды с массой 10 солнечных. Всего через $1/1000$ с светимость звезды падает до 2% первоначальной, а спустя $1/100$ с она составляет менее одной квадрильонной (10^{-15}) первоначальной.

в процессе ее коллапса свет, испускаемый атомами на поверхности этой звезды, испытывает все большее и большее красное смещение. Поэтому для наблюдающего ее со стороны астронома коллапсирующая звезда становится одновременно и слабой, и излучающей свет все более длинных (более "красных") волн.

Замедление хода времени, которое почти невозможно заметить в слабом гравитационном поле Земли, становится в процессе образования черной дыры фактором фундаментальной важности. Ведь на самом горизонте событий течение времени полностью останавливается (рис. 8.8). При объяснении этого утверждения нужно быть очень осторожным. Проиллюстрируем ситуацию, вообразив, что мы бросили в черную дыру камень. Допустим, вы выпустили этот камень из рук, находясь очень далеко от черной дыры, где пространство-время почти плоское.

Наблюдая движение камня, мы увидим, что по мере приближения к черной дыре он падает все быстрее и быстрее. Если бы была верна ньютоновская теория, то наш камень продолжал бы увеличивать скорость, и в тот момент, когда он врезался бы в сингулярность, он двигался бы практически с бесконечной скоростью. Но в столь сильных гравитационных полях ньютоновская теория не может давать правильных ответов. Оказывается, когда камень подлетает к горизонту событий, начинает преобладать действие замедления времени. Вы обнаружите, к своему удивлению, что камень начинает падать все медленнее и совсем останавливается на горизонте событий, потому что на этом горизонте для внешнего наблюдателя перестает течь время. Оставаясь вдалеке от черной дыры, мы должны прождать бесконечно долгий промежуток времени, чтобы увидеть, как камень пересечет горизонт событий.

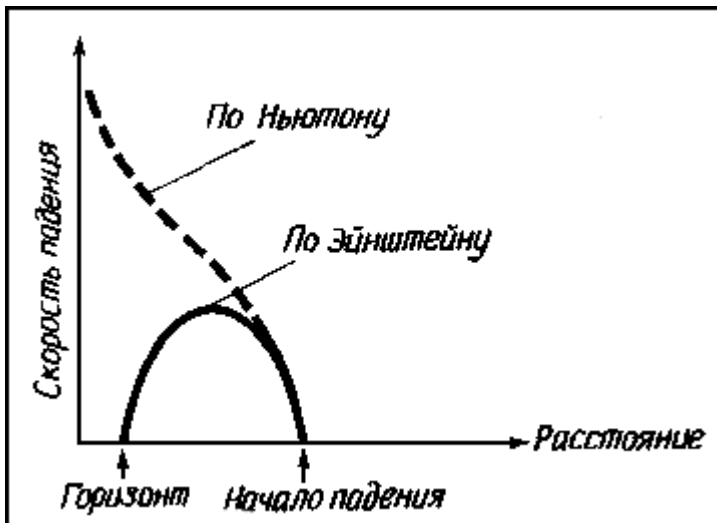


Рис. 8.8. Скорость тела при свободном падении. Удаленный наблюдатель видит, что свободное падение тела на черную дыру замедляется по мере того, как оно приближается к горизонту событий. Кажется, что на горизонте событий тело "застывает", ибо там останавливается течение времени.

Итак, мы никогда не увидим такого события, как пересечение камнем горизонта событий. Тот, кто падает вместе с камнем, будет наблюдать совершенно иную картину. Свободно падающий наблюдатель не сможет заметить замедления времени. Если вы попытаете сказать ему, что его часы идут замедленно, он решительно возразит. Он сравнит свои часы со всеми часами в своем космическом корабле, проверит их по скорости распада радиоактивных

изотопов и даже сверит их со своим пульсом. С точки зрения падающего наблюдателя, время продолжает у него идти так, как и раньше. Удаленный наблюдатель, находящийся в плоском пространстве-времени, объяснит эту странную ситуацию тем, что все, наблюдаемое падающим наблюдателем, замедлилось в одной и той же пропорции, включая его пульс, его процессы мышления и темп, в котором он стареет. Согласно утверждению удаленного наблюдателя, космонавт, падающий на черную дыру, никогда не достигнет горизонта событий; он останется живым навсегда в преддверии вступления в черную дыру в состоянии замедленной

жизнедеятельности, и ему потребуются многие миллиарды лет, чтобы преодолеть те несколько сантиметров, которые отделяют его от горизонта событий. Однако, согласно данным падающего наблюдателя, его часы отсчитывают время в своем обычном темпе. Поэтому он проскакивает за горизонт событий спустя весьма краткий срок, если судить по его часам. Однако сразу после прохождения через горизонт событий он обнаруживает нечто неладное. Подобно тому как на горизонте событий остановилось время для внешнего наблюдателя, внутри горизонта оно меняется ролями с пространством. Вдали от черной дыры, скажем у нас на Земле, человек способен перемещаться в трех пространственных измерениях (вверх и вниз, налево и направо, вперед и назад). Однако во временном измерении мы бессильны "ходить" туда и обратно. Мы безостановочно идем вперед во времени - от нашего рождения к старости и к смерти, хотим мы этого или нет. Внутри же горизонта событий роли пространства и времени меняются. Зло-частный космонавт, попавший под горизонт событий, начинает безостановочно увлекаться вперед в пространстве навстречу сингулярности! Он бессилён избежать рокового столкновения с сингулярностью. На рис. 8.9 показано, сколько времени может, самое большее, пройти по часам космонавта между моментами пересечения горизонта и прихода в сингулярность. Что бы он ни предпринимал, даже имея в своем распоряжении наимоощнейшие ракетные двигатели, он должен попасть в сингулярность спустя промежуток времени, не меньший, чем указано на этом графике. Например, пройдя под горизонт черной дыры с массой 6,5 солнечной массы, космонавт должен достигнуть сингулярности менее чем за $1/1000$ с.

Чтобы избежать путаницы, связанной с измерением времени, физики вводят два типа времени. Координатное время - это то время, которое измеряет наблюдатель, находящийся далеко от черной дыры (т.е. в плоском пространстве-времени). Собственное время - это то время, которое измеряет по своим часам свободно падающий наблюдатель. Времена эти разные. В координатном времени камню, брошенному в черную дыру, нужно лететь миллионы миллионов лет, чтобы приблизиться к горизонту событий. В собственном же времени, по часам, привязанным к падающему камню, последний уже через короткий промежуток времени пересечет этот горизонт. На рис. 8.10 сопоставлены промежутки

координатного и собственного времен, в течение которых тело падает на черную дыру с массой 10 солнечных масс с начального расстояния 90 км.

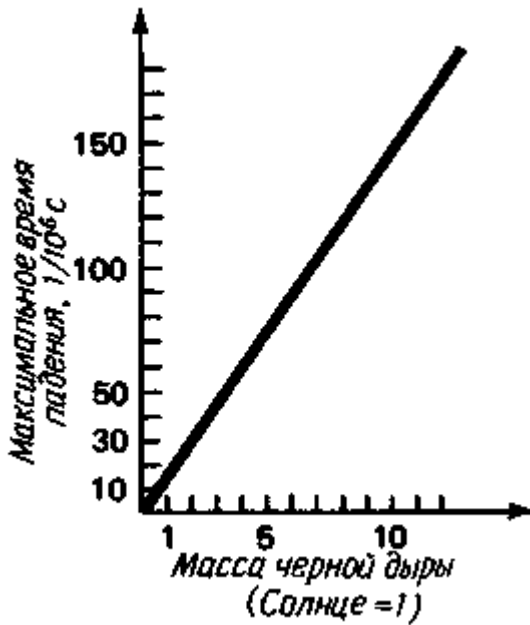


Рис. 8.9. Максимальное время падения с горизонта событий до сингулярности. Падающий наблюдатель, прошедший под горизонт событий, не может не попасть в сингулярность спустя промежуток времени, не меньший, указанного на графике.

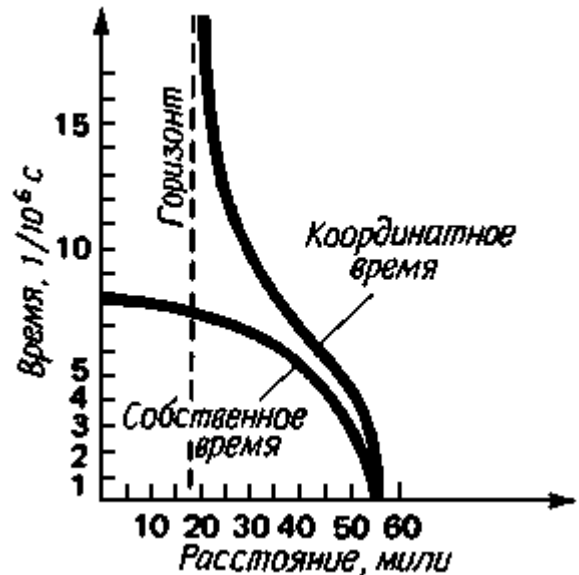


Рис. 8.10. Сравнение собственного и координатного времен. На графике показана связь между собственным и координатным временем для тела, падающего в черную дыру с массой 10 солнечных с начального расстояния 90 км. По своему собственному времени падающее тело врезается в сингулярность через 8 миллионов долей секунды. В координатном же времени оно никогда не достигнет даже горизонта событий.

Что касается человека, падающего на черную дыру, то следует уделить внимание и другим любопытным эффектам. Предположим, что вы падаете вниз ногами к черной дыре. Ваше падение все время свободное, так что вы находитесь в состоянии невесомости. Однако при сближении с черной дырой вы начнете ощущать нечто необычное, поскольку ваши ноги оказываются ближе к черной дыре, чем ваша голова. Дело в том, что ваши ноги будут падать быстрее, чем голова. В результате вас станет вытягивать в длинную тонкую нить. К моменту пересечения горизонта ваша длина может достичь сотни километров. Как видите, падение на черную дыру — занятие не из приятных. И в самом деле, еще задолго до того, как вы приблизитесь к фотонной сфере, ваше тело будет разорвано приливными силами невероятной мощи. Общая картина представлена на рис. 8.11.

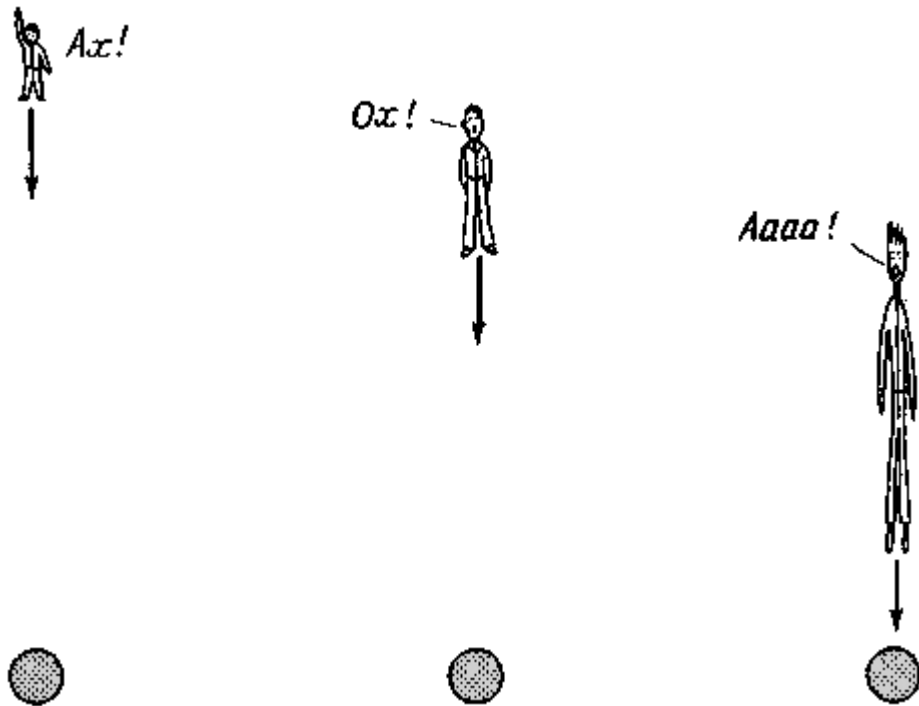


Рис. 8.11. Приливные силы. При падении на черную дыру наблюдатель растягивается и разрывается на части огромными приливными силами.

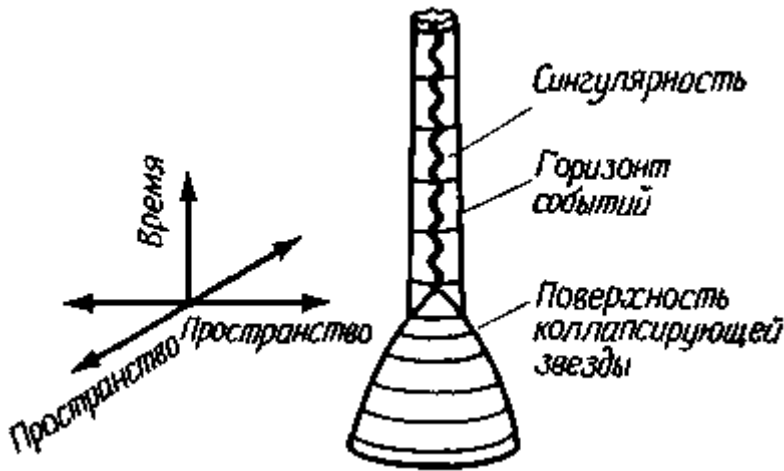


Рис. 8.12. Образование черной дыры. После того как в области с поперечником меньше 2 шварцшильдовских радиусов соберется достаточное количество вещества, вокруг последнего возникает горизонт событий. Затем захваченное вещество быстро падает на сингулярность в центре черной дыры.

Здесь внимательный читатель мог бы выразить недоумение. В конце концов, если наблюдатели в плоском пространстве-времени (например, астрономы на Земле) никогда не могут видеть, как что-нибудь опускается под горизонт событий, могут ли вообще возникать сами черные дыры? Не потребуется ли бесконечно длительный срок (с нашей точки зрения) для того, чтобы

поверхность умирающей звезды достигла горизонта событий? И да, и нет! Безусловно верно, что последние несколько атомов на поверхности коллапсирующей звезды никогда не уйдут за горизонт событий. Но дело не в этом. Как можно видеть из рис. 8.7, вся звезда становится практически черной уже спустя несколько тысячных секунды после начала коллапса. При формировании горизонта событий

можно считать, что почти вся звезда уже очутилась за горизонтом. Вещество под горизонтом событий очень быстро падает на сингулярность. Эту картину можно изобразить на трехмерной диаграмме пространства-времени (рис. 8.12). Для случая решения Шварцшильда радиус горизонта событий часто называют шварцшильдовским радиусом. Как только необходимое количество вещества уйдет под шварцшильдовский радиус, образуется горизонт событий, и это вещество оказывается в ловушке, где оно коллапсирует до самой сингулярности. А несколько замешкавшихся атомов из внешних слоев умирающей звезды так и не смогут никогда перебраться под горизонт событий и обречены вечно парить над поверхностью со шварцшильдовским радиусом. Но участь этих нескольких отставших атомов не представляет интереса ни для каких практических целей.

Разобраться в структуре черных дыр удобнее всего, представив себе воображаемое путешествие на космическом корабле, оборудованном большими смотровыми иллюминаторами. В ряде следующих глав мы используем такую "технику" и сможем узнать, что увидели бы бесстрашные астрономы, если бы они действительно отправились в путешествие к различным типам черных дыр, в сами эти дыры и даже сквозь них.

Вообразим себе космический корабль, показанный на рис. 8.13. Он снабжен двумя большими иллюминаторами. Носовой иллюминатор смотрит прямо в центр черной дыры, а кормовой - в противоположном направлении, позволяя обозревать окружающую Вселенную. Из каждого иллюминатора видна в точности половина всего неба. Кроме того, наш космический корабль обладает очень мощными ракетными двигателями, позволяющими ему удерживаться на разных высотах над горизонтом событий. На борту корабля находятся два астронома, которые фотографируют с различных расстояний от черной дыры все, что им видно из иллюминаторов.

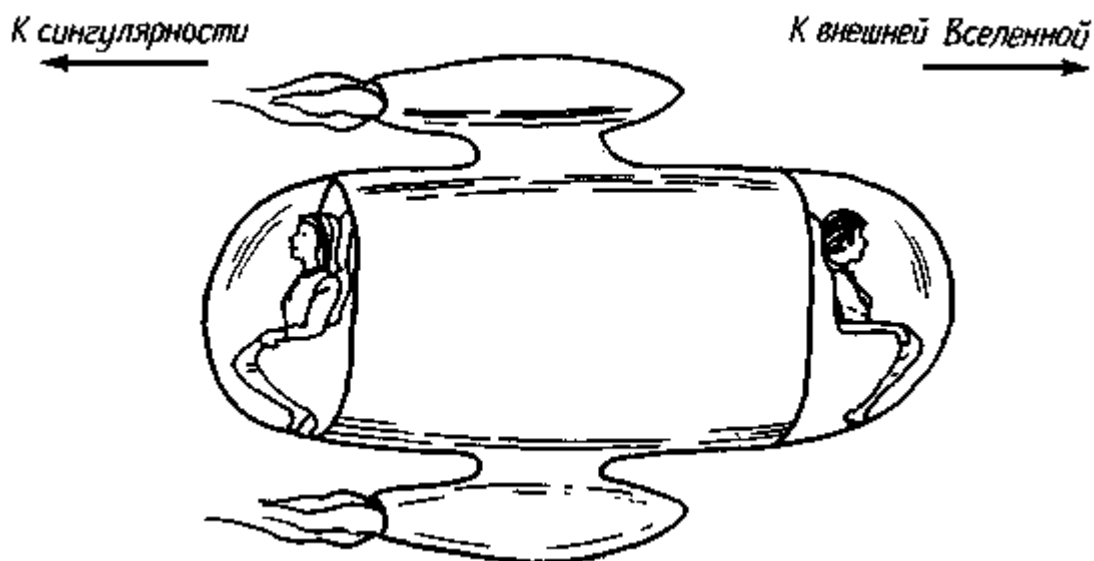


Рис. 8.13. Космический корабль. Два любознательных астронома решили выяснить, как же в действительности выглядит черная дыра. Для этого они построили космический корабль, снабженный двумя иллюминаторами. Носовой иллюминатор обращен прямо на середину черной дыры, а кормовой направлен во внешнюю Вселенную. Из каждого иллюминатора видна в точности половина небесной сферы. Корабль оборудован также мощными реактивными двигателями, с помощью которых космонавты могут зависать над черной дырой на разных высотах.

Для удобства наши космические астрономы выражают свое расстояние от черной дыры в шварцшильдовских радиусах, а не милях или километрах. Вспомним, что шварцшильдовский радиус - это радиус горизонта событий. Чем массивнее черная дыра, тем больше ее шварцшильдовский радиус. В табл. 8.1 приведены значения шварцшильдовского радиуса черных дыр, обладающих разными массами.

Эта таблица тесно связана с рис. 8.5. Поперечник горизонта событий черной дыры - это в точности удвоенная величина ее шварцшильдовского радиуса. Далее, раз поперечник горизонта событий равен удвоенному шварцшильдовскому радиусу, то поперечник фотонной сферы - это утроенный шварцшильдовский радиус.

Таблица 8.1

Шварцшильдовские радиусы черных дыр, обладающие разными массами

Масса черной дыры	Шварцшильдовский радиус
-------------------	-------------------------

	(радиус горизонта событий)
1 гльгль т	13 10^{-15} А
10^6 гльгль т	13 10^{-9} А
10^{12} т	13 10^{-3} А
10^{15} т	13 А
1 масса Земли	0,8 см
1 масса Юпитера	2,8 м
1 масса Солнца	3 км
2 массы Солнца	6 км
3 массы Солнца	9 км
5 масс Солнца	15 км
10 масс Солнца	30 км
50 масс Солнца	150 км
100 масс Солнца	300 км
10^3 масс Солнца	$3 \cdot 10^3$ км
10^6 масс Солнца	10 световых секунд
10^9 масс Солнца	2,8 свет. часов
10^{12} масс Солнца	117 свет. дней
10^{15} масс Солнца	320 свет. лет

Путешествие двух астрономов на нашем воображаемом космическом корабле начинается с того, что этому уникальному кораблю предоставляется возможность просто падать на черную дыру вдоль ее радиуса. На разных этапах сближения с дырой космонавты включают мощные ракетные двигатели, которые мгновенно останавливают падение корабля. В эти моменты покоя астрономы делают два снимка - один из носового иллюминатора (вид в сторону черной дыры), а другой - из кормового (вид назад на Вселенную). Корабль останавливался пять раз, и всякий раз делалась пара фотографий:

Снимок Расстояние от черной дыры

Фото А: Расстояние велико (много шварцшильдовских радиусов)

Фото Б: 5 шварцшильдовских радиусов

Фото В: 2 шварцшильдовских радиуса

Фото Г: На фотонной сфере (1.5 шварцшильдовского радиуса) сфере Прямо над горизонтом событий (чуть больше 1 шварцшильдовского радиуса)

На рис. 8.14 показано, где был космический корабль относительно черной дыры в моменты получения снимков.

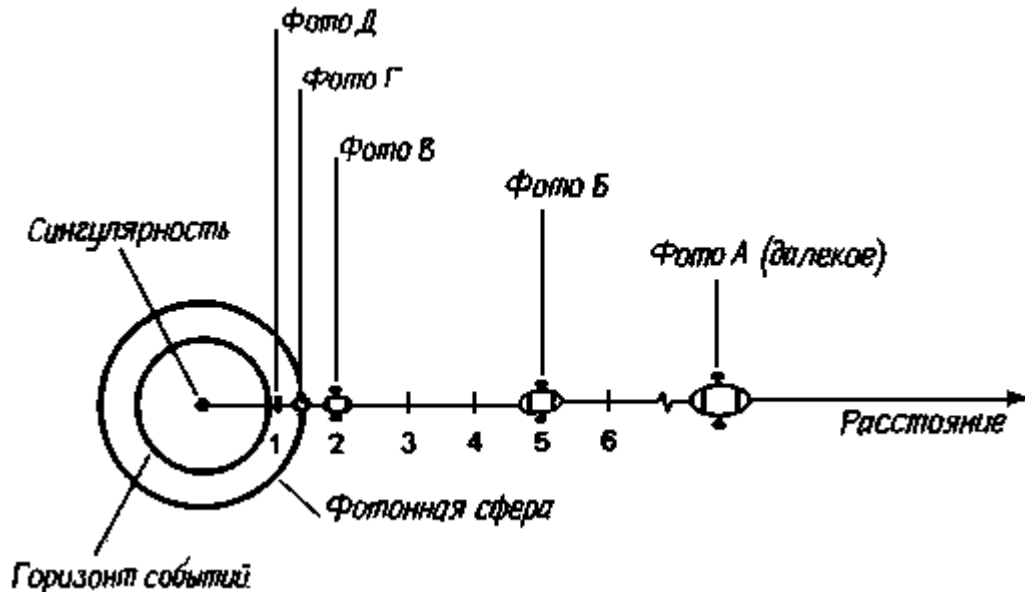


Рис. 8.14. Приближение космического корабля к черной дыре. Пять пар фотографий шварцшильдовской черной дыры сняты из указанных на рисунке точек.

На очень больших расстояниях от черной дыры сама дыра выглядела как маленькое пятно света в середине носового иллюминатора (рис. 8.15,А). Окружающее небо оставалось практически неискаженным, за одним важным исключением. Все звезды во Вселенной посылают хоть немного света в окрестности фотонной сферы. Этот свет кружит вокруг черной дыры раз-другой или больше, а затем его траектория раскручивается спиралью навстречу космическому кораблю. Поэтому астроном, проводящий наблюдения через носовой иллюминатор, видит многократные изображения всех звезд Вселенной, обрамляющие видимый "край" черной дыры. (Чтобы рис. 8.15,А-Д не получились перегруженными, все эти многократные изображения опущены.) Таким образом, вид неба около черной дыры будет весьма сложным и искаженным.

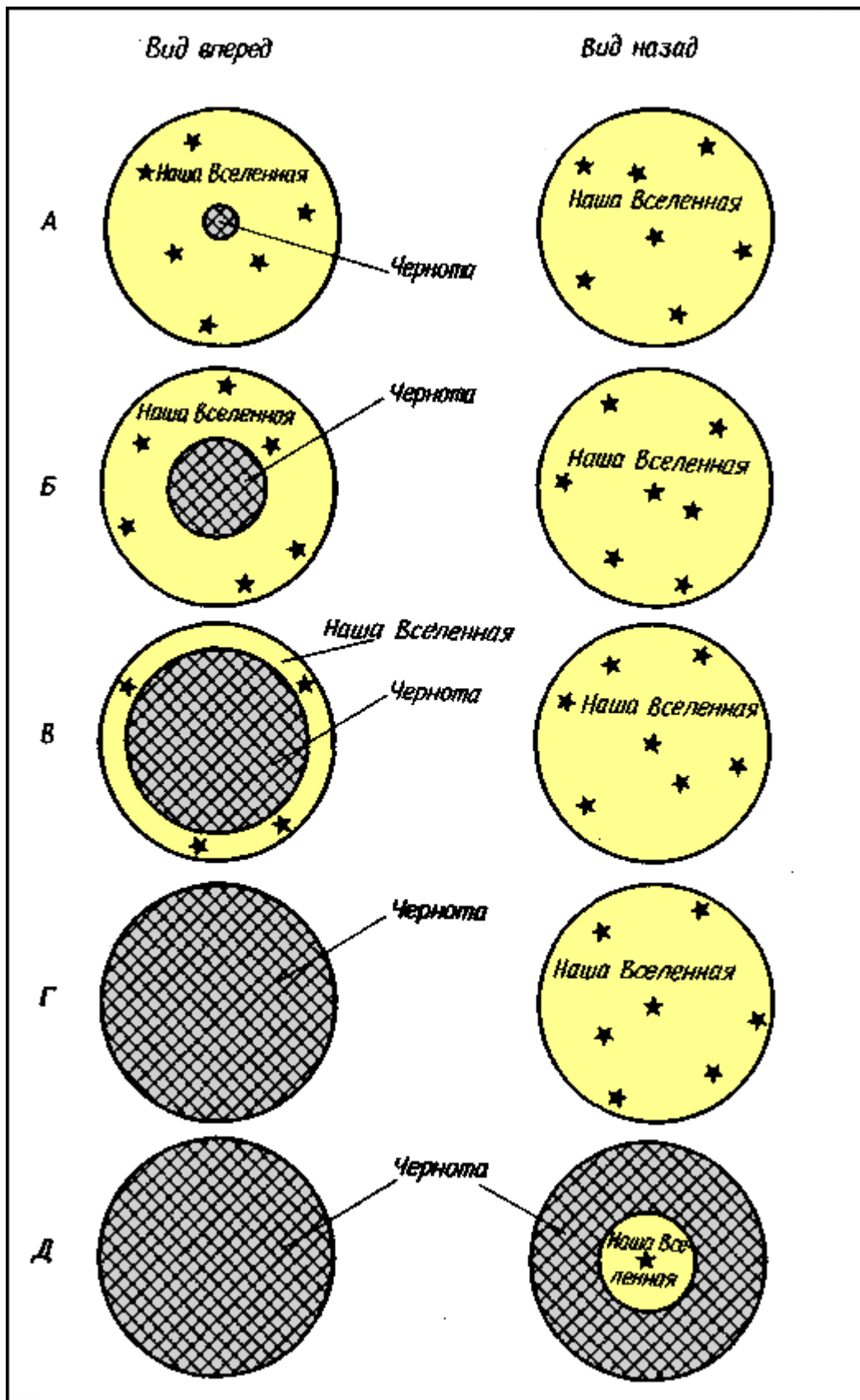


Рис. 8.15. Фото А: (вид издалека от черной дыры). Расстояние от черной дыры

равно многим шварцшильдовским радиусам. Черная дыра выглядит отсюда как маленькое черное пятнышко в центре поля зрения носового иллюминатора. Фото Б: (вид с расстояния 5 шварцшильдовских радиусов). При взгляде с 5 шварцшильдовских радиусов угловой поперечник черной дыры составляет около 46°; она занимает центральную часть поля зрения носового иллюминатора. Дали Вселенной все еще видны в кормовой иллюминатор, хотя там уже заметны некоторые искажения.

Фото В: (вид с расстояния 2 шварцшильдовских радиуса). При взгляде с 2 шварцшильдовских радиусов угловой поперечник черной дыры достигает 136°, и она закрывает большую часть поля зрения носового иллюминатора. Вид в кормовом иллюминаторе еще более искажен, чем на фото Б.

Фото Г: (вид с поверхности фотонной сферы). При взгляде с фотонной сферы (1.5 шварцшильдовского радиуса) черная дыра заполняет все поле зрения носового иллюминатора, так что ее угловой поперечник равен 180°. Вид назад также чрезвычайно искажен, особенно по краям поля зрения.

Фото Д: (вид с высоты в несколько метров над горизонтом событий). Прямо над горизонтом событий носовой иллюминатор сплошь черный. Кажущиеся "края" черной дыры теперь заполняют со всех сторон кормовой иллюминатор. Видимая через него внешняя Вселенная сжалась теперь в небольшой кружок с центром в направлении от черной дыры.

В 1975 г. Кэннингэм из Калифорнийского технологического института (США) провел ряд расчетов, которые помогли выяснить, как выглядит черная дыра, если глядеть на нее с разных расстояний. Рис. 8.15,Б показывает (на основании этих вычислений), что будет видно с расстояния в 5 шварцшильдовских радиусов. Так как космический корабль в этом случае находится вблизи черной дыры, она представляется большей, чем на рис. 8.15,А. На расстоянии в 5 шварцшильдовских радиусов (что соответствует расстоянию 150 км, если черная дыра имеет массу в 10 солнечных масс) угловой поперечник дыры равен примерно 56°. Вид же из кормового иллюминатора остается практически неискаженным.

С расстояния в 2 шварцшильдовских радиуса (60 км от черной дыры в 10 раз более массивной, чем Солнце) черная дыра - основной объект в небе перед космическим кораблем. Ее угловой поперечник вырос уже до 136° (рис. 8.15,В). Все видимое вокруг нее из носового иллюминатора небо чрезвычайно сильно искажено и заполнено многократными изображениями огромного количества звезд и галактик. Даже из кормового иллюминатора небо наблюдается уже сильно искаженным.

С "высоты" фотонной сферы (45 км от черной дыры в 10 раз массивней Солнца) изображение черной дыры занимает все поле зрения носового иллюминатора космического корабля, как видно на рис. 8.15,*Г*. По краям поля зрения кормового иллюминатора теперь видны бесчисленные многократные изображения.

По мере дальнейшего приближения космического корабля к горизонту событий черная дыра начинает просматриваться по краям поля зрения кормового иллюминатора. Вся внешняя Вселенная видна теперь как маленький кружок в центре кормового иллюминатора (рис. 8.15,*Д*). Размеры этого кружка определяются углом раствора конуса выхода, о котором мы упоминали выше. На самом горизонте событий (это примерно в 30 км от центра черной дыры в 10 раз более массивной, чем Солнце), где конус схлопывается, все звезды неба собираются в одной точке в центре поля зрения кормового иллюминатора.

Вспомним, что наш космический корабль снабжен мощными ракетными двигателями, способными остановить его падение на разных расстояниях от черной дыры, так что астрономы могут не спеша вести свои наблюдения. Однако гравитационное поле черной дыры настолько мощное, что уже на расстоянии нескольких шварцшильдовских радиусов двигатели ракеты должны работать на полную мощность. Еще задолго до того, как астрономы доберутся до точки, из которой они смогли бы сделать снимок *Б*, им придется испытать действие ускорения, составляющего тысячи g , которое буквально расплющит их о переборки корабля.

Чтобы избежать подобной участи, другие два астронома принимают решение совершить свободное падение на черную дыру до конца. Их космический корабль новейшей конструкции вообще лишен ракетных двигателей, которые замедляли бы его падение. Более того, чтобы избежать разрывающего действия приливных сил, произведена микроминиатюризация как космического корабля, так и самих космонавтов. Тем не менее они понимают, что и такая экспедиция равносильна самоубийству, ибо, попав под горизонт событий, они будут обречены упасть на сингулярность. Эти новые два астронома видят из иллюминаторов своего обреченного на гибель космического корабля совершенно иную картину. Однако, чтобы понять смысл этой картины, нам придется сначала рассмотреть вопрос о природе шварцшильдовской геометрии.

9. Геометрия решения Шварцшильда

В 1916 г., всего лишь через несколько месяцев после того, как Эйнштейн опубликовал свои уравнения гравитационного поля в общей теории относительности, немецкий астроном Карл Шварцшильд нашел решение этих уравнений, описывающее простейшую черную дыру. Шварцшильдская черная дыра "простая" в том смысле, что она сферически симметрична (т. е. у нее нет "предпочтительного" направления, скажем оси вращения) и характеризуется лишь массой. Поэтому здесь не учитываются те усложнения, которые вносят вращение, электрический заряд и магнитное поле.

Начиная с 1924 г. физики и математики начали осознавать, что в шварцшильдском решении уравнений гравитационного поля есть что-то необычное. В частности, у этого решения имеется математическая особенность на горизонте событий. Сэр Артур Эддингтон был первым, кто подобрал новую систему координат, в которой этот эффект отсутствует. В 1933 г. Жорж Лемэтр продвинул эти исследования дальше. Однако лишь Джон Лайтон Синг раскрыл (в 1950 г.) истинную сущность геометрии шварцшильдской черной дыры, открыв тем самым пути для последующих важных работ М. Д. Крускала и Г. Секереша в 1960 г.

Чтобы разобраться в деталях, выберем прежде всего трех ребят - Борю, Васю и Машу - и представим себе, что они парят в космосе (рис. 9.1). Всегда можно взять в космосе произвольную точку и определить положения всех троих, измеряя расстояния от них до этой точки. Например, Боря находится на расстоянии 1 км от этой произвольной начальной точки отсчета, Вася - в 2 км, а Маша - в 4 км. Характеристику положения в таком случае обычно обозначают буквой r и называют радиальным расстоянием. Таким путем можно выразить расстояние до любого объекта во Вселенной.

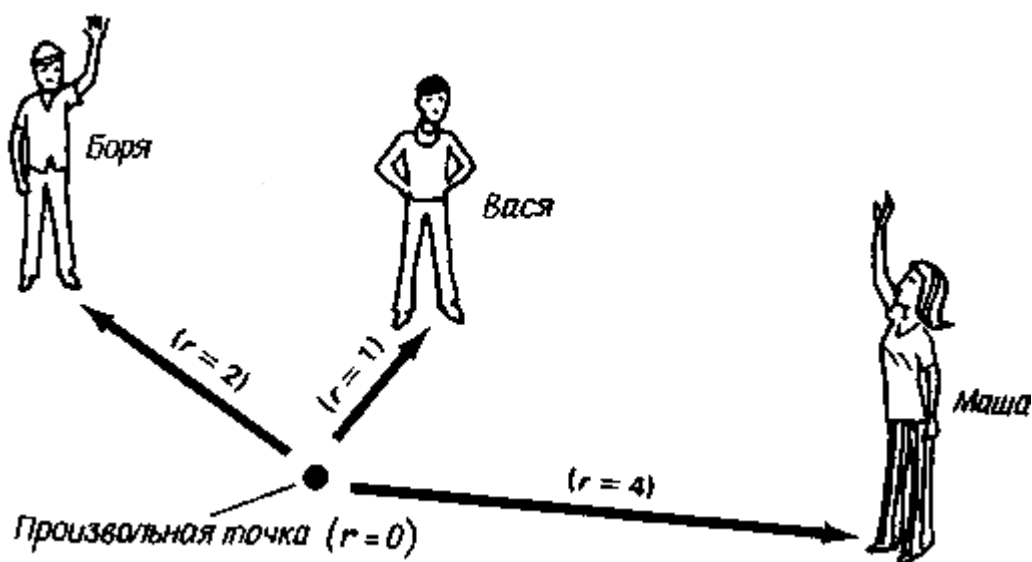


Рис. 9.1. *Расположение в пространстве.* Расположение каких-либо объектов в пространстве может быть охарактеризовано расстоянием по радиусу от произвольной начальной точки отсчета до каждого из объектов.

Заметим теперь, что наши три приятеля неподвижны в пространстве, но "перемещаются" во времени, ибо становятся все старше и старше. Эту особенность можно изобразить на пространственно-временной диаграмме (рис. 9.2). Расстояние от произвольной начальной точки отсчета ("начала") до другой точки в пространстве откладывается здесь вдоль горизонтальной оси, а время - вдоль вертикали. Кроме того, как и в частной теории относительности, удобно взять на координатных осях этого графика такие масштабы, чтобы лучи света описывались прямой с наклоном 45°. На такой диаграмме пространства-времени мировые линии всех троих ребят идут вертикально вверх. Они все время остаются на одних и тех же расстояниях от точки начала ($r=0$), но постепенно становятся все старше и старше.

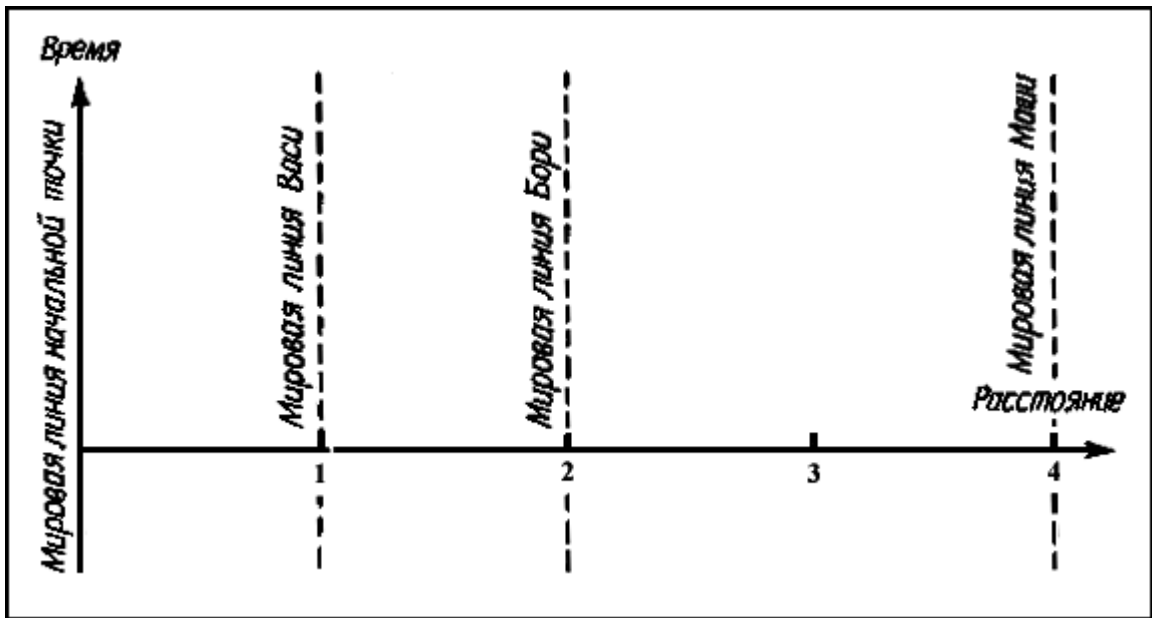


Рис. 9.2. Диаграмма пространства-времени. Можно построить такую диаграмму пространства-времени, на которой по пространственной оси откладывается радиальное расстояние от произвольной точки начала отсчета. Масштабы, отложенные по осям, таковы, что световые лучи распространяются по прямым с наклоном 45°.

Важно осознать, что левее точки $r = 0$ на рис. 9.2 вообще ничего нет. Эта область соответствует чему-то, что можно назвать "отрицательным пространством". Так как невозможно находиться "на расстоянии минус 3 м" от какой-либо точки (начала отсчета), то расстояния от начала всегда выражаются положительными числами.

Перейдем теперь к шварцшильдовской черной дыре. Как уже говорилось в предыдущей главе, такая дыра состоит из сингулярности, окруженной горизонтом событий на расстоянии 1 шварцшильдовского радиуса. Изображение такой черной дыры в пространстве дано на рис. 9.3 слева. При изображении черной дыры на пространственно-временной диаграмме произвольную точку начала отсчета координат для удобства совместим с сингулярностью. Тогда расстояния измеряются непосредственно от сингулярности по радиусу. Получившаяся диаграмма пространства-времени изображена на рис. 9.3 справа. Подобно тому как наши приятели Боря, Вася и Маша изображаются на рис. 9.2 вертикальными мировыми линиями, мировая линия горизонта событий идет вертикально вверх в точности на 1 шварцшильдовский радиус правее мировой линии сингулярности, которая на рис. 9.3 изображена пилообразной линией.

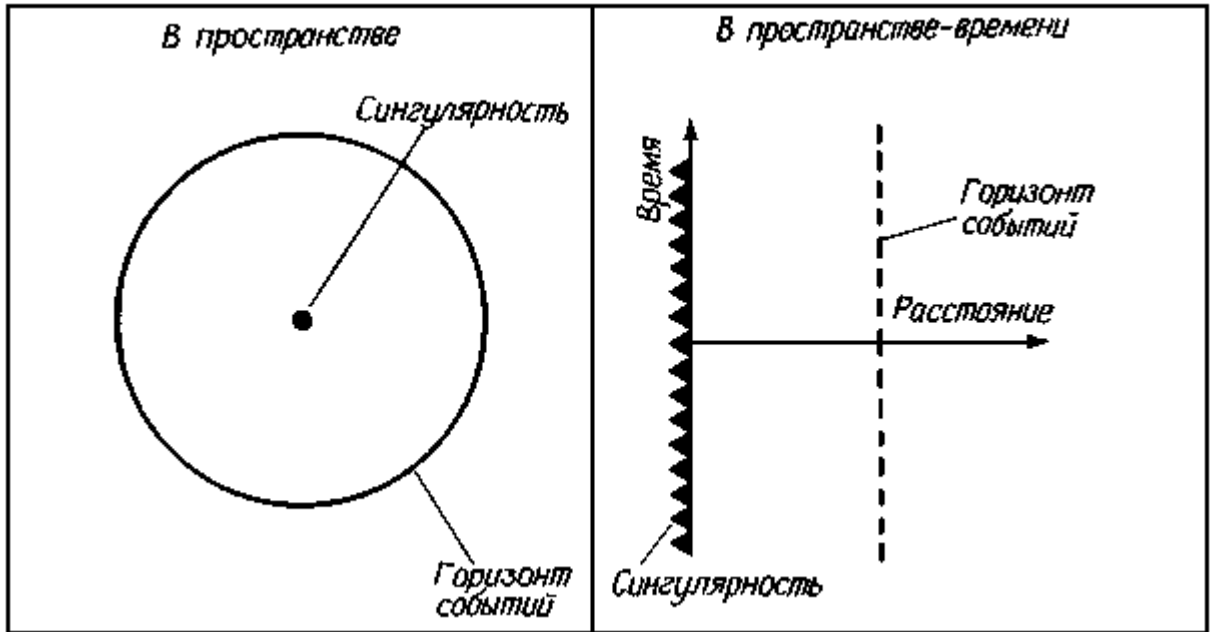


Рис. 9.3. Черная дыра в пространстве и в пространстве-времени. Шварцшильдовская черная дыра изображена слева в пространстве. Она состоит из сингулярности, окруженной горизонтом событий. Справа дана диаграмма пространства-времени для той же дыры. Расстояние измеряется радиально от сингулярности.

Хотя в рис. 9.3, изображающем шварцшильдовскую черную дыру в пространстве-времени, как будто нет ничего загадочного, к началу 1950-х годов физики начали понимать, что этой диаграммой суть дела не исчерпывается. У черной дыры имеются разные области пространства-времени: первая между сингулярностью и горизонтом событий и вторая за пределами горизонта событий. Мы *не смогли* полностью выразить в правой части рис. 9.3, как именно связаны между собой эти области.

Чтобы разобраться во взаимосвязи между областями пространства-времени внутри и вне горизонта событий, представим себе черную дыру с массой в 10 солнечных масс. Пусть из сингулярности вылетает астроном, пролетает через горизонт событий наружу, поднимается на максимальную высоту в 1 миллион

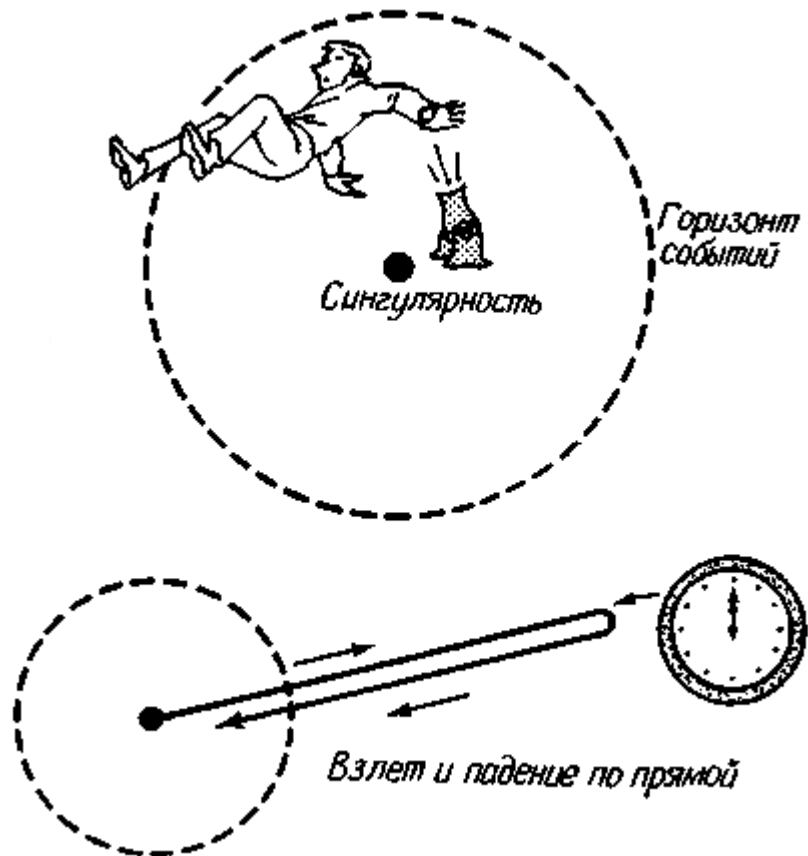


Рис. 9.4. Увлекательное путешествие. Астроном вылетает из сингулярности черной дыры с массой 10 солнечных масс, поднимается над горизонтом событий и достигает максимальной высоты 1 млн. км. На верхней точке траектории его часы (измеряющие собственное время) синхронизируются с часами удаленных ученых (измеряющих координатное время). Затем астроном снова радиально падает на черную дыру, опускается под горизонт событий и попадает в сингулярность.

километров над черной дырой, а затем падает обратно, сквозь горизонт событий, и снова падает в сингулярность. Полет астронома изображен на рис. 9.4.

Внимательному читателю это может показаться невозможным - ведь из сингулярности выскочить вообще нельзя! Ограничимся тем, что сошлемся на чисто математическую возможность такого путешествия. Как станет видно из дальнейшего, полное решение Шварцшильда содержит как черную, так и белую дыру. Поэтому на протяжении нескольких следующих разделов от читателя потребуется терпение и внимание. Здесь и в последующих главах мы будем иллюстрировать изложение с помощью путешествий астрономов или космонавтов к черным дырам. Для удобства будем говорить о космонавте просто "он".

Астроном-путешественник имеет с собой часы, чтобы измерять свое собственное время. У домоседов-ученых, следящих за его полетом с расстояния в 1 миллион

километров от черной дыры, тоже имеются часы. Пространство там плоское, и часы измеряют координатное время. При достижении высшей точки траектории (на расстоянии миллиона километров от черной дыры) *все* часы ставятся на один и тот же момент (синхронизируются) и теперь показывают 12 ч дня. Тогда можно вычислить, в какой момент (как по собственному времени путешественника, так и по координатному времени) астроном попадет в каждый интересующий нас пункт своей траектории.

Напомним, что часы астронома измеряют его собственное время. Поэтому по ним нельзя заметить "замедления хода времени", обусловленного эффектом гравитационного красного смещения. При заданных значениях массы черной дыры и высоты над ней высшей точки пути расчеты приводят к следующему результату:

В собственном времени астронома

1. Астроном вылетает из сингулярности в 11 ч 40 мин утра (по своим часам).
2. Через $1/10\ 000$ с после 11 ч 40 мин он перелетает через горизонт событий во внешний мир.
3. В 12 ч дня он достигает максимальной высоты в 1 миллион километров над черной дырой.
4. За одну $1/10\ 000$ с до 12 ч 20 мин дня он пересекает горизонт событий, двигаясь внутрь.
5. Астроном возвращается в сингулярность в 12 ч 20 мин дня.

Иными словами, на движение от сингулярности до горизонта событий и обратно ему нужно одно и то же время - $1/10\ 000$ с, тогда как на перемещение от горизонта событий до высшей точки своей траектории и наоборот он затрачивает всякий раз 20 мин (за 20 мин он проходит 1 миллион километров). Следует иметь в виду, что собственное время при полете течет стандартным образом.

Проводящие издалека наблюдения ученые измеряют по своим часам координатное время; их вычисления дают следующие результаты:

В координатном времени

1. Астроном вылетает из сингулярности в 11 ч 40 мин утра.
2. Он выходит через горизонт событий во внешний мир миллиарды лет назад (точнее, в году под номером $-\infty$).
3. В 12 ч дня он достигает максимальной высоты в 1 миллион километров над черной дырой.

4. 4. Он пересекает горизонт событий, двигаясь внутрь, через миллиарды лет в будущем (точнее, в году под номером $+\infty$).
5. 5. Астроном возвращается в сингулярность в 12 ч 20 мин дня.

Конечно, все согласны в том, что астроном-путешественник достигает максимальной высоты полета в 12 ч дня, т.е. в тот момент, в который синхронизируются все часы. Все также будут согласны и в том, когда астроном вылетает из сингулярности и когда он возвращается в нее. Но в остальном шварцшильддовская геометрия явно ненормальна. Вылетев из сингулярности, астроном перемещается в координатном времени *вспять во времени* до года $-\infty$. Затем он снова мчится вперед во времени, достигает максимальной высоты полета в полдень, а опускается под горизонт событий в год $+\infty$. После этого он снова перемещается *вспять во времени* и попадает в сингулярность в 12 ч 20 мин дня. На диаграмме пространства-времени его мировая линия имеет вид, показанный на рис. 9.5.

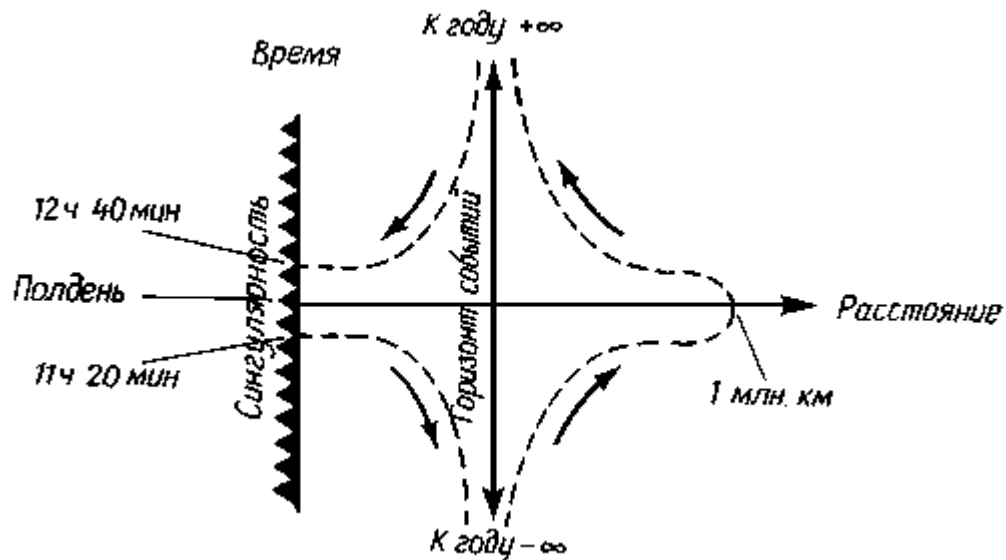


Рис. 9.5. Путешествие в координатном времени. На этой диаграмме пространства-времени изображена траектория движения астронома из черной дыры и обратно. Он выходит через горизонт событий в отдаленном прошлом и снова пересекает горизонт событий (на этот раз внутрь) в далеком будущем.

Кое-что из этих странных выводов можно понять интуитивно. Вспомним, что с точки зрения удаленного наблюдателя (часы которого измеряют координатное время) на горизонте событий время останавливается. Вспомним также, что камень или любое другое тело, падающее на горизонт событий, *никогда* не дойдут до точки с высотой шварцшильддовского радиуса в представлении далекого наблюдателя. Поэтому

падающий в черную дыру астроном не может пересечь горизонта событий вплоть до года $+\infty$, т. е. в бесконечно отдаленном будущем. Так как все путешествие симметрично относительно момента 12 ч дня (т.е. взлет и падение занимают одно и то же время), то далекие ученые *должны* наблюдать, что астроном поднимался, двигаясь к ним, в течение миллиардов лет. Он должен перейти наружу горизонт событий в год $-\infty$.

Еще непонятнее тот факт, что удаленные наблюдатели видят *двух* движущихся астрономов. Так, например, в 3 ч дня они видят одного астронома, падающего на горизонт событий (движущегося вперед во времени). Однако, согласно их же расчетам, *должен* существовать и другой астроном внутри горизонта событий, падающий на сингулярность (и движущийся вспять во времени).

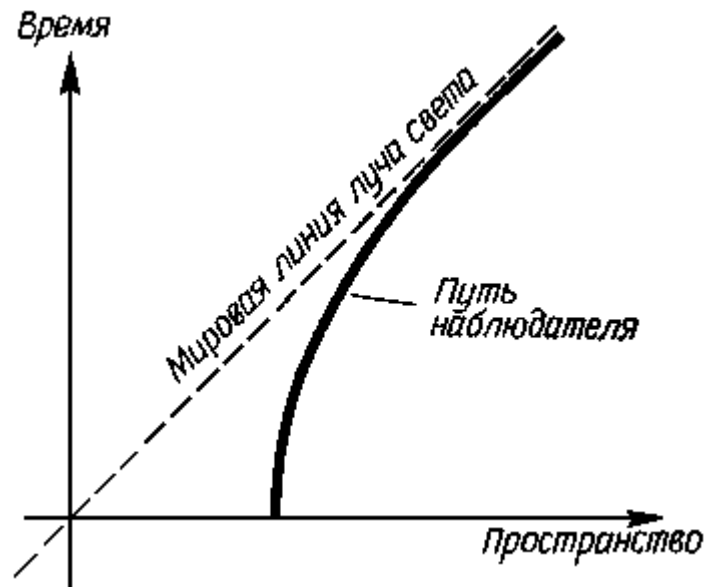
Конечно, это бессмыслица. Точнее, такое странное поведение координатного времени означает, что изображенная на рис. 9.3 картина шварцшильдской черной дыры попросту не может быть верна. Приходится поискать другие - причем их может быть множество - истинные диаграммы пространства-времени для черной дыры. В той простой диаграмме, которая показана на рис. 9.5, одни и те же области пространства-времени оказываются перекрытыми дважды, поэтому и наблюдаются сразу два астронома в то время, как на самом деле существует только один. Значит, нужно развернуть или преобразовать эту простую картинку таким образом, чтобы выявить истинную, или *глобальную*, структуру всего пространства-времени, связанного со шварцшильдской черной дырой.

Чтобы лучше понять, как должна выглядеть эта глобальная картина, рассмотрим горизонт событий. На упрощенной двумерной диаграмме пространства-времени (см. правую сторону рис. 9.3) горизонт событий это линия, идущая от момента $-\infty$ (отдаленное прошлое) к моменту $+\infty$ (далекое будущее) и находящаяся Точно на расстоянии 1 шварцшильдского радиуса от сингулярности. Такая линия, конечно, правильно изображает расположение поверхности сферы в обычном трехмерном пространстве. Но когда физики попробовали вычислить объем этой сферы, они, к своему изумлению, обнаружили, что он равен *нулю*. Если объем некоторой сферы равен нулю, то это, конечно, просто точка. Иными словами, физики стали подозревать, что данная "линия" на упрощенной диаграмме должна быть в глобальной картине черной дыры на самом деле точкой!

Представьте себе к тому же произвольное число астрономов, выскакивающих из сингулярности, взлетающих на разные максимальные высоты над горизонтом событий и снова падающих обратно. Вне зависимости от того, когда именно они были выброшены из сингулярности, и от того, на какую именно высоту над горизонтом событий взлетали, *все они* будут пересекать горизонт событий в моменты координатного времени $-\infty$ (на пути наружу) и $+\infty$ (на обратном пути). В результате проницательные физики также заподозрят, что эти две "точки", $+\infty$ и $-\infty$, должны быть обязательно представлены в глобальной картине черной дыры в виде двух отрезков мировых линий!

Чтобы перейти от упрощенного изображения черной дыры к ее глобальной картине, следует переделать наше упрощенное изображение в гораздо более сложную диаграмму пространства-времени. И все же нашим конечным результатом окажется новая пространственно-временная диаграмма! На этой диаграмме пространственноподобные величины будут направлены горизонтально (слева направо), а временноподобные величины - вертикально (снизу вверх). Иными словами, преобразование должно сработать так, чтобы *старые* пространственная и временная координаты были заменены на *новые* пространственную и временную координаты, которые отражали бы полностью истинную природу черной дыры.

Чтобы постараться понять, как могут быть связаны между собой старая и новая системы координат, рассмотрим некоего наблюдателя вблизи черной дыры. Чтобы избежать падения на черную дыру и оставаться на постоянном расстоянии от нее, он должен располагать мощными ракетными двигателями, выбрасывающими потоки газов вниз. В плоском пространстве-времени, вдали от



тяготеющих масс, космический корабль при работающих двигателях приобрел бы *ускорение* и двигался бы все быстрее и быстрее, ибо тяга ракетных двигателей обеспечила бы ему постоянное возрастание скорости. Мировая линия такого корабля изображена на диаграмме пространства-времени на рис. 9.6. Эта линия постепенно сближается с прямой, имеющей наклон 45°, по мере того, как вследствие непрерывной работы двигателей скорость корабля приближается к скорости света. Кривая, изображающая подобную мировую линию, называется *гиперболой*. Наблюдатель, который находится близ черной дыры и пытается остаться на постоянном расстоянии от нее, будет постоянно испытывать ускорение, вызванное работой ракетных двигателей корабля. Проницательные физики заподозрят поэтому, что линии "постоянной высоты" в пересмотренной и улучшенной диаграмме пространства-времени вблизи черной дыры будут ветвями гипербола. Наконец, тот наблюдатель, который пытается удержаться на горизонте событий, должен располагать невероятно мощными ракетными двигателями. Чтобы он не свалился внутрь черной дыры, эти двигатели должны работать с такой мощностью, что наблюдатель, будь он в плоском мире, двигался бы со скоростью света. Значит, мировые линии горизонта событий должны быть наклонены в точности под углом 45° в пересмотренной и улучшенной диаграмме пространства-времени.

Рис. 9.6. Ускоренно движущийся наблюдатель. Равноускоренный наблюдатель (или объект) движется все быстрее и быстрее, увеличивая скорость в постоянном темпе. Его траектория в пространстве-времени имеет вид гиперболы. По мере того как скорость наблюдателя приближается к скорости света, мировая линия приобретает наклон, все более близкий к 45°.

В 1960 г. независимо друг от друга Крускал и Секереш нашли требуемые преобразования, переводящие старую диаграмму пространства-времени для шварцшильдовской черной дыры в новую диаграмму - пересмотренную и улучшенную. Эта новая *диаграмма Крускала-Секереша* корректно покрывает все пространство-время и полностью выявляет глобальную структуру черной дыры. При этом подтверждаются все отмеченные ранее подозрения и обнаруживаются некоторые новые удивительные и неожиданные детали. Однако, хотя преобразования Крускала и Секереша сразу переводят старую картину в новую, наглядно представить себе их лучше в виде последовательности преобразований, схематически изображенных на рис. 9.7. Конечный результат - это опять-таки диаграмма пространства-времени (пространственное направление горизонтальное, а временное - вертикальное), причем лучи света, идущие к черной дыре и от нее, изображаются, как обычно, прямыми с наклоном 45°.

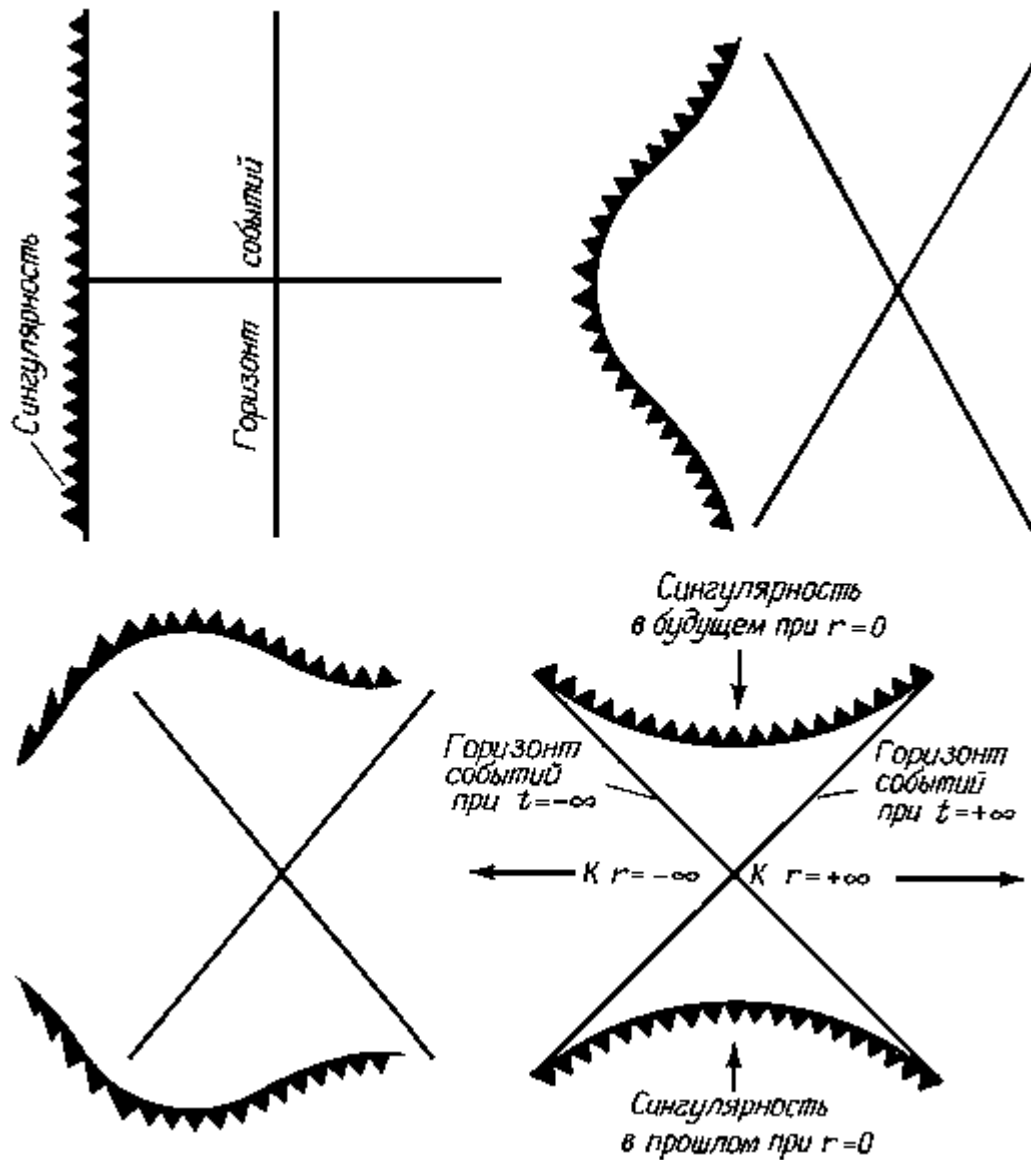


Рис. 9.7. Переход к диаграмме Крускала-Секереша. Здесь схематически изображен переход от прежней простенькой диаграммы пространства-времени для черной дыры к гораздо более совершенной диаграмме Крускала-Секереша. Окончательная диаграмма включает две сингулярности и две внешние Вселенные.

Конечный результат преобразования поражает и на первых порах вызывает недоверие: вы видите, что там изображены на самом деле две сингулярности, одна в прошлом, а другая в будущем; вдобавок к этому вдали от черной дыры существуют две внешние Вселенные.

Но на самом деле диаграмма Крускала-Секереша правильна, и, чтобы понять это, мы вновь рассмотрим полет астронома, выброшенного из сингулярности, пересекающего горизонт событий и снова падающего обратно. Мы уже знаем, его мировая линия на упрощенной диаграмме пространства-времени необычна. Эта

линия снова изображена слева на рис. 9.8. На диаграмме же Крускала-Секереша (рис. 9.8, справа) такая линия выглядит намного осмысленнее. Наблюдатель на самом деле выскакивает из сингулярности в прошлом и в конце концов попадает в сингулярность в будущем. Следовательно, такое "аналитически полное" описание решения Шварцшильда включает *как* черную, *так* и белую дыру. Наш астроном на самом деле вылетает из белой дыры и в конце концов падает в черную дыру. Обратите внимание на то, что его мировая линия повсюду наклонена к вертикали менее чем на 45°, т.е. эта линия везде временноподобна и поэтому допустима. Сравнивая же левую и правую части рис. 9.8, вы обнаружите, что "точки" моментов времени $+\infty$ и $-\infty$ на горизонте событий теперь растянулись в две прямые линии, имеющие наклон 45°, что подтверждает наши прежние подозрения.

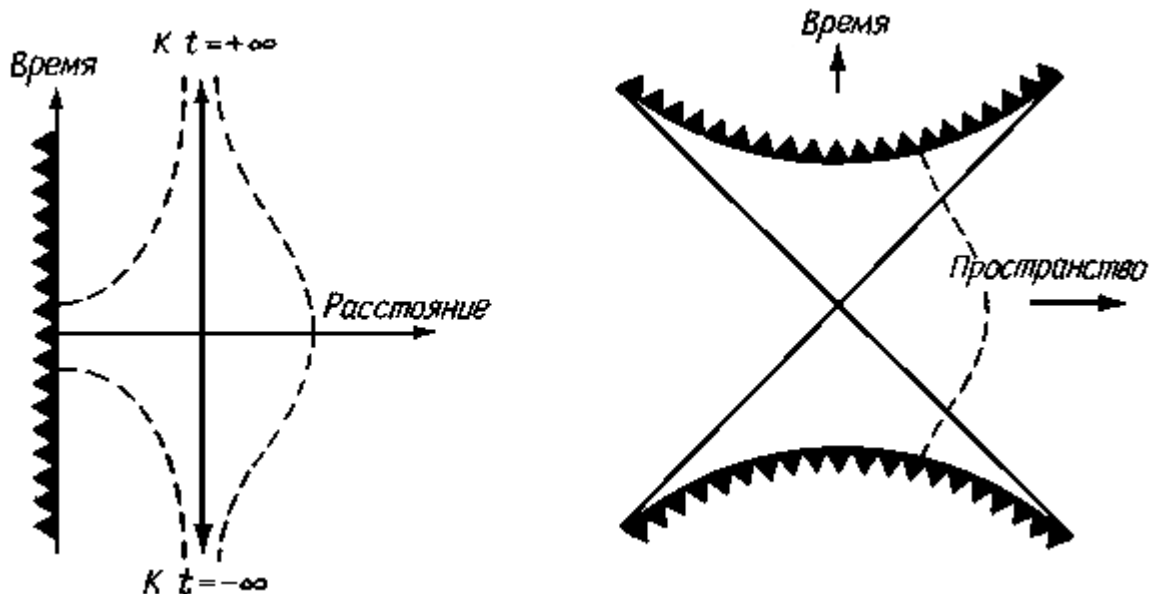


Рис. 9.8. Мировая линия путешествия из черной дыры и обратно. На упрощенной диаграмме пространства-времени (слева) мировая линия астронома, вылетающего из черной дыры и падающего обратно в нее, выглядит сложно. На диаграмме Крускала-Секереша (справа) та же линия поддается простому истолкованию. Астроном вылетает из сингулярности в прошлом и падает в сингулярность в будущем.

При переходе к диаграмме Крускала-Секереша обнаруживается истинная природа всего пространства-времени вблизи шварцшильдовской черной дыры. На упрощенной диаграмме разные участки пространства-времени перекрывались друг с другом. Именно поэтому удаленные ученые, наблюдая падение астронома в черную дыру (или его вылет из нее), ошибочно предполагали, что имеются *два* астронома. На диаграмме Крускала-Секереша эти перекрывающиеся участки должным образом распутаны. На рис. 9.9 показано, как связаны между собой эти разные участки на

обоих типах диаграмм. Внешних Вселенных на самом деле две (области I и III), как и внутренних частей черной дыры (области II и IV) между сингулярностями и горизонтом событий.

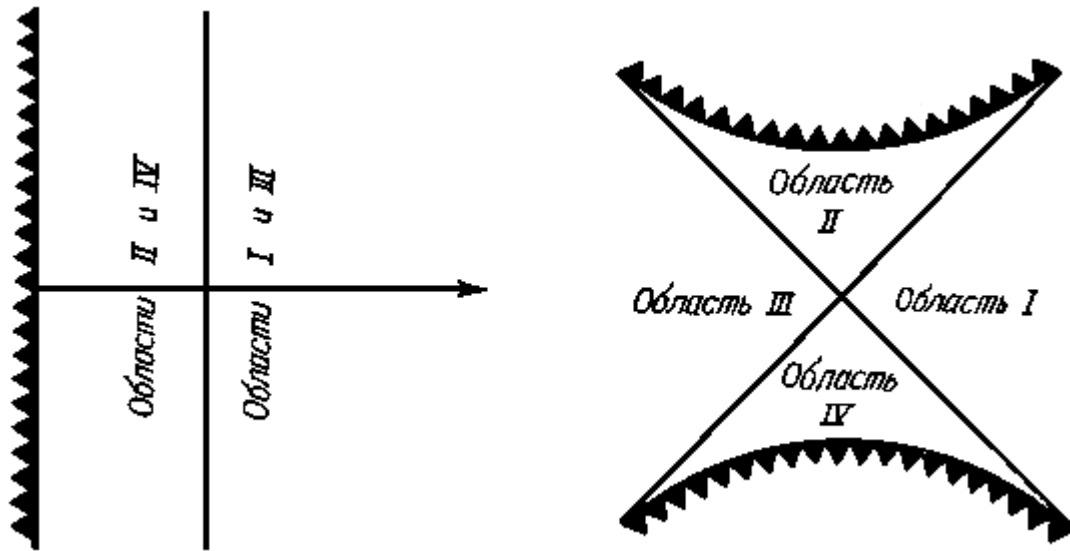
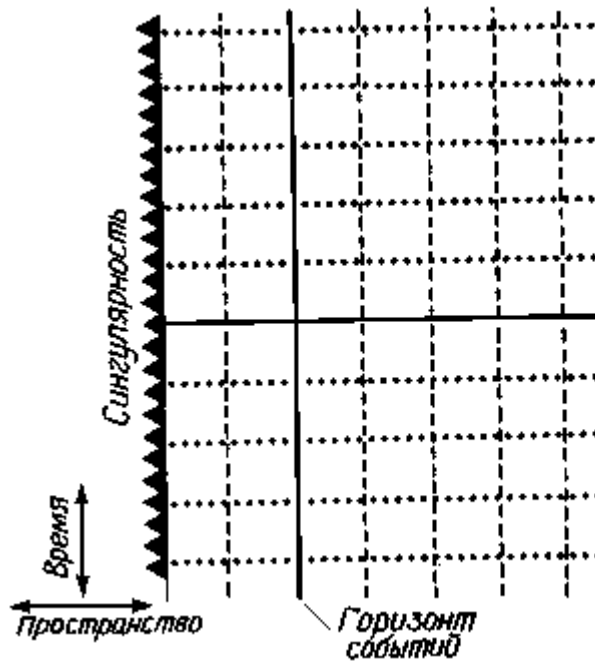


Рис. 9.9. *Области пространства-времени.* На упрощенной диаграмме разные области пространства-времени накладываются друг на друга. Напротив, на диаграмме Крускала-Секереша эти области представлены раздельно.

Полезно также проанализировать, как отдельные части пространственно-временной сетки преобразуются при переходе от упрощенной диаграммы к диаграмме Крускала-Секереша. В упрощенном представлении (рис. 9.10) штриховые линии постоянных высот над сингулярностью - это просто



прямыми, направленными вертикально. Пунктирные линии постоянного координатного времени -

Рис. 9.10. Пространственно-временная сетка координат на упрощенной диаграмме. При упрощенном представлении координатные линии постоянного расстояния от черной дыры (штриховые) - это просто вертикальные прямые на диаграмме. Линии постоянного времени (пунктирные) - также прямые, но уже горизонтальные.

также прямые, но горизонтальные. Пространственно-временная сетка выглядит как кусок обычной миллиметровки.

На диаграмме Крускала-Секереша (рис. 9.11) линии постоянного времени (пунктирные) остались прямыми, но теперь они расходятся под разными углами. Линии же постоянного расстояния от черной дыры (штриховые) суть гиперболы, как мы подозревали раньше.

Анализируя рис. 9.11, можно понять, почему при переходе через горизонт событий пространство и время меняются ролями, как уже говорилось в предыдущей главе. Вспомним, что на упрощенной диаграмме (см. рис. 9.10) линии постоянного расстояния направлены по вертикали. Так, какая-то конкретная штриховая линия может изображать точку, находящуюся постоянно на высоте 10 км над черной дырой. Такая линия должна быть параллельна горизонту событий на упрощенной диаграмме, т.е. она должна быть вертикальной; поскольку она изображает нечто неподвижное во все моменты времени, то линия постоянного расстояния должна иметь временноподобное направление (иначе говоря, вверх) на этой упрощенной диаграмме.

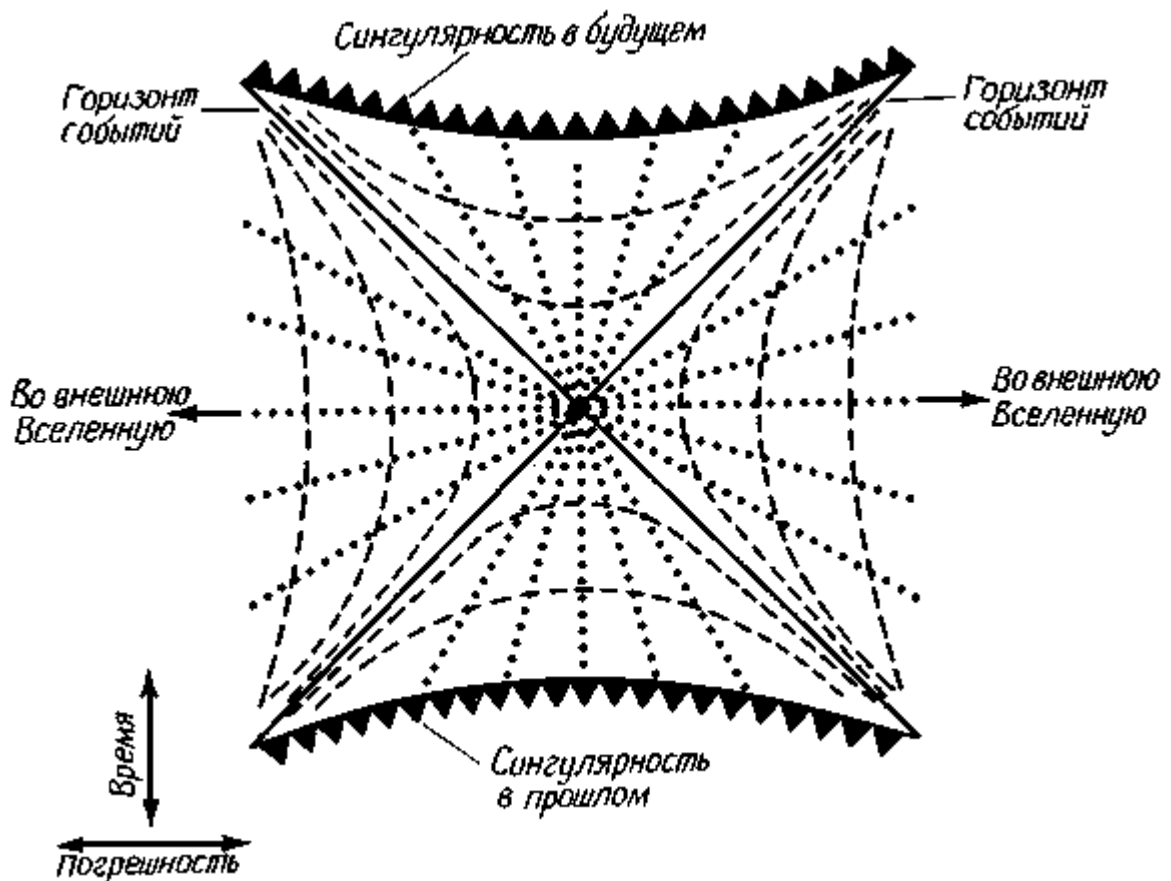


Рис. 9.11. Пространственно-временная сетка координат на диаграмме Крускала-Секереша. Линии постоянного времени (точечные) здесь прямые, однако линии постоянного расстояния (штриховые) имеют вид гипербол. Заметна смена ролей между пространством и временем при пересечении горизонта событий.

На рис. 9.11 изображена диаграмма Крускала-Секереша; здесь штриховые линии постоянного расстояния имеют в общем направлении вверх, если взять их достаточно далеко от черной дыры. Там они все еще временноподобные. Однако внутри горизонта событий штриховые линии постоянного расстояния ориентированы в общем горизонтально. Значит, под горизонтом событий линии постоянного расстояния имеют пространственноподобное направление! Следовательно, то, что обычно (во внешней Вселенной) связывается с расстоянием, ведет себя внутри горизонта событий подобно времени.

Аналогично этому на упрощенной диаграмме (см. рис. 9.10) линии постоянного времени горизонтальны и имеют пространственноподобное направление. Например, некая конкретная пунктирная линия может означать момент "3 ч дня для всех точек пространства". Такая линия должна быть параллельна пространственной оси на упрощенной диаграмме, т.е. она должна быть горизонтальной.

На рис. 9.11, где изображена диаграмма Крускала-Секереша, пунктирные линии постоянного времени в общем имеют пространственноподобное направление, если взять их далеко от черной дыры, т.е. они там почти горизонтальны. Но внутри горизонта событий пунктирные линии постоянного времени направлены в общем снизу вверх, т.е. ориентированы во временноподобном направлении. Итак, под горизонтом событий линии постоянного времени имеют временноподобное направление! Следовательно, то, что обычно (во внешней Вселенной) связывается со временем, ведет себя внутри горизонта событий подобно расстоянию. При пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями.

В связи с обсуждением свойств пространства и времени важно отметить, что на диаграмме Крускала-Секереша (рис. 9.11) обе сингулярности (и в прошлом, и в будущем) ориентированы горизонтально. Обе гиперболы, изображающие "точку" $r = 0$, имеют повсюду наклон *менее 45°* к вертикали. Эти линии пространственноподобные, и поэтому говорят, что шварцшильдовская сингулярность пространственноподобна.

Тот факт, что шварцшильдовская сингулярность пространственноподобна, приведет к важным заключениям. Как и в частной теории относительности (см. рис. 1.9), здесь невозможно двигаться со сверхсветовой скоростью, так что пространственноподобные мировые линии в качестве "путей" движения запрещены. Двигаться по мировым линиям, обладающим наклоном более 45° к вертикальному (временноподобному) направлению, невозможно. Поэтому невозможно попасть из нашей Вселенной (на диаграмме Крускала-Секереша справа) в другую Вселенную (на этой же диаграмме слева). Любой путь, связывающий друг с другом обе Вселенные, должен хотя бы в одном месте быть пространственноподобным, а такие пути запрещены для движения. Кроме того, так как горизонт событий наклонен в точности под углом 45°, то астроном из нашей Вселенной, опустившийся под этот горизонт, никогда больше не сможет из-под него выйти. Например, если кто-нибудь проникнет в область II на рис. 9.9, то *все* допустимые временноподобные мировые линии приведут его прямо в сингулярность. Шварцшильдовская черная дыра-это ловушка без выхода.

Чтобы полнее почувствовать природу геометрии Крускала-Секереша, поучительно рассмотреть пространственноподобные срезы диаграммы пространства-времени, выполненные этими авторами. Это будут *диаграммы вложения* искривленного пространства вблизи черной дыры. Такой метод получения срезов пространства-времени по пространственноподобным гиперповерхностям применялся нами и ранее (см. рис. 5.9, 5.10 и 5.11) и облегчил понимание свойств пространства в окрестностях Солнца. На рис. 9.12 изображена диаграмма Крускала-Секереша, "нарезанная ломтиками" по характерным пространственноподобным гиперповерхностям. Срез *А* относится к раннему моменту времени. Первоначально две Вселенные, находящиеся вне черной дыры, никак не связаны между собой. На пути от одной Вселенной к другой пространственноподобный срез наталкивается на сингулярность. Поэтому диаграмма вложения для среза *А*

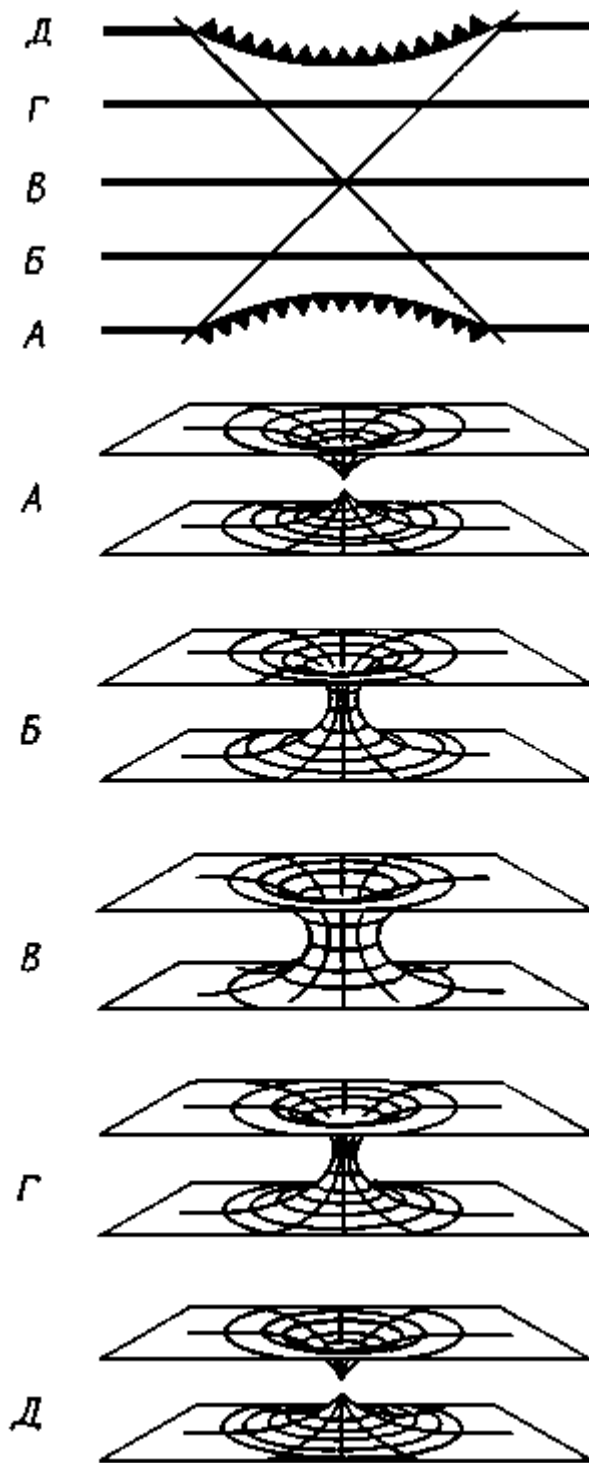


Рис. 9.12. *Диаграммы вложения для черной дыры.* Чтобы построить диаграммы вложения, пространство-время Крускала-Секереша "режется ломтиками" по пяти характерным гиперповерхностям. Переходя от среза *А* (на раннем временном этапе) к срезу *Д* (на позднем этапе), можно видеть эволюцию возникающей при этом "кратовой норы".

наталкивается на сингулярность. Поэтому диаграмма вложения для среза *А*

описывает две отдельные Вселенные (изображенные в виде двух параллельных друг другу асимптотически плоских листов), в каждой из которых имеется сингулярность. Позднее при дальнейшей эволюции этих Вселенных сингулярности соединяются и возникает мостик, в котором сингулярностей уже нет. Это соответствует срезу *Б*, куда сингулярность не входит. С течением времени этот мостик, или "*кротовая нора*", расширяется и достигает наибольшего поперечника, равного двум шварцшильдовским радиусам (момент, соответствующий срезу *В*). Позднее мостик начинает снова стягиваться (срез *Г*) и наконец разрывается (срез *Д*), так что мы имеем снова две отдельные Вселенные. Такая эволюция кротовой норы (рис. 9.12) занимает менее $1/10\ 000$ с, если черная дыра имеет массу Солнца.

Обнаружение Крускалом и Секерешем подобной глобальной структуры пространства-времени у черной дыры явилось решающим прорывом на фронте теоретической астрофизики. Впервые удалось построить диаграммы, полностью изображающие все области пространства и времени. Но после 1960 г. были достигнуты и новые успехи, прежде всего Роджером Пенроузом. Хотя на диаграмме Крускала - Секереша и представлена вся история, эта диаграмма простирается вправо и влево бесконечно далеко. Например, наша Вселенная простирается на бесконечное расстояние вправо на диаграмме Крускала-Секереша, тогда как влево на той же диаграмме до бесконечности уходит пространство-время "другой" асимптотически плоской Вселенной, которая параллельна нашей. Пенроуз первым понял, насколько полезно и поучительно было бы пользоваться "картой", отображающей эти бесконечные просторы на какие-то конечные области, по которым было бы возможно точно судить о происходящем вдали от черной дыры. Чтобы осуществить эту идею, Пенроуз привлек так называемые методы *конформного отображения*, с помощью которых все пространство-время, включая полностью и обе Вселенные, изображается на одной конечной диаграмме.

Чтобы познакомить вас с методами Пенроуза, обратимся к обычному плоскому пространству-времени типа изображенного на рис. 9.2. Все пространство-время там сосредоточено на правой стороне диаграммы просто потому, что невозможно оказаться на отрицательном расстоянии от произвольного начала. Вы можете находиться от него, скажем, в 2 м, но уж никак не в минус 2 м. Вернемся к рис. 9.2. Мировые линии Бори, Васи и Маши изображены там лишь на ограниченной области

пространства-времени ввиду ограниченности размеров страницы. Если вам захочется посмотреть, где будут Боря, Вася и Маша через тысячу лет или где они были миллиард лет назад, вам понадобится намного больший лист бумаги. Гораздо удобнее было бы изобразить все эти далекие от точки "здесь и теперь" положения (события) на компактной, небольшой диаграмме.

Мы уже встречались с тем, что "самые удаленные" области пространства-времени именуется *бесконечностями*. Эти области крайне далеки от "здесь и теперь" в пространстве или во времени (последнее означает, что они могут находиться в очень далеком, будущем или очень далеком прошлом). Как видно из рис. 9.13, может быть пять типов бесконечностей. Прежде всего это I^- - *временноподобная бесконечность в прошлом*. Она является тем "местом", откуда произошли все материальные объекты (Боря, Вася, Маша, Земля, галактики и все прочее). Все такие объекты движутся по временноподобным мировым линиям и должны уйти в I^+ - *временноподобную бесконечность будущего*, куда-то в миллиарды лет после "теперь". Кроме того, имеется ρ - *пространственноподобная бесконечность*, и так как ничто не может двигаться быстрее света, то ничто (кроме разве тахионов) не может никогда попасть в ρ . Если быстрее света не движется никакой из известных физике объектов, то фотоны движутся в точности со скоростью света по мировым линиям, наклоненным на 45° на диаграмме пространства-времени. Это дает возможность ввести \mathcal{J}^- - *световую бесконечность прошлого*, откуда приходят все световые лучи. Существует, наконец, и \mathcal{J}^+ - *световая бесконечность будущего* (куда уходят все световые лучи). Всякая удаленная область пространства-времени принадлежит одной из этих пяти бесконечностей; I^- , \mathcal{J}^- , ρ , \mathcal{J}^+ или I^+ .

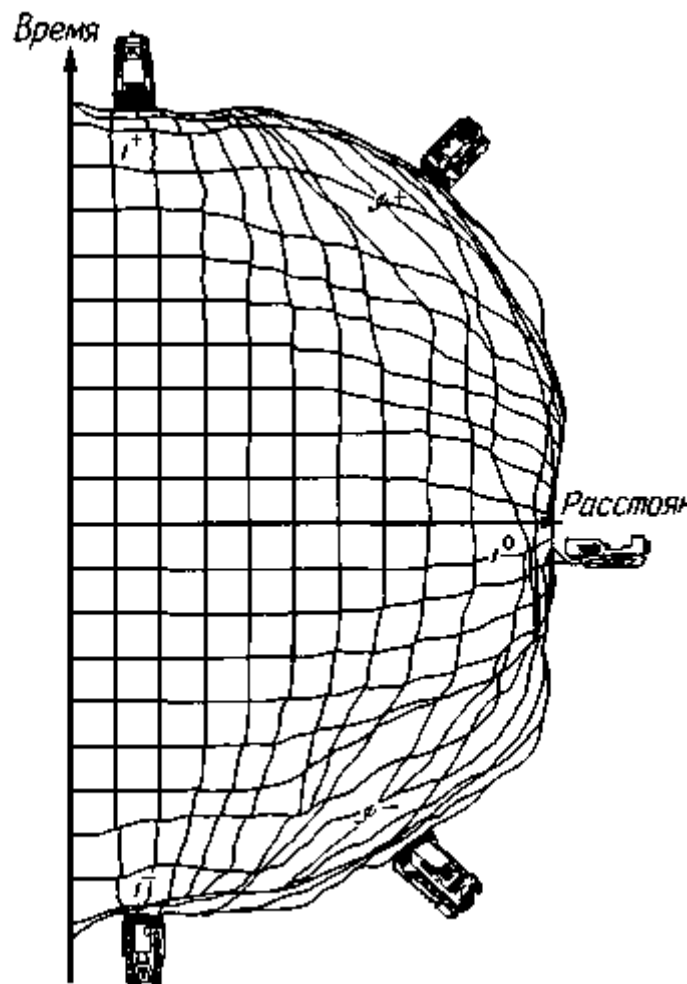
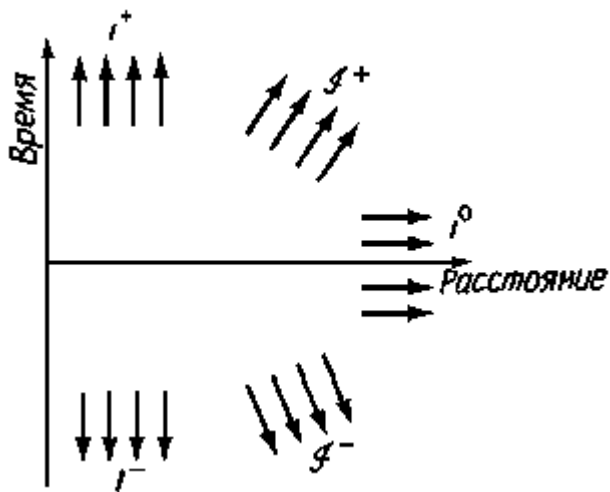


Рис. 9.13. Бесконечности. Наиболее удаленные "окраины" пространства-времени (бесконечности) делятся на пять типов. Временноподобная бесконечность прошлого (I^-)-та область, откуда приходят все материальные тела, а временноподобная бесконечность будущего (I^+)-та область, куда они все

уходят. Световая бесконечность прошлого (J^-) - та область, откуда приходят световые лучи, а световая бесконечность будущего - та область (J^+), куда они уходят. Ничто (кроме тахионов) не может попасть в пространственноподобную бесконечность (I^0).

Рис. 9.14. Конформное отображение по Пенроузу. Существует математический прием, при помощи которого удается "стянуть" наиболее удаленные окраины пространства-времени (все бесконечностей) во вполне обозримую конечную область.

Метод Пенроуза сводится к математическому приему стягивания всех этих бесконечностей на один и тот же лист бумаги. Преобразования, осуществляющие такое стягивание, действуют наподобие бульдозеров (см. образное представление этих преобразований на рис. 9.14), сгребая наиболее удаленные участки пространства-времени туда, где их можно лучше рассмотреть. Результат такого преобразования представлен на рис. 9.15. Следует иметь в виду, что линии постоянного расстояния от произвольной точки отсчета в основном вертикальные и

всегда указывают временноподобное направление. Линии постоянного времени в основном горизонтальные и всегда указывают пространственноподобное направление.

На *конформной* карте всего плоского пространства-времени (рис. 9.15) пространство-время как целое уместилось в треугольнике. Вся временноподобная бесконечность в прошлом (I^-) собрана в одну-единственную точку внизу диаграммы. Все временноподобные мировые линии всех материальных объектов выходят из этой точки, изображающей чрезвычайно удаленное прошлое. Вся временноподобная бесконечность в будущем (I^+) собрана в одну-единственную точку вверху диаграммы. Временноподобные мировые линии всех материальных объектов во Вселенной в конце концов упираются в эту точку, изображающую далекое будущее. Пространственноподобная бесконечность (ρ) собрана в точку справа на диаграмме. Ничто (кроме тахионов) никогда не может попасть в ρ . Световые бесконечности в прошлом и в будущем \mathcal{J}^- и \mathcal{J}^+ превратились в прямые с наклоном 45°, ограничивающие диаграмму справа вверху и справа внизу по диагоналям. Световые лучи всегда идут по мировым линиям с наклоном 45°, так что свет, приходящий из удаленного прошлого, начинает свой путь где-то на \mathcal{J}^- , а уходящий в далекое будущее кончает свой путь где-то на \mathcal{J}^+ . Вертикальная прямая, ограничивающая диаграмму слева, - это просто временноподобная мировая линия выбранной нами произвольной начальной точки отсчета ($r = 0$).

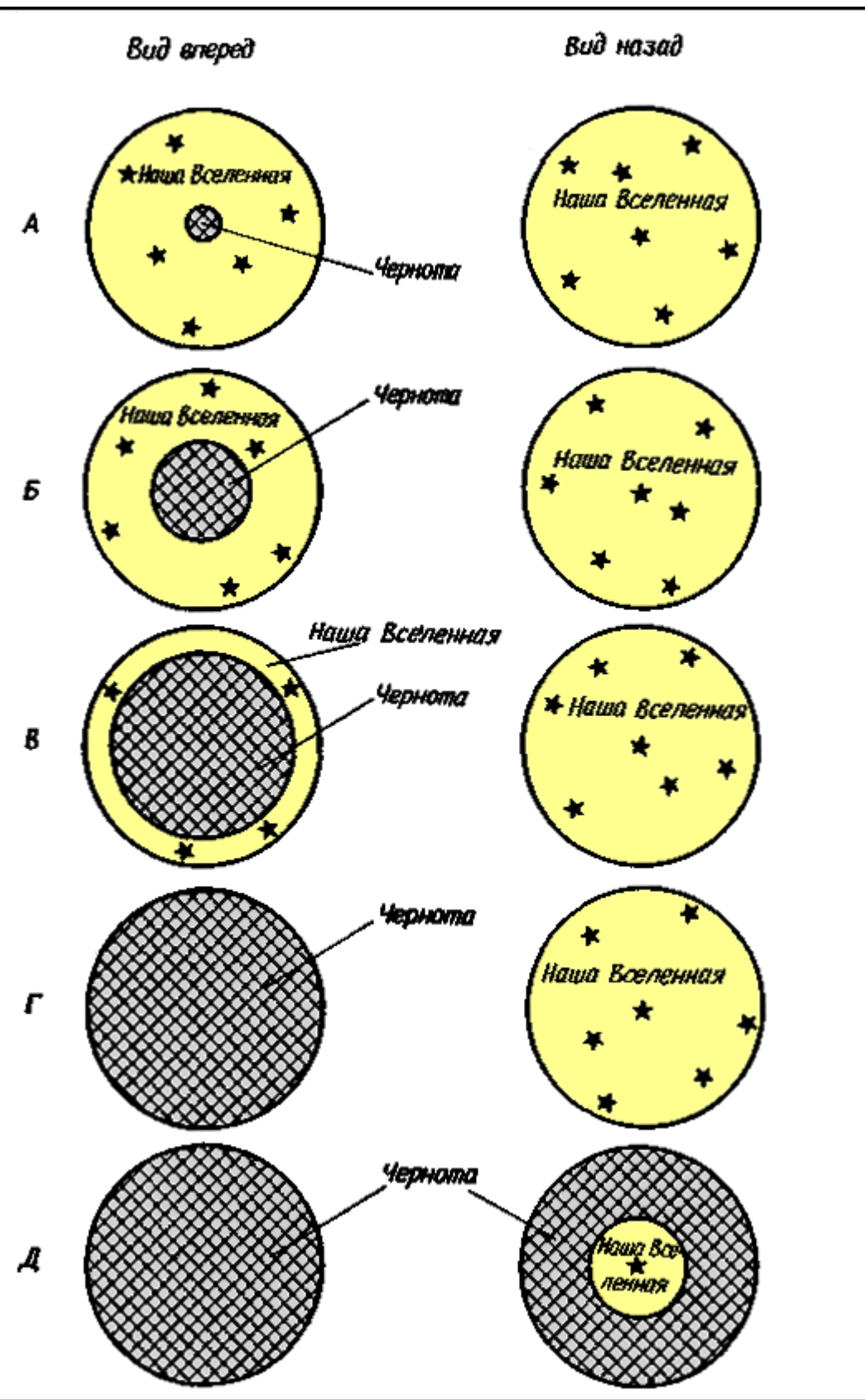


рис. 9.15. Диаграмма Пенроуза для плоского пространства-времени. Все пространство-время собрано внутри треугольника с помощью способа конформного отображения, придуманного Пенроузом. Из пяти бесконечностей три (I^- , I^0 , I^+) сжаты до отдельных точек.

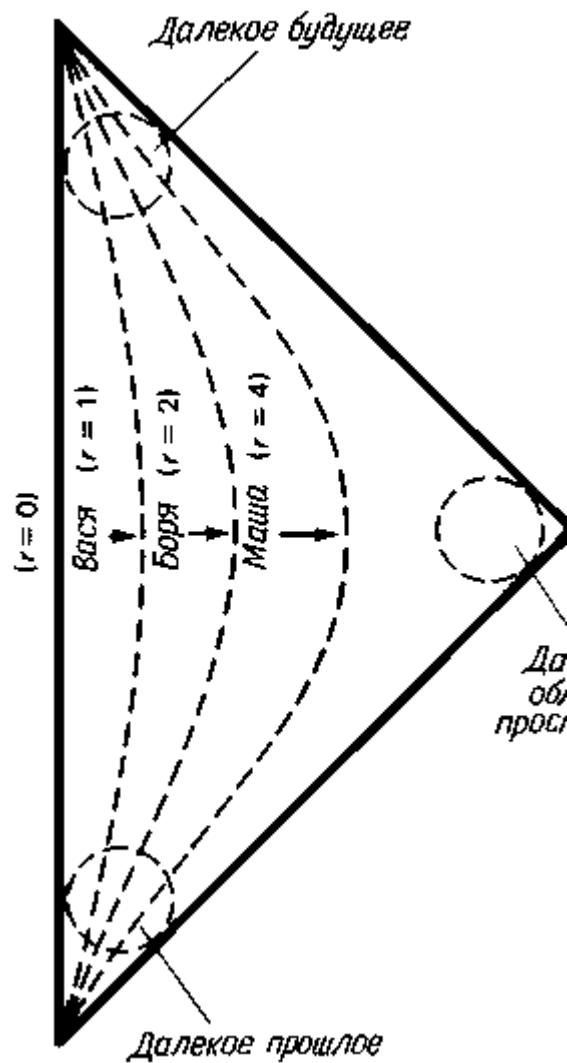


рис. 9.16. Пример конформной диаграммы Пенроуза. Эта диаграмма изображает фактически то же, что и диаграмма Пенроуза. Однако на конформной диаграмме мировые линии

представлены полностью (от удаленного прошлого \mathcal{I}^- - световые бесконечности \mathcal{I}^- и \mathcal{I}^+ - стали прямыми линиями, имеющими наклон 45° . далекого будущего \mathcal{I}^+).

Чтобы покончить с описанием конформной диаграммы Пенроуза плоского гольгель пространства-времени, гольгель мы гольгель изобразили гольгель на рис. 9.16 полностью мировые линии Бори, Васи и Маши. Сравните эту диаграмму с рис. 9.2 - ведь это одно и то же, только на конформной диаграмме мировые линии прослеживаются на всем их протяжении (от удаленного прошлого \mathcal{I}^- до далекого будущего \mathcal{I}^+)

Изображение обычного плоского пространства-времени по способу Пенроуза не дает ничего сенсационного. Однако способ Пенроуза применим и к черным дырам! В частности, диаграмму Крускала-Секереша (см. рис. 9.11) можно отобразить конформно таким образом, что физик увидит *все* пространство-время всех Вселенных изображенным на одном-единственном листке бумаги. Как это наглядно изображено на рис. 9.17, конформные преобразования Пенроуза здесь снова работают подобно бульдозерам, "сгребающим" пространство-время. Окончательный результат показан на рис. 9.18.

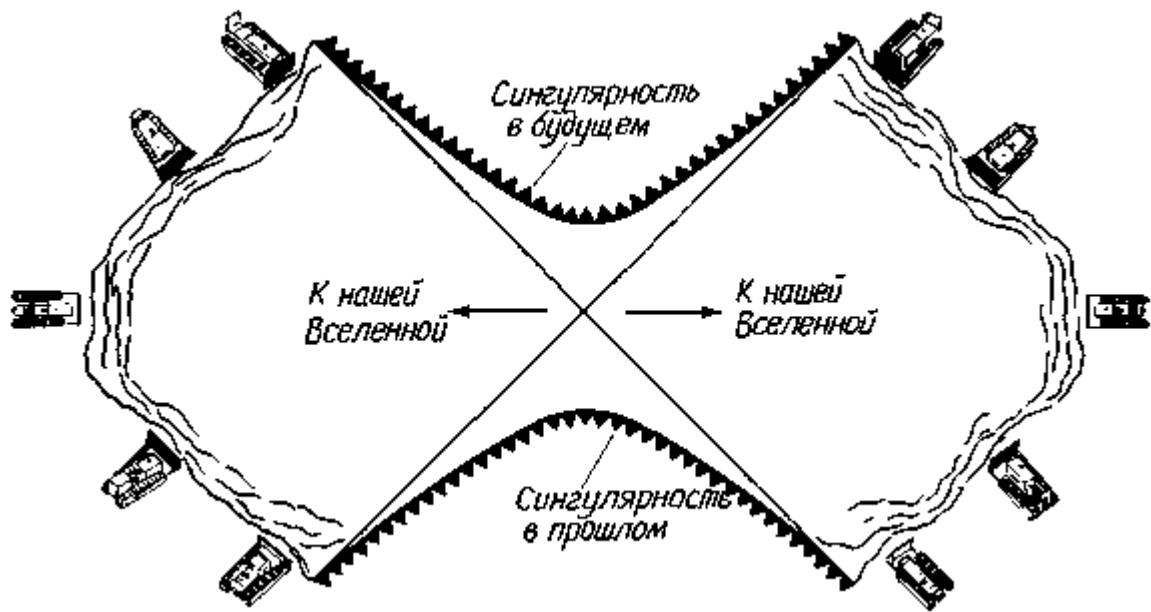


Рис. 9.17. Конформное отображение черной дыры. Все пространство-время, связанное с шварцшильдовской черной дырой, может быть конформно отображено на один листок бумаги с помощью способа Пенроуза. Этот способ сводится к стягиванию всего пространства-времени в обозримую область, где его можно исследовать.

На диаграмме Пенроуза шварцшильдовской черной дыры (рис. 9.18) мы снова замечаем, что линии постоянного времени и линии постоянного расстояния ведут себя, по существу, так же, как и на диаграмме Крускала-Секереша. Горизонт событий

сохраняет свой наклон в 45°, а сингулярности (как в прошлом, так и в будущем) остаются пространственноподобными. Обмен ролями между пространством и временем, как и прежде, происходит при пересечении горизонта событий. Однако теперь самые удаленные части обеих связанных с черной дырой Вселенных находятся у нас перед глазами. Все пять бесконечностей нашей Вселенной (I^- , \mathcal{J}^- , ρ , \mathcal{J}^+ , I^+) видны справа на диаграмме, а слева на ней же можно увидеть все пять бесконечностей другой Вселенной (I^- , \mathcal{J}^- , ρ , \mathcal{J}^+ , I^+).

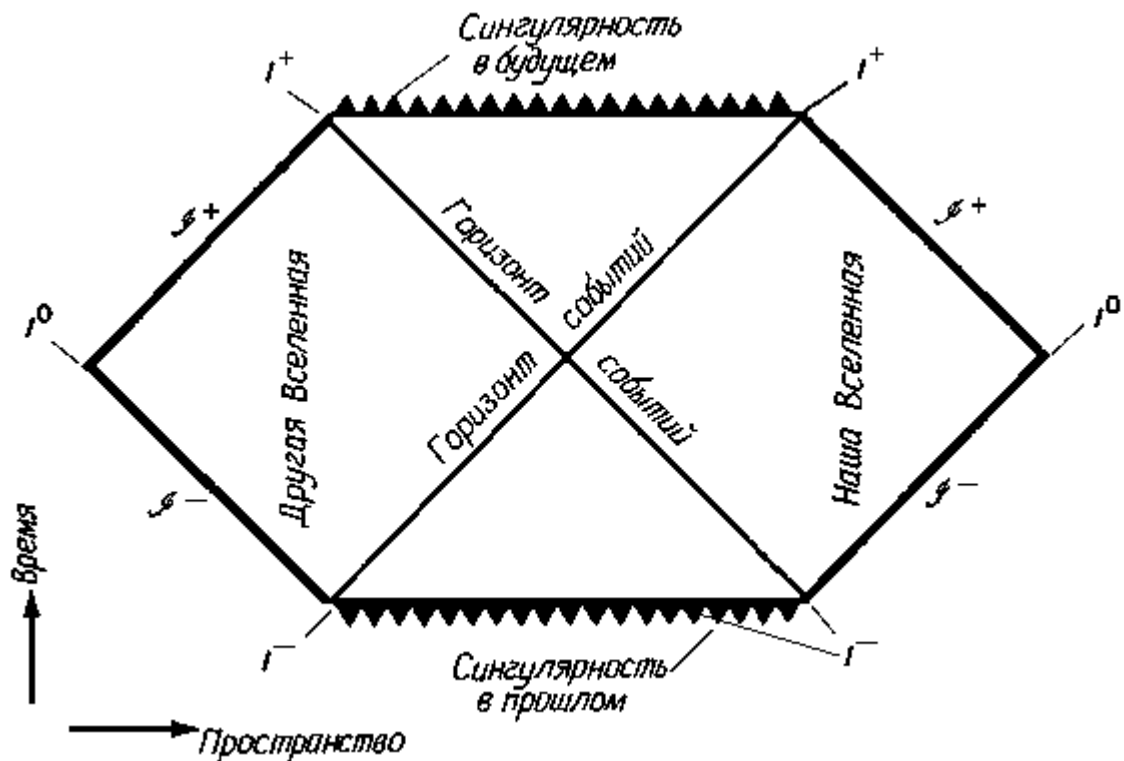


Рис. 9.18. Диаграмма Пенроуза для шварцшильдовской черной дыры. По существу, это то же, что и диаграмма Крускала-Секереша, изображенная на рис. 9.11. Однако здесь можно видеть и наиболее удаленные окраины двух Вселенных (I^- , \mathcal{J}^- , ρ , \mathcal{J}^+ и I^+ для каждой из них).

Мы можем теперь перейти к заключительному упражнению с шварцшильдовской черной дырой - выяснить, что увидят отчаянно любознательные астрономы-камакдзе, падающие на черную дыру и *пересекающие* горизонт событий.

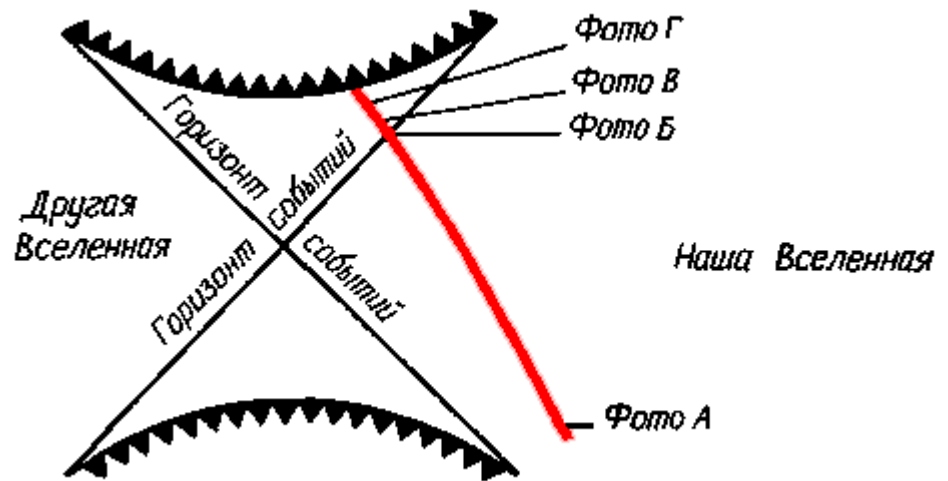


Рис. 9.20. Полет "камикадзе". Диаграмма Пенроуза изображает мировую линию полета астрономов к черной дыре, заканчивающегося их гибелью. В ходе полета снимаются четыре пары фотографий. Первый снимок (А) сделан далеко от черной дыры. Вторым снимком (Б) соответствует моменту, когда астрономы пересекали горизонт событий. Третий снимок (В) сделан между горизонтом событий и сингулярностью. Последняя фотография (Г) снята непосредственно перед попаданием в сингулярность.

Рис. 9.19. Космический корабль. Два любознательных и отчаянно смелых астронома полетели на этом корабле к черной дыре. Обратите внимание на то, что у этого корабля нет ракетных двигателей, которые замедлили бы его свободное падение. Носовой иллюминатор смотрит на центр черной дыры, а кормовой иллюминатор - на внешнюю Вселенную.

Космический корабль этих астрономов изображен на рис. 9.19. Носовой иллюминатор всегда направлен прямо на сингулярность, а кормовой - в противоположную сторону, т. е. на нашу внешнюю Вселенную. Отметим, что у космического корабля теперь нет ракетных двигателей для замедления его падения. Начав движение с большой высоты над черной дырой, астрономы просто

вертикально падают со все увеличивающейся (по их измерениям) скоростью. Их мировая линия (рис. 9.20) проходит сначала через горизонт событий, а затем ведет в сингулярность. Так как их скорость всегда меньше скорости света, то мировая линия корабля на диаграмме Пенроуза должна быть временноподобной, т.е. повсюду обладать наклоном к вертикали менее 45° . Во время путешествия астрономы делают на разных этапах пути четыре пары фотографий - по одной из каждого иллюминатора. Первая пара (снимки А) сделана, когда они были еще очень далеко от черной дыры. На рис. 9.21, А видно черную дыру как маленькое пятнышко в центре поля зрения носового иллюминатора. Хотя в непосредственной близости от черной дыры вид неба искажен, его остальная часть выглядит совершенно обычно. По мере того как скорость падения астрономов на черную дыру возрастает, свет от объектов из удаленной Вселенной, наблюдаемый через кормовой иллюминатор, испытывает все более и более сильное красное смещение.

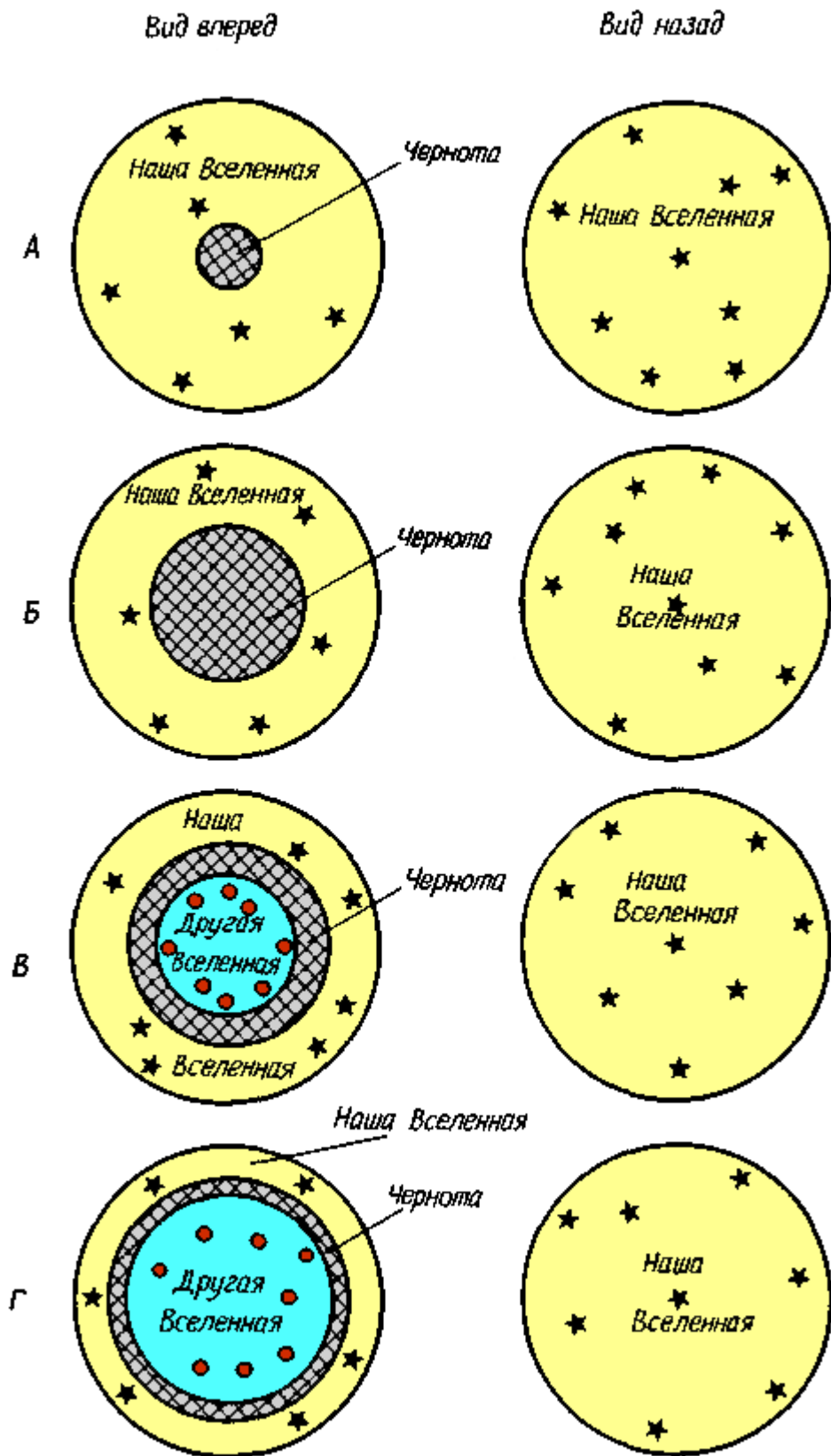


Рис. 9.21.

Фото А. Далеко от черной дыры. С большого расстояния черная дыра выглядит как маленькое черное пятнышко в центре поля зрения носового иллюминатора. Падающие в дыру астрономы наблюдают через кормовой иллюминатор неискаженный вид Вселенной, из которой они прилетели.

Фото Б. Ни горизонте событий. Благодаря эффекту абберации изображение черной дыры сжато в сторону центра поля зрения носового иллюминатора. Астроном, ведущий наблюдение в кормовой иллюминатор, видит лишь ту Вселенную, из которой прибыл корабль.

Фото В. Между горизонтом событий и сингулярностью. Опустившись под горизонт событий, астроном, наблюдающий в носовой иллюминатор, может видеть другую Вселенную. Приходящий из области другой Вселенной свет заполняет центральную часть его поля зрения.

Фото Г. Непосредственно над сингулярностью. Когда астрономы приближаются к сингулярности, через носовой иллюминатор становится все лучше видно другую Вселенную. Изображение же собственно черной дыры (имеющее вид кольца) становится все тоньше и тоньше, быстро приближаясь к краю поля зрения носового иллюминатора.

Хотя, по утверждению удаленных наблюдателей, падение космического корабля замедляется до полной его остановки на горизонте событий, астрономы на *самом* космическом корабле ничего подобного не заметят. По их мнению, скорость корабля все время возрастает и при пересечении горизонта событий она составляет заметную долю скорости света. Это существенно по той причине, что в результате падающие астрономы наблюдают явление абберации света звезд, очень похожее на рассмотренное нами в гл. 3 (см. рис. 3.9, 3.11). Вспомните, что при движении с околосветовой скоростью вы заметите сильные искажения картины неба. В частности, изображения небесных тел как бы собираются впереди движущегося наблюдателя. Вследствие этого эффекта изображение черной дыры концентрируется ближе к середине носового иллюминатора падающего космического корабля.

Картина, наблюдаемая падающими астрономами с горизонта событий, показана на рис. 9.21,Б. Этот и последующие рисунки построены на основании расчетов, сделанных Кэннингэмом в Калифорнийском технологическом институте в 1975 г. Если бы астрономы покоились, изображение черной дыры занимало бы все поле

зрения носового иллюминатора (рис. 8.15,*Д*). Но так как они движутся с большой скоростью, изображение сосредоточивается в середине носового иллюминатора. Его угловой поперечник примерно равен 80° . Вид неба рядом с черной дырой очень сильно искажен, а астроном, ведущий наблюдение через кормовой иллюминатор, видит лишь ту Вселенную, из которой они прилетели.

Для понимания того, что же будет видно, когда корабль будет находиться *внутри* горизонта событий, вернемся к диаграмме Пенроуза шварцшильдовской черной дыры (см. рис. 9.18 или 9.20). Вспомним, что идущие в черную дыру световые лучи имеют на этой диаграмме наклон 45° . Поэтому, оказавшись под горизонтом событий, астрономы смогут видеть и другую Вселенную. Лучи света из удаленных частей другой Вселенной (т.е. из ее бесконечности \mathcal{I}^- в левой части диаграммы Пенроуза) смогут теперь дойти до астрономов. Как показано на рис. 9.21,*В*, в центре поля зрения носового иллюминатора космического корабля, находящегося между горизонтом событий и сингулярностью, видна другая Вселенная. Черная часть дыры представляется теперь в виде *кольца*, отделяющего изображение нашей Вселенной от изображения другой Вселенной. По мере приближения падающих наблюдателей к сингулярности черное кольцо становится все тоньше, прижимаясь к самому краю поля зрения носового иллюминатора. Вид неба из точки прямо над сингулярностью показан на рис. 9.21,*Г*. В носовой иллюминатор становится все лучше и лучше видно другую Вселенную, а прямо на сингулярности ее вид целиком заполняет поле зрения носового иллюминатора. Астроном же, проводящий наблюдения через кормовой иллюминатор, видит на протяжении всего полета лишь нашу внешнюю Вселенную, хотя ее изображение становится все более и более искаженным.

Падающие астрономы отметят еще один важный эффект, который не отражен на "снимках" 9.21,*А-Г*. Вспомним, что свет, уходящий из окрестностей горизонта событий в удаленную Вселенную, претерпевает сильнейшее красное смещение. Это явление, называемое *гравитационным красным смещением*, мы обсуждали в гл. 5 и 8. Красное смещение света, приходящего из области с сильным гравитационным полем, соответствует потере им энергии. Обратное, когда свет "падает" на черную дыру, он испытывает *фиолетовое смещение* и приобретает энергию. Приходящие из удаленной Вселенной туда слабые радиоволны превращаются, например, в мощные рентгеновские или гамма-лучи непосредственно над горизонтом событий. Если

описываемые диаграммами Пенроуза типа изображенной на рис. 9.18 черные дыры *действительно* существуют в природе, то свет, падающий на них из \mathcal{J}^- , скапливается в течение миллиардов лет около горизонта событий. Этот падающий свет приобретает чудовищную энергию, и когда астрономы опускаются под горизонт событий, они встречаются поэтому с неожиданной резкой вспышкой рентгеновских и гамма-лучей. Тот свет, который приходит из области \mathcal{J}^- другой Вселенной и собирается около горизонта событий, образует, как говорят, *фиолетовый слой*. Как мы увидим в гл. 13, существование таких фиолетовых слоев весьма существенно для серых и белых дыр.

10. Черные дыры с электрическим зарядом

Анализ эволюции звезд привел астрономов к заключению, что как в нашей Галактике, так и вообще во Вселенной могут существовать черные дыры. В двух предыдущих главах мы рассмотрели ряд свойств самых простых черных дыр, которые описываются тем решением уравнения гравитационного поля, которое нашел Шварцшильд. Шварцшильдовская черная дыра характеризуется только массой; электрического заряда у нее нет. У нее отсутствует также магнитное поле и вращение. Все свойства шварцшильдовской черной дыры однозначно определяются заданием *одной только массы* той звезды, которая, умирая, превращается в черную дыру в ходе гравитационного коллапса.

Нет сомнений, что решение Шварцшильда - чересчур простой случай. *Настоящая* черная дыра должна по крайней мере вращаться. Однако сколь сложной может быть черная дыра на самом деле? Какие добавочные подробности следует учесть, а какими можно пренебречь при полном описании той черной дыры, которую можно обнаружить при наблюдениях неба?

Представим себе массивную звезду, у которой только что кончились все ресурсы ядерной энергии и у которой вот-вот начнется фаза катастрофического гравитационного коллапса. Можно думать, что такая звезда обладает очень сложной структурой и при ее всестороннем описании пришлось бы учитывать множество характеристик. В принципе астрофизик способен рассчитать химический состав всех слоев такой звезды, изменение температуры от ее центра до поверхности и получить

все данные о состоянии вещества в недрах звезды (например, его плотности и давления) на всевозможных глубинах. Такие расчеты сложны, и их результаты существенно зависят от всей истории развития звезды. Внутреннее строение звезд, образовавшихся из разных облаков газа и в разное время, заведомо должно быть различным.

Однако, несмотря на все эти осложняющие обстоятельства, существует один бесспорный факт. Если масса умирающей звезды превышает примерно три массы Солнца, эта звезда *непрерывно* превратится в черную дыру в конце своего жизненного цикла. Не существует таких физических сил, которые могли бы предотвратить коллапс столь массивной звезды.

Чтобы лучше осознать смысл этого утверждения, вспомним, что черная дыра - это столь искривленная область пространства-времени, что из нее ничто не может вырваться, даже свет! Другими словами, из черной дыры невозможно получить никакую информацию. Как только вокруг умирающей массивной звезды возник горизонт событий, становится невозможным выяснить какие бы то ни было детали того, что происходит под этим горизонтом. Наша Вселенная навсегда теряет доступ к информации о событиях под горизонтом событий. Поэтому черную дыру иногда называют *могилой для информации*.

Хотя при коллапсе звезды с появлением черной дыры и теряется огромное количество информации, все же некоторая информация извне остается. Например, сильнейшее искривление пространства-времени вокруг черной дыры указывает, что здесь умерла звезда. С массой мертвой звезды прямо связаны такие конкретные свойства дыры, как поперечник фотонной сферы или горизонта событий (см. рис. [8.4](#) и [8.5](#)). Хотя сама дыра в буквальном смысле черная, космонавт еще издалека обнаружит ее существование по гравитационному полю дыры. Измерив, насколько траектория его космического корабля отклонилась от прямолинейной, космонавт может точно вычислить полную массу черной дыры. Таким образом, масса черной дыры - это один из элементов информации, который не теряется при коллапсе.

Чтобы подкрепить это утверждение, рассмотрим пример двух одинаковых звезд, образующих при коллапсе черные дыры. На одну звезду поместим тонну камней, а на другую - слона весом в одну тонну. После образования черных дыр измерим напряженность гравитационного поля на больших расстояниях от них, скажем, по

наблюдениям орбит их спутников или планет. Окажется, что напряженности обоих полей одинаковы. На очень больших расстояниях от черных дыр для вычисления полной массы каждой из них можно воспользоваться ньютоновской механикой и законами Кеплера. Так как полные суммы масс входящих в каждую из черных дыр составных частей одинаковы, идентичными окажутся и результаты. Но что еще существеннее, это невозможность указать, какая из этих дыр поглотила слона, а какая - камни. Вот эта информация пропала навсегда. Тонну чего бы вы ни бросили в черную дыру, результат всегда будет одним и тем же. Вы сможете определить, какую массу вещества поглотила дыра, но сведения о том, какой формы, какого цвета, какого химического состава было это вещество, утрачиваются навсегда.

Полную массу черной дыры всегда можно измерить, поскольку гравитационное поле дыры влияет на геометрию пространства и времени на огромных расстояниях от нее. Находящийся далеко от черной дыры физик может поставить эксперименты по измерению этого гравитационного поля, например запустив искусственные спутники и наблюдая их орбиты. Это важный источник информации, позволяющий физику с уверенностью говорить, что именно черная дыра *не* поглотила. В частности, все, что может измерить этот гипотетический исследователь вдали от черной дыры, *не было* поглощено полностью.

Начиная в середине XIX в. разработку теории электромагнетизма, Джеймс Клерк Максвелл располагал большими количествами информации об электрическом и магнитном полях. В частности, удивительным был тот факт, что электрические и магнитные силы убывают с расстоянием в точности так же, как и сила тяжести. И гравитационные, и электромагнитные силы - это силы *большого радиуса действия*. Их можно ощутить на очень большом удалении от их источников. Напротив, силы, связывающие воедино ядра атомов, - силы сильного и слабого взаимодействий - имеют *короткий радиус действия*. Ядерные силы дают о себе знать лишь в очень малой области, окружающей ядерные частицы.

Большой радиус действия электромагнитных сил означает, что физик, находясь далеко от черной дыры, может предпринять эксперименты для выяснения, *заряжена* эта дыра или нет. Если у черной дыры имеется электрический заряд (положительный или отрицательный) или магнитный заряд (соответствующий северному или южному магнитному полюсу), то находящийся вдалеке физик способен при помощи

чувствительных приборов обнаружить существование этих зарядов. Таким образом, кроме информации о массе не теряется также информация о *заряде* черной дыры. Существует третий (и последний) важный эффект, который может измерить удаленный физик. Как будет видно из следующей главы, любой вращающийся объект стремится вовлечь во вращение окружающее его пространство-время. Это явление называется эффектом Лензе-Тирринга или эффектом увлечения инерциальных систем. Наша Земля при вращении тоже увлекает за собой пространство и время, но в очень малой степени. Но для быстро вращающихся массивных объектов этот эффект становится заметнее, и если черная дыра образовалась из *вращающейся* звезды, то увлечение пространства-времени вблизи нее будет вполне ощутимым. Физик, находящийся в космическом корабле вдали от этой черной дыры, заметит, что он постепенно вовлекается во вращение вокруг дыры в ту же сторону, в которую вращается она сама. И чем ближе к вращающейся черной дыре окажется наш физик, тем сильнее будет это вовлечение.

Рассматривая любое вращающееся тело, физики часто говорят о его *Моменте количества движения*; это - величина, определяемая как массой тела, так и скоростью его вращения. Чем быстрее вращается тело, тем больше его момент количества движения. Помимо массы и заряда момент количества движения черной дыры является той ее характеристикой, информация о которой не теряется.

В конце 1960-х - начале 1970-х годов астрофизики-теоретики упорно трудились над проблемой: информация о каких свойствах черных дыр сохраняется, а о каких - теряется в них? Плодом их усилий оказалась знаменитая теорема о том, что "у черной дыры нет волос", впервые сформулированная Джоном Уилером из Принстонского университета (США). Мы уже видели, что характеристики черной дыры, которые могут быть измерены удаленным наблюдателем, - это ее масса, ее заряд и ее момент количества движения. Эти три основные характеристики сохраняются при образовании черной дыры и определяют геометрию пространства-времени вблизи нее. Работами Стивена Хокинга, Вернера Израэля, Брандона Картера, Дэвида Робинсона и других исследователей было показано, что *только* эти характеристики сохраняются при образовании черных дыр. Иными словами, если задать массу, заряд и момент количества движения черной дыры, то о ней уже будет известно все - у черных дыр нет иных свойств, кроме массы, заряда и момента

количества движения. Таким образом, черные дыры - это очень простые объекты; они гораздо проще, чем звезды, из которых черные дыры возникают. Для полного описания звезды требуется знание большого количества характеристик, таких, как химический состав, давление, плотность и температура на разных глубинах. Ничего подобного у черной дыры нет (рис. 10.1). Право же, у черной дыры совсем нет волос! Поскольку черные дыры полностью описываются тремя параметрами (массой, зарядом и моментом количества движения), то должно существовать лишь несколько решений уравнений гравитационного поля Эйнштейна, причем каждое описывает свой "добропорядочный" тип черных дыр. Например, в предыдущих двух главах мы рассмотрели простейший тип черной дыры; эта дыра имеет лишь массу, и ее геометрия определяется решением Шварцшильда. Решение Шварцшильда было найдено в 1916 г., и хотя с тех пор было получено много других решений для черных дыр, обладающих только массой, *все* они оказались ему эквивалентными.

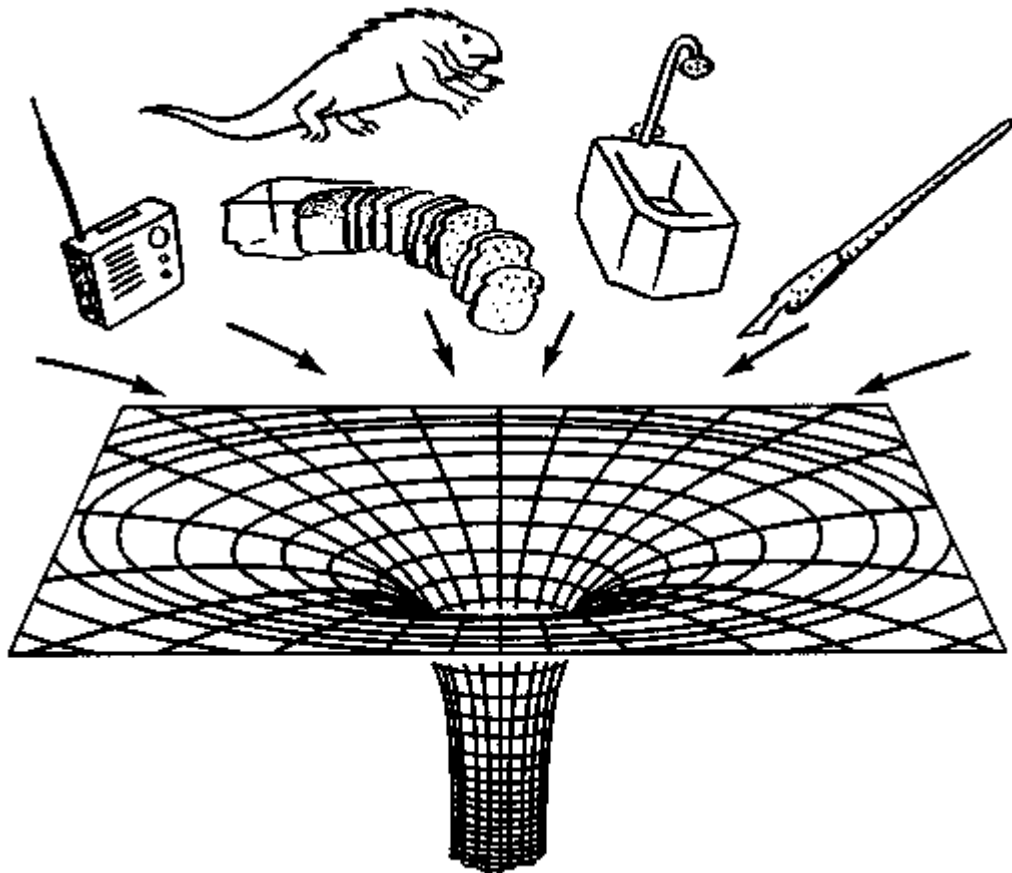


Рис. 10.1. "У черной дыры нет волос!" Почти всякая информация о телах, падающих в черную дыру, теряется навсегда. Избегают "переваривания" дырой только масса, заряд и момент количества движения падающих в нее объектов. Это значит, что черные дыры - очень простые объекты. Их полное описание характеризуется всего тремя параметрами -

массой, зарядом и моментом импульса. (По Дж. Уилеру.)

Невозможно представить себе, как могли бы черные дыры образоваться без вещества. Поэтому у любой черной дыры должна быть масса. Но вдобавок к массе у дыры могли бы существовать электрический заряд или вращение или и то, и другое вместе. Между 1916 и 1918 гг. Г. Райснер и Г. Нордстрём нашли решение уравнений поля, описывающее черную дыру с массой и зарядом. Следующий шаг на этом пути задержался до 1963 г., когда Рой П. Керр нашел решение для черной дыры, обладающей массой и моментом количества движения. Наконец, в 1965 г. Ньюман, Коч, Чиннапаред, Экстон, Пракаш и Торренс опубликовали решение для самого сложного типа черной дыры, а именно для дыры с массой, зарядом и моментом количества движения. Каждое из этих решений единственно - других возможных решений нет. Черная дыра характеризуется, самое большее, *тремя параметрами* - массой (обозначаемой через M) зарядом (электрическим или магнитным, обозначается через Q) и моментом количества движения (обозначается через a). Все эти возможные решения сведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Решения уравнений поля, описывающие черные дыры.

Типы черной	Описание черной дыры	Название	Год
Только масса	Самая "простая"	Решение	1916
Масса и заряд	Заряженная черная дыры.	Решение	1916 и
Масса и момент	Вращающаяся черная дыра.	Решение Керра	1963

a)	Осесимметрична		
Масса, заряд и момент импульса (параметры M , Q и a)	Вращающаяся заряженная черная дыра, самая сложная из всех. Осесимметрична	Решение Керра-Ньюмена	1965

Геометрия черной дыры решающим образом зависит от введения каждого дополнительного параметра (заряда, вращения или их вместе). Решения Райснера-Нордстрёма и Керра сильно отличаются как друг от друга, так и от решения Шварцшильда. Конечно, в пределе, когда заряд и момент количества движения обращаются в нуль ($Q \rightarrow 0$ и $a \rightarrow 0$), все три более сложных решения сводятся к решению Шварцшильда. И все же черные дыры, обладающие зарядом и/или моментом количества движения, имеют ряд замечательных свойств.

Во время первой мировой войны Г. Райснер и Г. Нордстрём открыли решение эйнштейновских уравнений гравитационного поля, полностью описывающее "заряженную" черную дыру. У такой черной дыры может быть электрический заряд (положительный или отрицательный) и/или магнитный заряд (соответствующий северному или южному магнитному полюсу). Если электрически заряженные тела - дело обычное, то магнитно заряженные - вовсе нет. Тела, у которых есть магнитное поле (например, обычный магнит, стрелка компаса, Земля), обладают обязательно северным и южным полюсами *сразу*. Доль самого последнего времени большинство физиков считали, что магнитные полюсы всегда встречаются только парами. Однако в 1975 г. группа ученых из Беркли и Хьюстона объявила, что в ходе одного из экспериментов ими открыт магнитный монополюс. Если эти результаты подтвердятся, то окажется, что могут существовать и отдельные магнитные заряды, т.е. что северный магнитный полюс может существовать отдельно от южного, и наоборот. Решение Райснера-Нордстрёма допускает возможность существования у черной дыры магнитного поля монополя. Независимо от того, как черная дыра приобрела свой заряд, все свойства этого заряда в решении Райснера-Нордстрёма объединяются в одну характеристику - число Q . Эта особенность аналогична тому факту, что решение Шварцшильда не зависит от того, каким образом черная дыра приобрела свою массу. Ее могли

составить слоны, камни или звезды - конечный результат будет всегда одним и тем же. При этом геометрия пространства-времени в решении Райснера-Нордстрёма не зависит от природы заряда. Он может быть положительным, отрицательным, соответствовать северному магнитному полюсу или южному - важно лишь его полное значение, которое можно записать как $|Q|$. Итак, свойства черной дыры Райснера-Нордстрёма зависят лишь от двух параметров - полной массы дыры M и ее полного заряда $|Q|$ (иными словами, от его абсолютной величины). Размышляя о реальных черных дырах, которые могли бы реально существовать в нашей Вселенной, физики пришли к заключению, что решение Райснера-Нордстрёма оказывается *не очень* существенным, ибо электромагнитные силы намного больше сил тяготения. Например, электрическое поле электрона или протона в триллионы триллионов раз сильнее их гравитационного поля. Это значит, что если у черной дыры был бы достаточно большой заряд, то огромные силы электромагнитного происхождения быстро разбросали бы во все стороны газ и атомы, "плавающие" в космосе. В самое короткое время частицы, имеющие такой же знак заряда, как и черная дыра, испытали бы мощное отталкивание, а частицы с противоположным знаком заряда - столь же мощное притяжение к ней. Притягивая частицы с зарядом противоположного знака, черная дыра вскоре стала бы электрически нейтральной. Поэтому можно полагать, что реальные черные дыры обладают зарядом лишь малой величины. Для реальных черных дыр значение $|Q|$ должно быть гораздо меньше, чем M . В самом деле, из расчетов следует, что черные дыры, которые могли бы реально существовать в космосе, должны иметь массу M по крайней мере в миллиард миллиардов раз большую, чем величина $|Q|$. Математически это выражается неравенством

Несмотря на эти, увы, прискорбные ограничения, налагаемые законами физики, весьма поучительно провести подробный анализ решения Райснера-Нордстрёма. Такой анализ подготовит нас к более основательному обсуждению решения Керра в следующей главе.

Чтобы проще подойти к пониманию особенностей решения Райснера-Нордстрёма, рассмотрим обычную черную дыру без заряда. Как следует из решения Шварцшильда, такая дыра состоит из сингулярности, окруженной горизонтом

событий. Сингулярность расположена в центре дыры (при $r=0$), а горизонт событий - на расстоянии 1 шварцшильдовского радиуса (именно при $r=2M$). Теперь представим себе, что мы придали этой черной дыре небольшой электрический заряд. Как только у дыры появился заряд, мы должны обратиться к решению Райснера-Нордстрёма для геометрии пространства-времени. В решении Райснера-Нордстрёма имеются *два* горизонта событий. Именно, с точки зрения удаленного наблюдателя, существуют два положения на разных расстояниях от сингулярности, где время останавливает свой бег. При самом ничтожном заряде горизонт событий, находившийся ранее на "высоте" 1 шварцшильдовского радиуса, сдвигается немножко ниже к сингулярности. Но еще более удивительно то, что сразу же вблизи сингулярности возникает второй горизонт событий. Таким образом сингулярность в заряженной черной дыре окружена *двумя горизонтами событий - внешним и внутренним*. Структуры незаряженной (шварцшильдовской) черной дыры и заряженной черной дыры Райснера-Нордстрёма (при $M > |Q|$) сопоставлены на рис. 10.2.

Если мы будем увеличивать заряд черной дыры, то внешний горизонт событий станет сжиматься, а внутренний - расширяться. Наконец, когда заряд черной дыры достигнет значения, при котором выполняется равенство $M=|Q|$, оба горизонта сливаются друг с другом. Если увеличить заряд еще больше, то горизонт событий полностью исчезнет, и остается *"голая" сингулярность*. При $M < |Q|$ горизонты событий *отсутствуют*, так что сингулярность открывается прямо во внешнюю Вселенную. Такая картина нарушает знаменитое "правило космической этики", предложенное Роджером Пенроузом. Это правило ("нельзя обнажать сингулярность!") будет подробнее обсуждаться ниже. Последовательность схем на рис. 10.3 иллюстрирует расположение горизонтов событий у черных дыр, имеющих одну и ту же массу, но разные значения заряда.

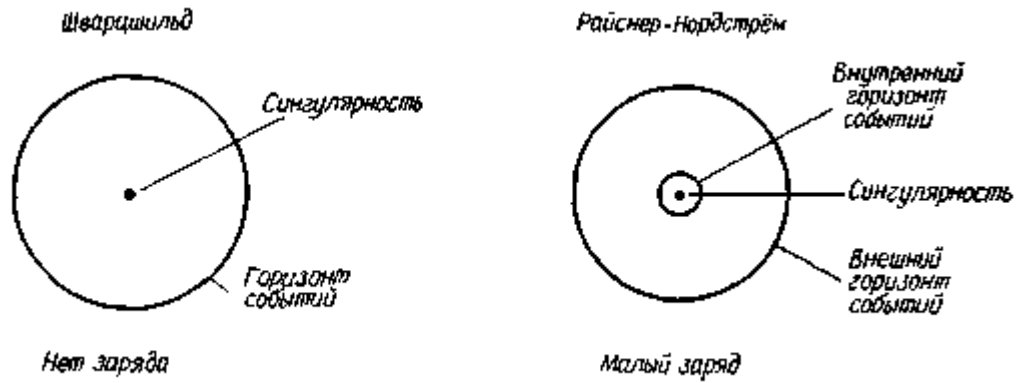


Рис. 10.2. Заряженные и нейтральные черные дыры. Добавление хотя бы ничтожного по величине заряда приводит к появлению второго (внутреннего) горизонта событий прямо над сингулярностью.

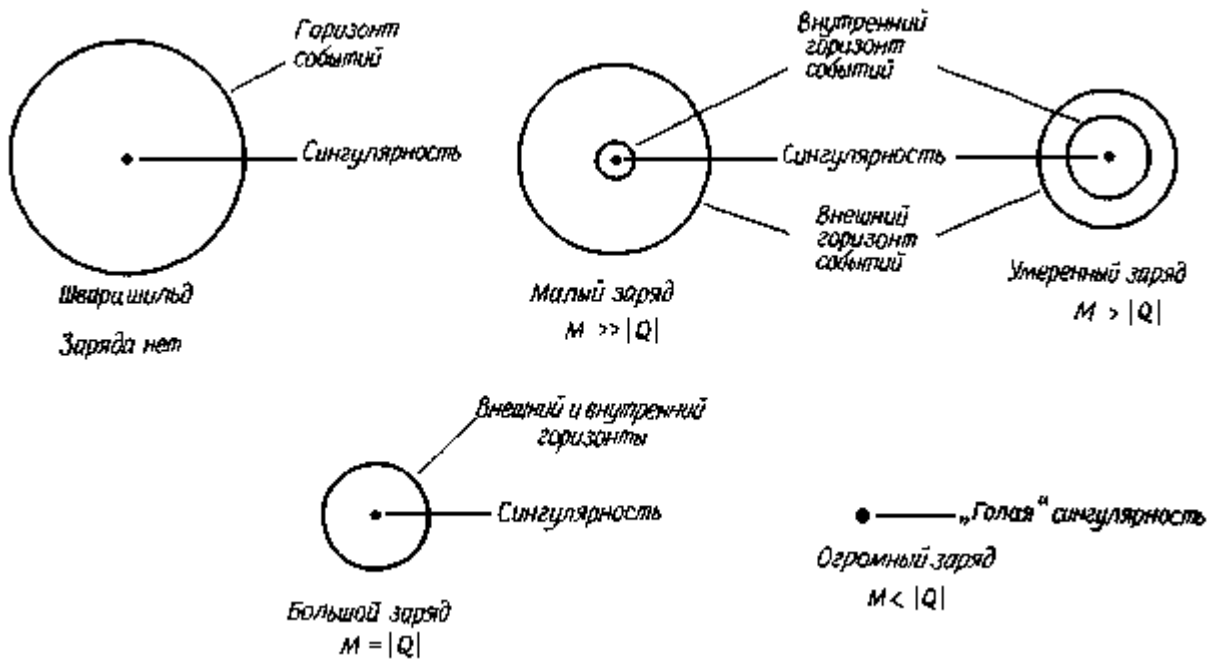


Рис. 10.3. Изображение заряженных черных дыр в пространстве. По мере добавления заряда в черную дыру внешний горизонт событий постепенно сжимается, а внутренний - расширяется. Когда полный заряд дыры достигает значения $|Q|=M$, оба горизонта сливаются в один. При еще больших значениях заряда горизонт событий вообще исчезает и остается открытая, или "голая", сингулярность.

Рис. 10.3 иллюстрирует положение горизонтов событий относительно сингулярности черных дыр в пространстве, но еще полезнее проанализировать диаграммы пространства-времени для заряженных черных дыр. Чтобы построить такие диаграммы - графики зависимости времени от расстояния, мы начнем с "прямолинейного" подхода, использованного в начале предыдущей главы (см. рис. 9.3). Измеряемое наружу от сингулярности расстояние откладывается по горизонтали, а время, как обычно, - по вертикали. На такой диаграмме левая часть

графика всегда ограничивается сингулярностью, описываемой линией, идущей вертикально от удаленного прошлого к далекому будущему. Мировые линии горизонтов событий также представляют собой вертикали и отделяют внешнюю Вселенную от внутренних областей черной дыры.

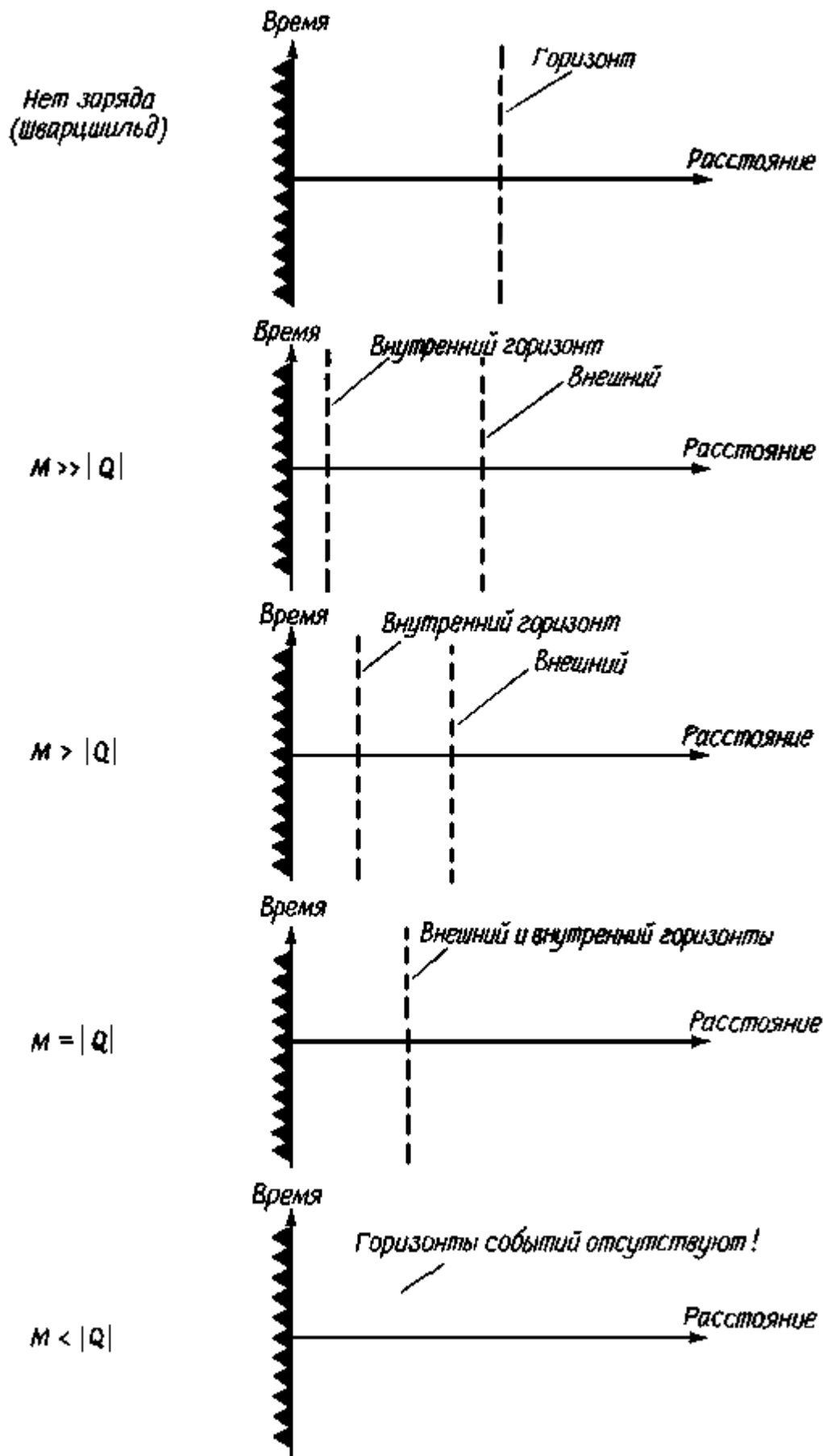


Рис. 10.4. *Диаграммы пространства-времени для заряженных черных дыр.* Эта последовательность диаграмм иллюстрирует вид пространства-времени для черных дыр, имеющих одинаковую массу, но разные заряды. Вверху для сравнения приведена диаграмма для шварцшильдовской черной дыры ($|Q|=0$).

На рис. 10.4 показаны диаграммы пространства-времени для нескольких черных дыр, имеющих одинаковые массы, но разные заряды. Вверху для сравнения приведена диаграмма для шварцшильдовской черной дыры (вспомним, что решение Шварцшильда - это то же, что решение Райснера-Нордстрёма при $|Q|=0$). Если этой дыре добавить совсем небольшой заряд, то второй

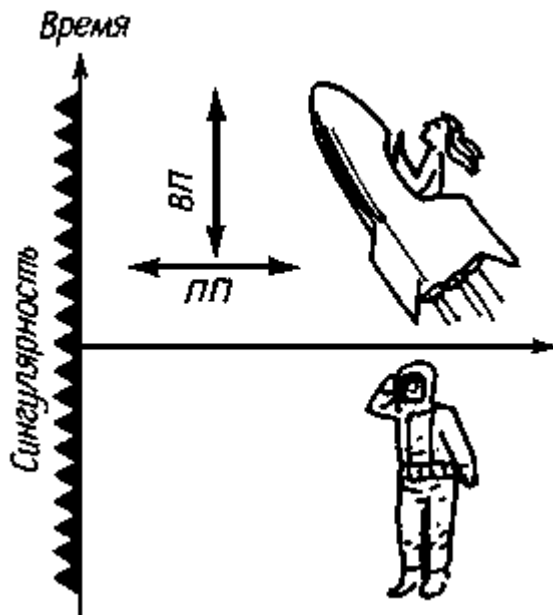


Рис. 10.5. *"Голая" сингулярность.* Черную дыру, заряд которой чудовищно ($M < |Q|$), вообще не окружает горизонт событий. Вопреки "закону космической этики" сингулярность красуется на виду у всей внешней Вселенной.

(внутренний) горизонт будет расположен непосредственно вблизи сингулярности. Для черной дыры с зарядом умеренной величины ($M > |Q|$) внутренний горизонт расположен дальше от сингулярности, а внешний уменьшил свою высоту над сингулярностью. При очень большом заряде ($M = |Q|$; в этом случае говорят о *предельном решении Райснера-Нордстрёма*) оба горизонта событий сливаются воедино. Наконец, когда заряд исключительно велик ($M < |Q|$), горизонты событий просто исчезают. Как видно из рис. 10.5, при отсутствии горизонтов сингулярность открывается прямо во внешнюю Вселенную. Удаленный

наблюдатель может видеть эту сингулярность, а космонавт может влететь прямо в область сколь угодно сильно искривленного пространства-времени, не пересекая никаких горизонтов событий. Подробный расчет показывает, что непосредственно рядом с сингулярностью тяготение начинает действовать как отталкивание. Хотя черная дыра и притягивает к себе космонавта, пока тот находится достаточно далеко от нее, но стоит ему приблизиться к сингулярности на очень малое расстояние, и он подвергнется отталкиванию. Полной противоположностью случая решения Шварцшильда является область пространства непосредственно около сингулярности Райснера-Нордстрёма - это царство антигравитации.

Неожиданности решения Райснера-Нордстрёма не исчерпываются двумя горизонтами событий и гравитационным отталкиванием вблизи сингулярности. Вспоминая сделанный выше подробный анализ решения Шварцшильда, можно думать, что диаграммы типа изображенных на рис. 10.4 описывают далеко *не все* стороны картины. Так, в геометрии Шварцшильда мы столкнулись с большими трудностями, вызванными наложением друг на друга в упрощенной диаграмме *разных* областей пространства-времени (см. рис. [9.9](#)). Такие же трудности ждут нас и в диаграммах типа рис. 10.4, так что пора перейти к их выявлению и преодолению.

Легче понять *глобальную структуру* пространства-времени, применяя следующие элементарные правила. Выше мы разобрались, в чем состоит глобальная структура шварцшильдовской черной дыры. Соответствующая картина, именуемая *диаграммой Пенроуза*, изображена на рис. [9.18](#). Она может быть названа и диаграммой Пенроуза для частного случая черной дыры Райснера-Нордстрёма, когда заряд отсутствует ($|Q|=0$). Более того, если мы лишим дыру Райснера-Нордстрёма заряда (т.е. перейдем к пределу $|Q|\rightarrow 0$), то наша диаграмма (какой бы она ни была) обязательно сведется в пределе к диаграмме Пенроуза для решения Шварцшильда. Отсюда следует наше первое правило: должна существовать другая Вселенная, противоположная нашей, достижение которой возможно лишь по запрещенным пространственноподобным линиям.

При построении диаграммы Пенроуза для заряженной черной дыры появляются основания ожидать существования множества Вселенных. У каждой из них должно быть пять типов бесконечностей

(\mathcal{J}^+ , \mathcal{J}^- , I^0 , I^+ и I^-), рассмотренных в предыдущей главе. Кроме того, каждая из этих внешних Вселенных должна изображаться в виде треугольника, так как метод конформного отображения Пенроуза работает в данном случае как бригада маленьких бульдозеров (см. рис. 9.14 или 9.17), "сгребаящих" все пространство-время в один компактный треугольник. Поэтому нашим вторым правилом будет следующее: любая внешняя Вселенная должна представляться в виде треугольника, обладающего пятью типами бесконечностей. Такая внешняя Вселенная может быть ориентирована либо направо (как на рис. 10.6), либо налево.

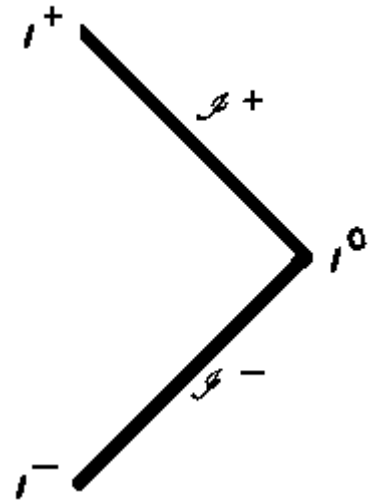


Рис. 10.6. Внешняя Вселенная. На диаграмме Пенроуза для любой черной дыры внешняя Вселенная всегда изображается треугольником с пятью бесконечностями (I^+ , S^- , I^- , S^+ , I^+). Такая внешняя Вселенная может быть ориентирована углом направо (как изображено на рисунке) или налево.

Чтобы прийти к третьему правилу, напомним, что на диаграмме Пенроуза (см. рис. 9.18) горизонт событий шварцшильдовской черной дыры имел наклон 45°. Итак, третье правило: любой горизонт событий должен быть светоподобен, и поэтому всегда имеет наклон 45°.

Для вывода четвертого (и последнего) правила вспомним, что при переходе через горизонт событий пространство и время менялись ролями в случае шварцшильдовской черной дыры. Из подробного анализа пространственноподобных и временноподобных направлений для заряженной черной дыры следует, что и здесь получится та же картина. Отсюда четвертое правило: пространство и время меняются ролями *всякий раз*, когда пересекается горизонт событий.

На рис. 10.7 только что сформулированное четвертое правило проиллюстрировано для случая черной дыры с малым или умеренным зарядом ($M > |Q|$). Вдали от такой заряженной черной дыры пространственноподобное направление параллельно пространственной оси, а временноподобное - параллельно временной оси. Пройдя под внешний горизонт событий, мы обнаружим смену ролей этих двух направлений - пространственноподобное направление теперь стало параллельно оси времени, а временноподобное - параллельно пространственной оси. Однако, продолжая движение к центру и опустившись под внутренний горизонт событий, мы становимся свидетелями второй смены ролей. Вблизи сингулярности ориентация

пространственноподобного и временноподобного направлений становится такой же, какой она была вдали от черной дыры.

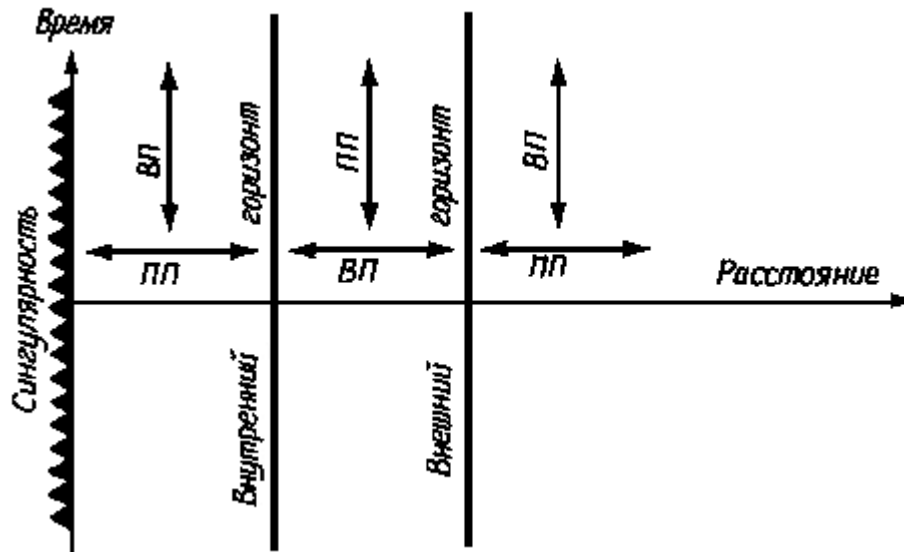


Рис. 10.7. Смена ролей пространства и времени (для $M > |Q|$). Всякий раз при пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями. Это значит, что в заряженной черной дыре из-за наличия двух горизонтов событий полная смена ролей у пространства и времени происходит дважды.

Двукратная смена ролей пространственноподобного и временноподобного направлений имеет решающее значение для природы сингулярности заряженной черной дыры. В случае шварцшильдовской черной дыры, у которой нет заряда, пространство и время меняются ролями *всего один раз*. Внутри единственного горизонта событий линии постоянного расстояния направлены в пространственноподобном (горизонтальном) направлении. Значит, линия, изображающая расположение сингулярности ($r=0$), должна быть горизонтальной, т.е. направлена пространственноподобно. Однако, когда имеются *два* горизонта событий, линии постоянного расстояния вблизи сингулярности имеют временноподобное (вертикальное) направление. Поэтому линия, описывающая положение сингулярности заряженной дыры ($r=0$), должна быть вертикальной, и ее следует ориентировать временноподобно. Поэтому так мы приходим к заключению первостепенной важности: сингулярность заряженной черной дыры должна быть временноподобной!

Теперь можно, воспользовавшись приведенными выше правилами, построить диаграмму Пенроуза для решения Райснера-Нордстрёма. Начнем с того, что представим себе космонавта, находящегося в нашей Вселенной (скажем, просто на

Земле). Он садится в свой космический корабль, включает двигатели и направляется к заряженной черной дыре. Как видно из рис. 10.8, наша Вселенная имеет на диаграмме Пенроуза вид треугольника с пятью бесконечностями. Любой допустимый

45° к вертикали, так как лететь со сверхсветовой скоростью он не может. На рис. 10.8 такие допустимые мировые линии

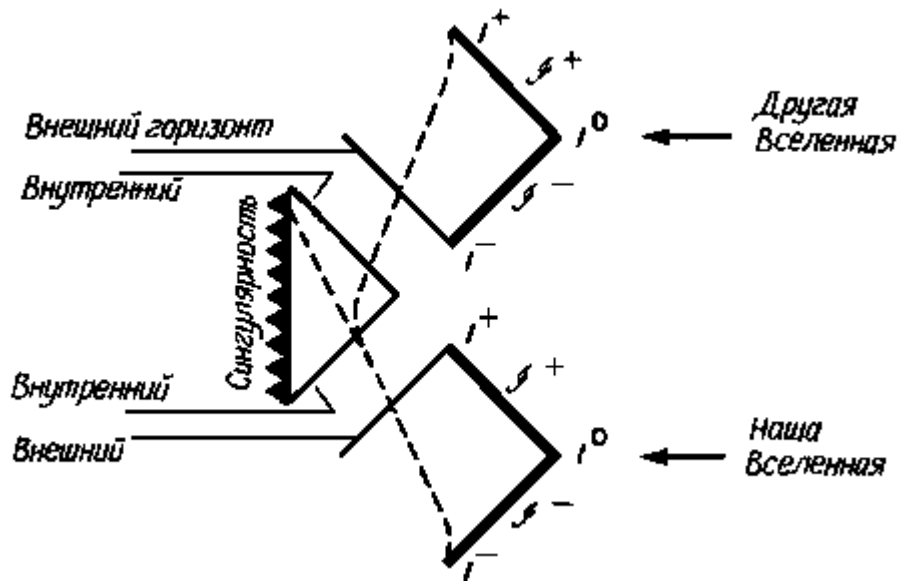


Рис. 10.8. Участок диаграммы Пенроуза. Часть диаграммы Пенроуза для решения Райснера-Нордстрёма можно построить, рассматривая возможные мировые линии космонавта, направляющегося из нашей Вселенной в заряженную черную дыру.

изображены пунктиром. С приближением космонавта к заряженной черной дыре он опускается под внешний горизонт событий (который должен иметь наклон точно 45°). Пройдя этот горизонт, космонавт уже никогда не сможет вернуться в *нашу* Вселенную. Однако он может опуститься дальше под внутренний горизонт событий, также имеющий наклон 45°. Под этим внутренним горизонтом космонавт может по глупости столкнуться с сингулярностью, где ему придется подвергнуться действию гравитационного отталкивания и где пространство-время искривлено бесконечно сильно. Заметим, однако, что трагический исход полета отнюдь *не неизбежен!* Так как сингулярность заряженной черной дыры временноподобна, она должна на диаграмме Пенроуза изображаться вертикальной линией. Космонавт может избежать гибели, попросту направив свой космический корабль от сингулярности по разрешенному временноподобному пути, как это изображено на рис. 10.8. Спасительная траектория уводит его от сингулярности, и он снова пересекает внутренний горизонт событий, также имеющий наклон 45°. Продолжая полет,

космонавт выходит за внешний горизонт событий (и он имеет наклон 45°) и попадает во внешнюю Вселенную. Поскольку подобное путешествие, очевидно, требует времени, то последовательность событий вдоль мировой линии должна идти от прошлого к будущему. Поэтому космонавт *не может* вернуться снова в нашу Вселенную, а попадет в другую Вселенную, Вселенную будущего. Как и следовало ожидать, эта Вселенная будущего должна иметь вид треугольника с обычными пятью бесконечностями на диаграмме Пенроуза.

Следует подчеркнуть, что при построении этих диаграмм Пенроуза мы снова встречаемся как с черными, так и с белыми дырами. Космонавт может выскочить наружу сквозь горизонты событий и оказаться во внешней Вселенной будущего. Большинство физиков убеждены, что белых дыр в природе в принципе быть не может. Но мы все же продолжим теоретический разбор глобальной структуры пространства-времени, включающей существование бок о бок друг с другом черных и белых дыр. Доводы же, свидетельствующие против существования белых дыр, мы отложим до гл. [14](#).

Изложенные эпизоды полета и диаграммы на рис. 10.8 должны быть не более чем фрагментом некоего целого. Диаграмму Пенроуза для заряженной черной дыры необходимо дополнить по крайней мере одним экземпляром другой Вселенной, противоположной нашей, которая достижима лишь по (запрещенным) пространственноподобным мировым линиям. Такой вывод основывается на нашем *правиле 1*: если удалить из черной дыры ее заряд, то диаграмма Пенроуза должна свестись к изображению решения Шварцшильда. И хотя никто из нашей Вселенной никогда не сможет проникнуть в эту "другую" Вселенную ввиду невозможности двигаться быстрее света, мы все же можем себе представить космонавта из той, другой Вселенной, путешествующего к той же самой заряженной черной дыре. Его возможные мировые линии изображены на рис. 10.9.

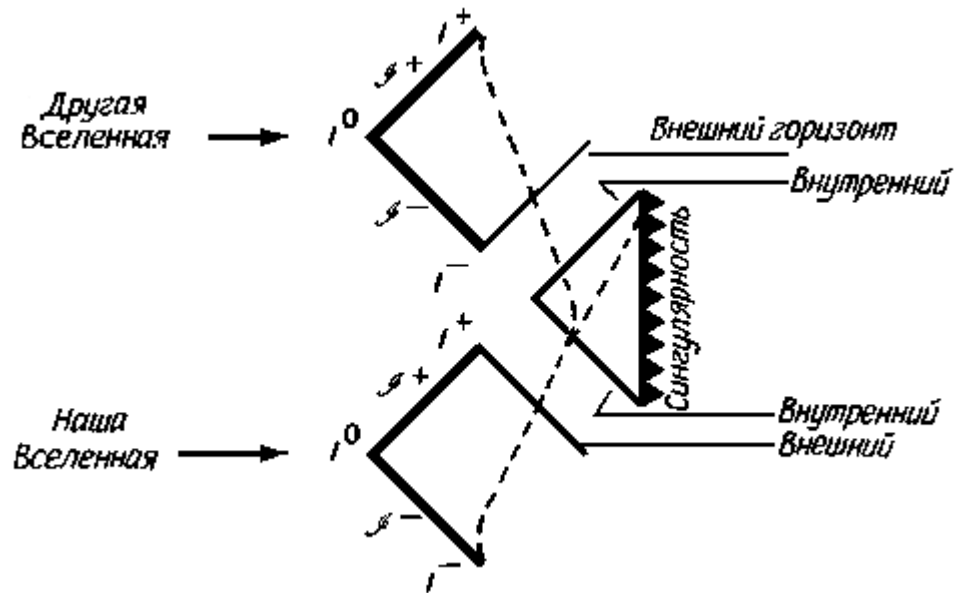
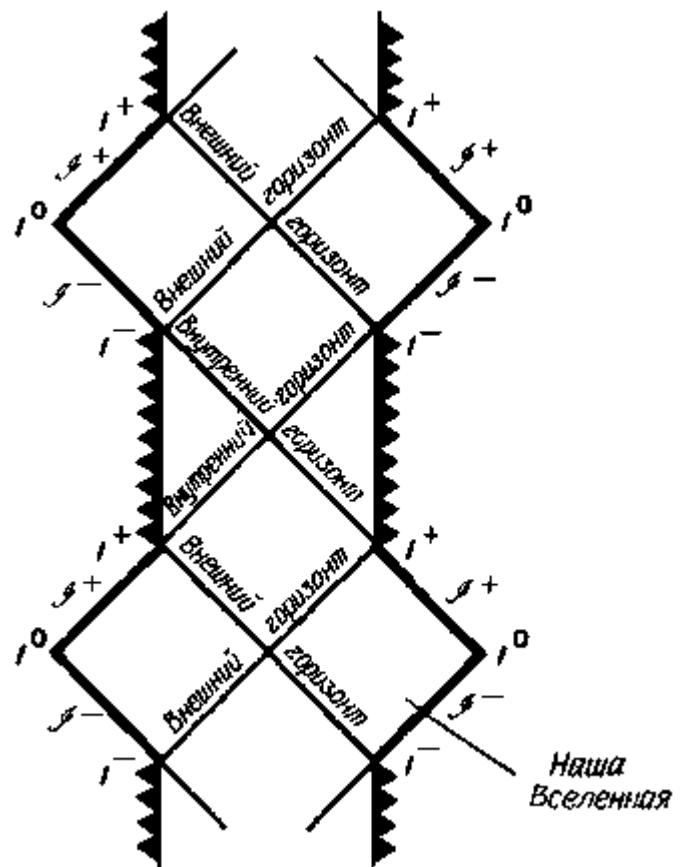


Рис. 10.9. Другой участок диаграммы Пенроуза. Этот новый участок диаграммы Пенроуза для решения Райснера-Нордстрёма можно построить, рассматривая возможные мировые линии космонавта из чужой Вселенной.

Такое путешествие чужого космонавта из другой Вселенной выглядит совершенно так же, как путешествие космонавта, вылетевшего из нашей Вселенной, с Земли. Чужая Вселенная также изображается на диаграмме Пенроуза привычным треугольником. По пути к заряженной черной дыре чужой космонавт пересекает внешний горизонт событий, который должен иметь наклон 45° . Позднее он опускается и под внутренний горизонт событий, также с наклоном 45° . Чужак стоит теперь перед выбором: либо разбиться о временноподобную сингулярность (она вертикальна на диаграмме Пенроуза), либо свернуть и снова пересечь внутренний горизонт событий. Чтобы избежать прискорбного конца, чужак решает покинуть черную дыру и выходит через внутренний горизонт событий, который, как обычно, имеет наклон 45° . Затем он пролетает и через внешний горизонт событий (наклоненный на диаграмме Пенроуза на 45°) в новую Вселенную будущего. Каждое из этих двух гипотетических путешествий охватывает только две части полной диаграммы Пенроуза. Полная же картина получается, если просто объединить эти части друг с другом, как показано на рис. 10.10.

Такая диаграмма должна быть повторена бесконечное число раз в будущее и в прошлое, поскольку каждый из рассмотренных двух космонавтов мог бы решить снова покинуть ту Вселенную, в которой он вынырнул, и опять отправиться в заряженную черную дыру. Таким образом космонавты могут проникнуть в другие Вселенные, еще более удаленные в будущее. Точно так же мы можем представить себе, как другие космонавты из Вселенных в отдаленном прошлом прибывают



в нашу Вселенную. Поэтому полная диаграмма Пенроуза повторяется в обе стороны во времени, подобно длинной ленте

Рис. 10.10. Полная диаграмма Пенроуза для черной дыры Райснера-Нордстрёма ($M \gg |Q|$). Полную диаграмму Пенроуза для черной дыры, имеющей малый или умеренный заряд ($M > |Q|$), можно построить, соединяя участки, изображенные на рис. 10.8 и 10.9. Эта диаграмма повторяется до бесконечности как в будущее, так и в прошлое.

с повторяющимся трафаретным рисунком. В целом глобальная геометрия заряженной черной дыры объединяет бесконечное число Вселенных в прошлом и в будущем с нашей собственной Вселенной. Это так же удивительно, как и то, что, используя заряженную черную дыру, космонавт может осуществлять перелеты из одних Вселенных в другие. Такая невероятная картина тесно связана с представлением о *белой дыре*, которое будет обсуждаться в одной из следующих глав.

Только что описанный подход к выяснению глобальной структуры пространства-времени касался случая черных дыр с малым или небольшим зарядом ($M > |Q|$). Однако в случае предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма (когда $M = |Q|$) заряд оказывается настолько большим, что внутренний и внешний горизонты сливаются

друг с другом. Такое объединение двух горизонтов событий приводит к ряду интересных последствий.

Вспомним, что вдали от заряженной черной дыры (вне внешнего горизонта событий) пространственноподобное направление параллельно пространственной оси, а временноподобное параллельно оси времени. Вспомним также, что вблизи сингулярности (под внутренним горизонтом событий - после того, как пространство и время дважды поменяются ролями) пространственноподобное направление снова параллельно пространственной оси, а временноподобное - оси времени. По мере того как заряд черной дыры Райснера-Нордстрема все больше и больше увеличивается, область *между* двумя горизонтами событий все уменьшается и уменьшается. Когда же, наконец, заряд возрастает настолько, что $M=|Q|$, эта промежуточная область сожмется до нуля. Следовательно, при переходе через объединенный внешне - внутренний горизонт событий пространство и время не меняются ролями. Конечно, можно с тем же успехом говорить и о двукратной смене ролей у пространства и времени, происходящей одновременно на единственном горизонте событий предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма. Как показано на рис. 10.11, временноподобное направление в ней повсюду параллельно оси времени, а пространственноподобное - везде параллельно пространственной оси.

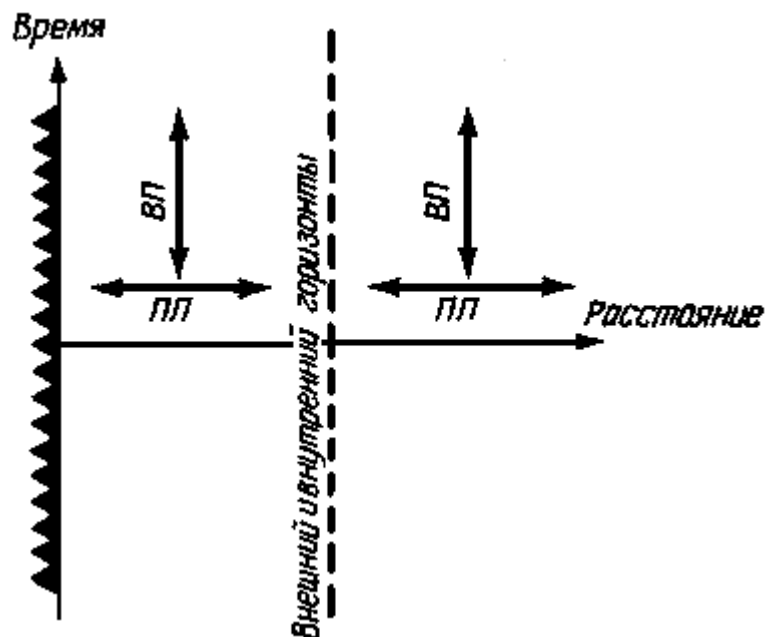


Рис. 10.11. Диаграмма пространства-времени для предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма ($M=|Q|$). Когда заряд черной дыры становится столь велик, что $M=|Q|$, внутренний и внешний горизонты

событий сливаются. Это значит, что при переходе через получившийся (двойной) горизонт смены ролей у пространства и времени не происходит.

Хотя у предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма имеется только один горизонт событий, положение здесь *совсем иное*, чем в случае шварцшильдовской черной дыры, у которой горизонт событий тоже всего один. При одиночном горизонте событий всегда имеет место смена ролей пространственно- и временноподобных направлений, как это видно на рис. 10.12. Однако у предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма горизонт событий можно трактовать как "двойной", т.е. как наложенные друг на друга внутренний и внешний горизонты. Именно поэтому смены ролей пространства и времени не происходит.

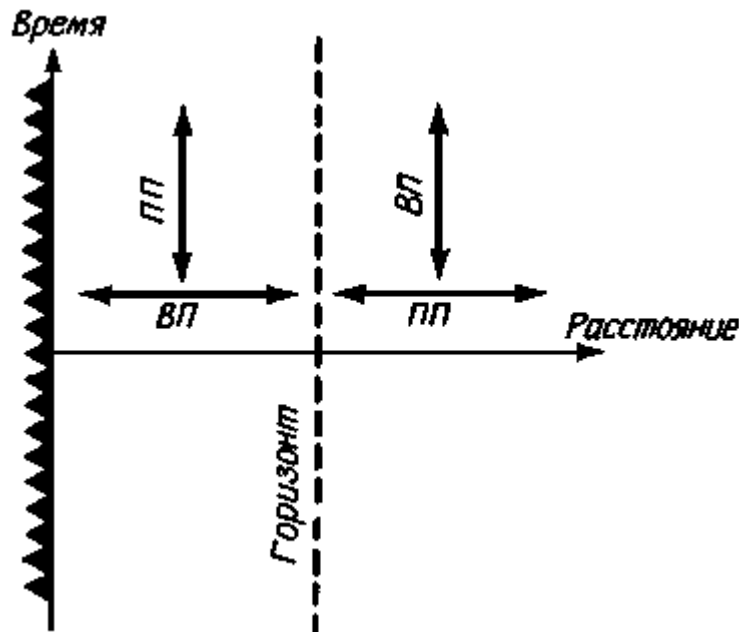
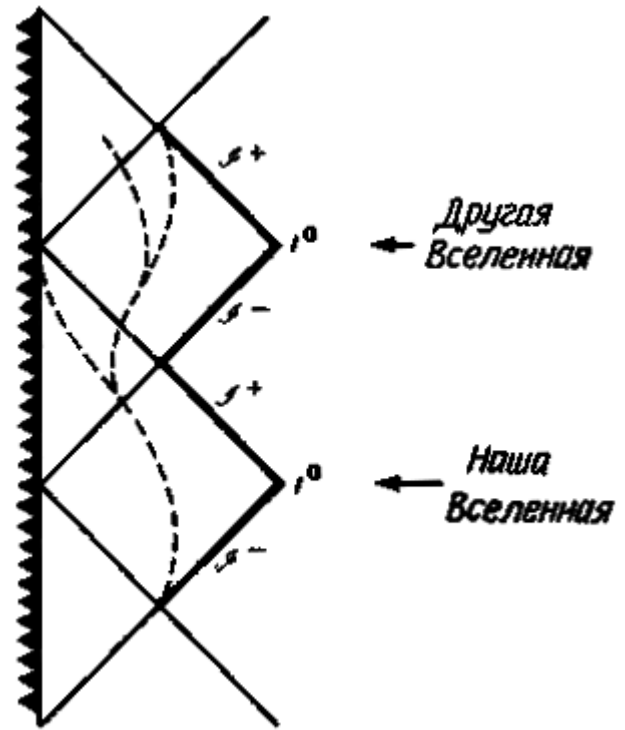


Рис. 10.12. Диаграмма пространства-времени для шварцшильдовской черной дыры ($|Q|=0$). Хотя у шварцшильдовской черной дыры (не имеющей заряда) есть лишь один горизонт событий, при переходе с одной его стороны на другую пространство и время меняются ролями. (Ср. с рис. [10.11](#).)

Факт слияния внешнего и внутреннего горизонтов событий у предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма означает, что требуется *новая* диаграмма Пенроуза. Как и прежде, ее можно построить, рассматривая мировую линию гипотетического космонавта. При этом список правил остается прежним, за тем существенным исключением, что при пересечении горизонта событий пространство и время *не* меняются ролями.

Представим себе космонавта, вылетающего с Земли и падающего в предельную черную дыру Райснера-Нордстрёма. Наша Вселенная, как обычно, изображается в виде треугольника на диаграмме Пенроуза. После погружения под горизонт событий космонавт волен сделать выбор: он может либо врезаться в сингулярность, которая временноподобна, а потому должна изображаться вертикально на диаграмме Пенроуза, либо (рис. 10.13)



увести свой космический корабль от сингулярности по разрешенной временноподобной мировой линии. Если он выбрал второй путь, то позднее он снова пересечет горизонт

Рис. 10.13. Диаграмма Пенроуза для предельной черной дыры Райснера-Нордстрёма ($M=|Q|$). Диаграмму глобальной структуры пространства-времени можно построить, если рассмотреть возможные мировые линии космонавта, ныряющего в предельную черную дыру Райснера-Нордстрёма и вынырывающего из нее.

событий, выходя в другую Вселенную. Перед ним снова встанет альтернатива - остаться в этой будущей Вселенной и слетать на какие-нибудь планеты или повернуть назад и снова отправиться в черную дыру. Если космонавт повернет обратно, он продолжит свой путь вверх по диаграмме Пенроуза, посещая любое число Вселенных будущего. Полная картина представлена на рис. 10.13. Как и прежде, диаграмма повторяется бесконечное число раз в прошлое и в будущее, подобно ленте с повторяющимся трафаретным рисунком.

С точки зрения математики допустима и черная дыра с огромным зарядом $M \ll Q$; правда, она не имеет смысла с точки зрения физики. В этом случае горизонты событий попросту исчезают, остается лишь "голая" сингулярность. Ввиду отсутствия горизонтов событий не может быть и речи о каком-то обмене ролями между пространством и временем. Сингулярность просто находится у всех на виду. "Голая" сингулярность - это не закрытая никакими горизонтами область бесконечно сильно искривленного пространства-времени.

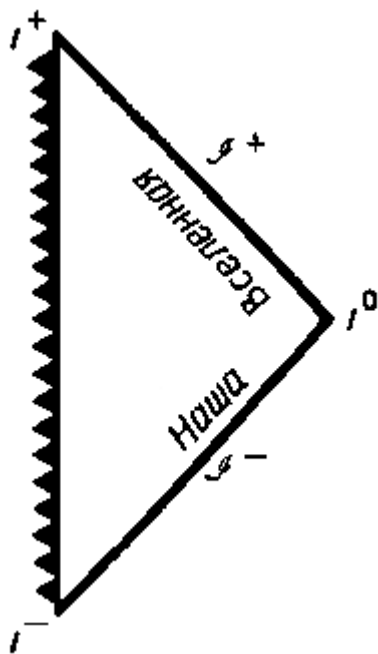


Рис. 10.14. "Голая" сингулярность. У "голой" Вселенную не связывает. Как и в случае любых сингулярности ($M < |Q|$) горизонтов событий нет. Черная дыра этого типа не связывает нашу Вселенную с какой-либо другой Вселенной.

Если космонавт, вылетев с Земли, устремляется к "голой" сингулярности, ему не приходится опускаться под горизонт событий. Он остается все время в нашей Вселенной. Вблизи сингулярности на него действуют мощные отталкивающие гравитационные силы. Располагая достаточно мощными двигателями, космонавт при некоторых условиях смог бы врезаться в сингулярность, хотя это - чистейшее безумие с его стороны. Простое падение на сингулярность - ни с какой другой Вселенной "голая" сингулярность нашу

сингулярность также временноподобна и поэтому должна изображаться на диаграмме Пенроуза вертикалью. Поскольку, кроме нашей Вселенной, других Вселенных теперь нет, то диаграмма Пенроуза для "голой" сингулярности выглядит совсем просто. Из рис. 10.14 видно, что наша Вселенная, как обычно, изображается треугольником с пятью бесконечностями, ограниченным слева сингулярностью. Что бы ни находилось левее сингулярности, отрезано от нас полностью. Через сингулярность никто и ничто не могут пройти.

Поскольку у реальных черных дыр могут быть лишь очень слабые заряды (если они есть у них вообще), то значительная часть описанного выше представляет лишь академический интерес. Однако мы в результате установили безотказно действующие правила построения сложных диаграмм Пенроуза. Хотя заряженные черные дыры, видимо, не играют роли в астрофизике, вращающиеся черные дыры для нее очень важны. Астрофизики даже предполагают, что реальные черные дыры могут вращаться с гигантскими скоростями, а те методы, которые были развиты выше, окажутся весьма полезными для анализа керровских черных дыр

11. Вращающиеся черные дыры

Мысль о том, что в космосе действительно должны существовать черные дыры, родилась тогда, когда астрономы начали лучше понимать законы эволюции звезд. В частности, в 1960-х годах было показано, что если масса умирающей звезды превышает три солнечных, ее сжатию не могут воспрепятствовать никакие известные физические силы. Отсюда последовал вывод, что такая звезда должна катастрофически сжаться - сколлапсировать - до объема, равного нулю, что приводит к появлению в пространстве-времени сингулярности, окруженной по меньшей мере одним горизонтом событий. К 1970 г. астрофизики доказали, что помимо массы черные дыры могут характеризоваться не более чем двумя дополнительными параметрами. У них могут быть заряд или момент количества движения или и то, и другое вместе. Черные дыры, обладающие лишь массой, описываются решением Шварцшильда и рассматривались в гл. 8 и 9. Черные дыры с массой и зарядом (электрическим или магнитным) описываются решением Райснера-Нордстрёма и рассматривались в предыдущей главе. Однако, анализируя поведение заряженных черных дыр, астрофизики нашли веские доводы, свидетельствующие против того, что реальные черные дыры могут иметь значительный заряд. Если бы черная дыра образовалась, имея большой заряд, то она скоро стала бы нейтральной, вызвав диссоциацию окружающего ее в космосе газа. Реальные черные дыры либо имеют весьма малый заряд, либо вообще лишены его.

Означает ли сказанное, что реальные черные дыры, которые могут встретиться в космосе, только шварцшильдовские? Отнюдь нет! Астрономы убеждены, что практически все звезды вращаются. Один оборот Солнца вокруг его оси занимает примерно 4 недели. К тому же астрономы обнаружили, что более массивные, чем Солнце, звезды вращаются быстрее. А такие массивные звезды - это одновременно и перспективные кандидаты в будущие черные дыры. Вспомним также наше обсуждение свойств пульсаров (гл. 7), где было выяснено, что при уменьшении размеров умирающей звезды скорость ее вращения обязательно увеличивается. Это - прямое следствие закона *сохранения момента количества движения*. Коллапсирующая звезда вращается быстрее по той же самой причине, по которой фигурист, делающий пируэт, начинает вращаться быстрее, если прижмет к себе руки (см. рис. 7.6). Поскольку умирающие звезды начинают вращаться все быстрее, когда в ходе коллапса они становятся все меньше, то вполне резонно предположить, что и

реальные черные дыры должны вращаться. У них должен быть момент количества движения.

Мысль о том, что достаточно реалистические модели черных дыр должны обладать вращением, не нова. Однако целых пятьдесят лет после создания общей теории относительности во всех расчетах использовалось только решение Шварцшильда. Все понимали, что нужно учитывать влияние вращения, но никто не мог правильно решить уравнения Эйнштейна. Собственно говоря, полное решение уравнений гравитационного поля с учетом вращения должно зависеть от двух параметров - массы черной дыры (обозначаемой буквой M) и момента количества движения дыры (обозначаемого буквой a). Кроме того, это решение должно быть *асимптотически плоским*, т.е. вдали от черной дыры пространство-время должно становиться плоским. Но уравнения гравитационного поля настолько сложны математически, что никому не удавалось отыскать ни одного точного решения, удовлетворяющего этим простым требованиям.

Решительный шаг вперед в этом направлении был сделан в 1963 г., когда Рой П. Керр, австралийский математик, работавший тогда в Техасском университете (США), нашел полное решение уравнений гравитационного поля для вращающейся черной дыры. Впервые почти за полсотни лет после основополагающей работы Эйнштейна астрофизики получили, наконец, математическое описание геометрии пространства-времени, окружающего массивный вращающийся объект. К 1975 г. была доказана *единственность* решения Керра. Точно так же, как все возможные решения для черных дыр, обладающих лишь массой (M), эквивалентны решению Шварцшильда, а все возможные решения для черных дыр с массой и зарядом (M и Q) эквивалентны решению Райснера-Нордстрёма, все возможные решения с массой и моментом количества движения (M и a) должны быть эквивалентны решению Керра. Получение решения Керра является одним из важнейших достижений теоретической астрофизики середины XX в.

До опубликования работы Керра был известен только один существенный эффект, связанный с вращением масс в общей теории относительности, - эффект увлечения инерциальных систем. Его иногда называют эффектом Лензе-Тирринга, и он кратко упоминался в предыдущей главе. Увлечение инерциальных систем - это такое явление, когда окружающее пространство-время вовлекается во вращение вместе с вращающимся телом. Можно привести общие доводы, которые показывают, что такое явление должно иметь место вблизи любого вращающегося тела. Однако до получения Керром в 1963 г. его решения у астрофизиков не было возможности математически показать, насколько важным должен быть этот эффект



Рис. 11.1. Лампа-вспышка в плоском пространстве-времени. Звездочкой обозначено положение лампы-вспышки в момент испускания светового импульса, окружность - положение расширяющегося наружу сферического слоя света через 1 микросекунду после вспышки. В плоском пространстве-времени центр слоя света - это местоположение лампы в момент вспышки.

в случае вращающихся черных дыр. К концу 1960-х годов подробный анализ увлечения инерциальных систем черными дырами привел к ряду замечательных открытий.

Вероятно, для понимания эффекта увлечения инерциальных систем черными дырами лучше всего использовать простой опыт с лампами-вспышками. Лампа-вспышка (типа используемой в фотографии) дает мгновенный импульс света. В обычном плоском пространстве-времени такой мгновенный импульс света распространяется одинаково во всех направлениях от лампы со скоростью 300000 км/с. В любой момент после вспышки существует распространяющийся наружу сферический слой света с центром в точности там, где находится лампа (см. рис. 11.1). Этот расширяющийся слой света можно схематически изобразить в виде окружности, в центре которой находится лампа-вспышка.



Рис. 11.2. *Вспышки света вблизи шварцшильдовской черной дыры.* Расширяющиеся сферические слои света от лампы-вспышки, которую включают около невращающейся черной дыры, затягиваются в дыру. При этом сферические слои света, испущенного лампой на горизонте событий или внутри его, распространяются только внутрь по отношению к месту, в котором произошла вспышка. Горизонт событий здесь одновременно играет роль *предела статичности*.

Чтобы разобраться в свойствах черных дыр, представим себе, что на разных расстояниях от дыры расположено множество ламп-вспышек. Возьмем сначала статическую (шварцшильдовскую) черную дыру, изображенную на рис. 11.2. Пусть лампы-вспышки, находящиеся на разных расстояниях от черной дыры, испустят свои световые импульсы; посмотрим, где будут находиться получившиеся расширяющиеся слои света. Вдали от черной дыры, где пространство-время практически плоское, центром такого расширяющегося слоя всегда оказывается место, в котором находилась лампа-вспышка в момент испускания импульса. Однако, переходя к лампам, расположенным все ближе и ближе к черной дыре, мы заметим, что расширяющийся сферический слой оказывается все более сдвинутым в сторону дыры. Если же лампа вспыхнула на самом горизонте событий, то расширяющийся слой света будет находиться полностью с внутренней стороны горизонта. Так должно быть, потому что ничто - даже свет - не может выйти через горизонт наружу. Внутри же горизонта событий свет так сильно притягивается к сингулярности, что место, где находилась лампа-вспышка, лежит вообще вне расширяющегося сферического слоя; это видно из рис. 11.2. Этот эксперимент свидетельствует, что внутри горизонта событий шварцшильдовской черной дыры сохранять состояние покоя *невозможно*. Так как двигаться быстрее света нельзя, то все, что попало внутрь горизонта событий, втягивается в сингулярность. Помимо того, если вы, находясь на горизонте событий, хотите остаться на нем в состоянии покоя, то для этого вам потребуется направленная наружу скорость, равная скорости света. Вообразим снова космонавта, летящего на космическом корабле. По мере приближения к черной дыре он должен включать двигатели корабля на все большую и большую мощность, чтобы не упасть в дыру. Чем ближе корабль подходит к дыре, тем большую мощность должны развивать его двигатели, чтобы удержать корабль на постоянной высоте над дырой. Разумеется, на горизонте событий потребовалась бы такая мощность двигателей, чтобы скорость корабля в направлении от черной дыры стала равна скорости света.

В противном случае космический корабль "засосало" бы внутрь дыры; оказавшись под горизонтом событий, корабль был бы обречен на неизбежное падение на сингулярность, сколь бы мощными ни были бы его двигатели. Поэтому горизонт событий шварцшильдовской черной дыры является наименьшим расстоянием от дыры, на котором космонавт еще мог бы находиться в состоянии покоя. Следовательно, в шварцшильдовской черной дыре горизонт событий - это одновременно и *предел статичности*. На пределе статичности необходимо двигаться со скоростью света, чтобы оставаться на одном и том же месте.

Теперь повторим опыт с лампами-вспышками вблизи вращающейся черной дыры. Вдали от дыры, где пространство-время практически плоское, расширяющиеся сферические слои света по-прежнему имеют своим центром место, где находилась лампа-вспышка в момент испускания светового импульса. Однако по мере приближения к черной дыре становятся заметными сразу *два* эффекта. Как и прежде, гравитационное поле черной дыры затягивает свет внутрь. Но так как дыра вращается, пространство-время вокруг нее вовлекается в это вращение. Поэтому расширяющийся слой света тоже вовлекается в это движение в том же направлении, в котором вращается дыра. Как видно из рис. 11.3, совместное действие этих двух эффектов приводит к тому, что расширяющийся сферический слой света вовлекается одновременно в падение внутрь и во вращение вокруг дыры. Чем ближе к черной дыре находится лампа-вспышка, тем сильнее выражено это явление, причем над горизонтом событий существует даже область, где расширяющиеся слои света оказываются полностью смещенными от места, в котором лампа испустила свой импульс. В итоге оказывается, что вблизи вращающейся черной дыры предел статичности расположен *выше* горизонта событий. Еще задолго до приближения к горизонту событий космонавт на своем корабле обнаружит, что должен двигаться со скоростью света, чтобы оставаться в покое. Внутри предела статичности он окажется вовлеченным в непреодолимое движение *внутрь и вокруг* дыры независимо от мощности двигателей корабля.

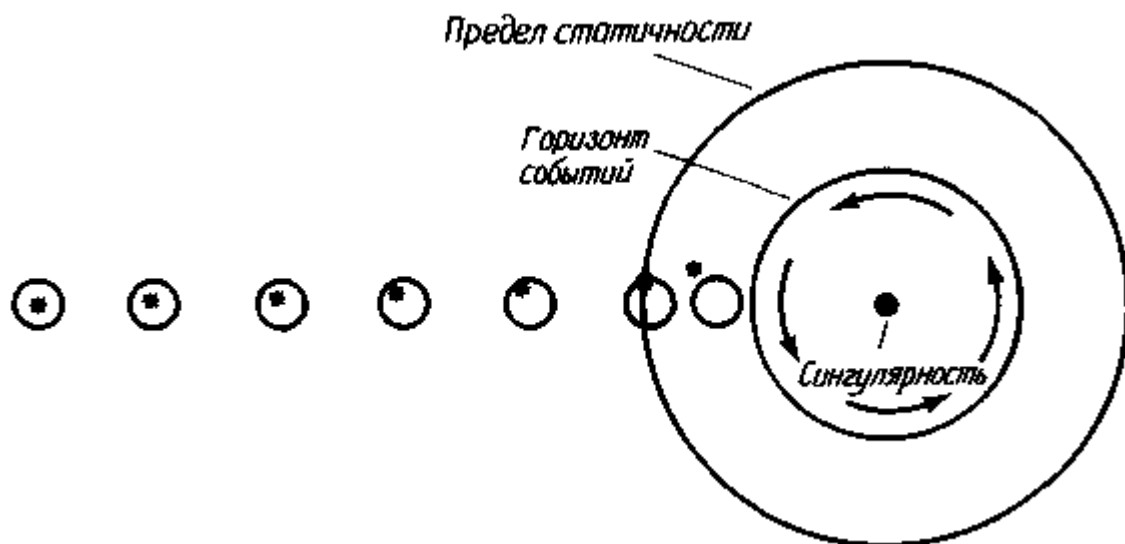


Рис. 11.3. Вспышки света вблизи вращающейся черной дыры. Расширяющиеся сферические слои света от лампы-вспышки, которую включают около вращающейся черной дыры, сразу затягиваются внутрь дыры и увлекаются в направлении ее вращения. Под влиянием этих двух эффектов предел статичности оказывается *выше* горизонта событий.

Из того факта, что предел статичности вращающейся черной дыры лежит выше ее горизонта событий, вытекают важные следствия. Как и для всех других черных дыр, после пересечения горизонта событий уже невозможно вернуться в свою Вселенную. Однако из любого места выше горизонта событий вернуться в свою Вселенную всегда возможно. Значит, если космонавт опустился ниже предела статичности, он еще может выбраться наружу, если только он не ушел и под горизонт событий. Иными словами, в пространстве-времени вокруг вращающейся черной дыры существует удивительная область, где оставаться в покое невозможно, но которую можно посещать с возвратом назад в свою Вселенную. Эта область расположена между пределом статичности и горизонтом событий и называется *эргосферой*. Схематический разрез эргосферы показан на рис. 11.4.

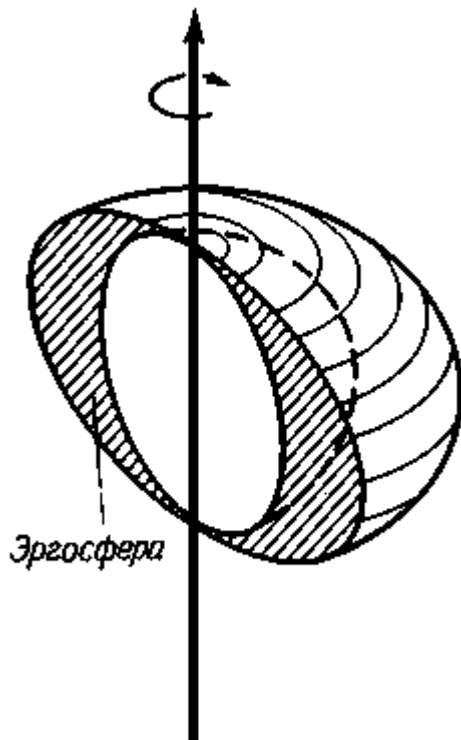


Рис. 11.4. Эргосфера. Между пределом статичности и горизонтом событий, окружающими вращающуюся черную дыру, находится область пространства-времени, называемая эргосферой. Внутри эргосферы невозможно находиться в состоянии покоя, но туда можно попасть и снова выбраться оттуда, не покидая нашу Вселенную.

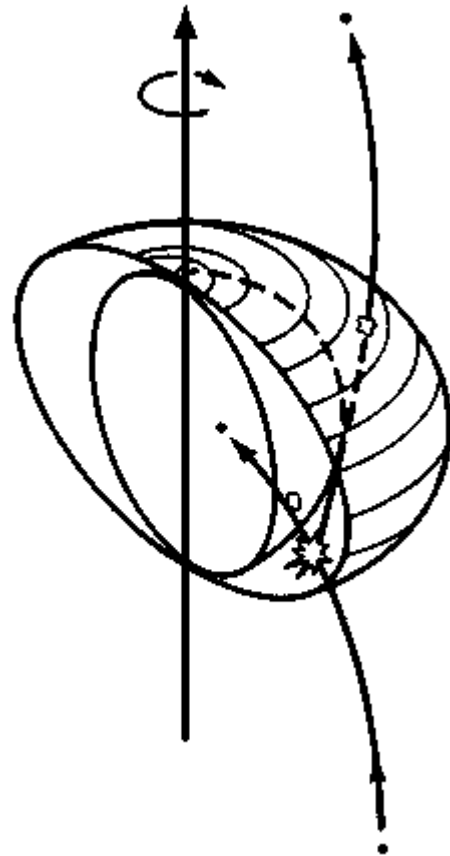


Рис. 11.5. Механизм Пенроуза. Если влетающая в эргосферу частица распадается там на две части, то часть, выбрасываемая назад из эргосферы, может вынести огромное количество энергии. Захваченная часть тела опускается под горизонт событий и "заглатывается" черной дырой. При этом некоторая доля энергии вращения дыры передается выбрасываемой частице. (По Дж. Уилеру.)

Одно из самых удивительных свойств эргосферы было открыто в 1969 г. Роджером Пенроузом. Пенроуз выполнил расчет движения тела, падающего в эргосферу вращающейся черной дыры и распадающегося там на две части. Он предположил, что одна часть падает под горизонт событий (и поэтому теряется навсегда), а другая отскакивает обратно в нашу Вселенную. Этот процесс изображен на рис. 11.5. Разумеется, возвращающаяся обратно часть будет меньше, чем первоначальное тело. И все же если это тело двигалось точно с нужной скоростью и в нужном направлении, то энергия выброшенной части может стать намного *больше* энергии первоначального объекта. В результате черная дыра станет вращаться немного медленнее. Таким образом от вращающихся черных дыр можно получить большое

количество энергии: с помощью рассмотренного здесь механизма Пенроуза часть энергии вращения дыры может быть передана выбрасываемому из эргосферы веществу.

К астрономическим следствиям этого явления мы обратимся в одной из следующих глав, а сейчас обрисуем научно-фантастическое приложение механизма Пенроуза. Допустим, что некая высокоразвитая цивилизация обнаружила в космосе вращающуюся черную дыру и построила вокруг этой дыры город (рис. 11.6). В городе запущена лента конвейера, уходящая в эргосферу, но повсюду остающаяся выше горизонта событий. Круглосуточно грузовики-мусоровозы собирают в городе все отбросы и перегружают их в контейнеры, расположенные на ленте конвейера. Конвейер уносит их в эргосферу, где весь мусор сбрасывается под горизонт событий. Вытряхивание мусора из контейнеров и есть, по сути, распад объекта на две части. Так как мусор поглощается черной дырой, то каждому контейнеру передается некоторая доля энергии вращения дыры. Поэтому лента конвейера испытывает мощное ускорение при каждом сбрасывании. Ее движение становится все более быстрым. Жители города вокруг черной дыры подключили к ленте конвейера генератор и получают от него огромное количество энергии!

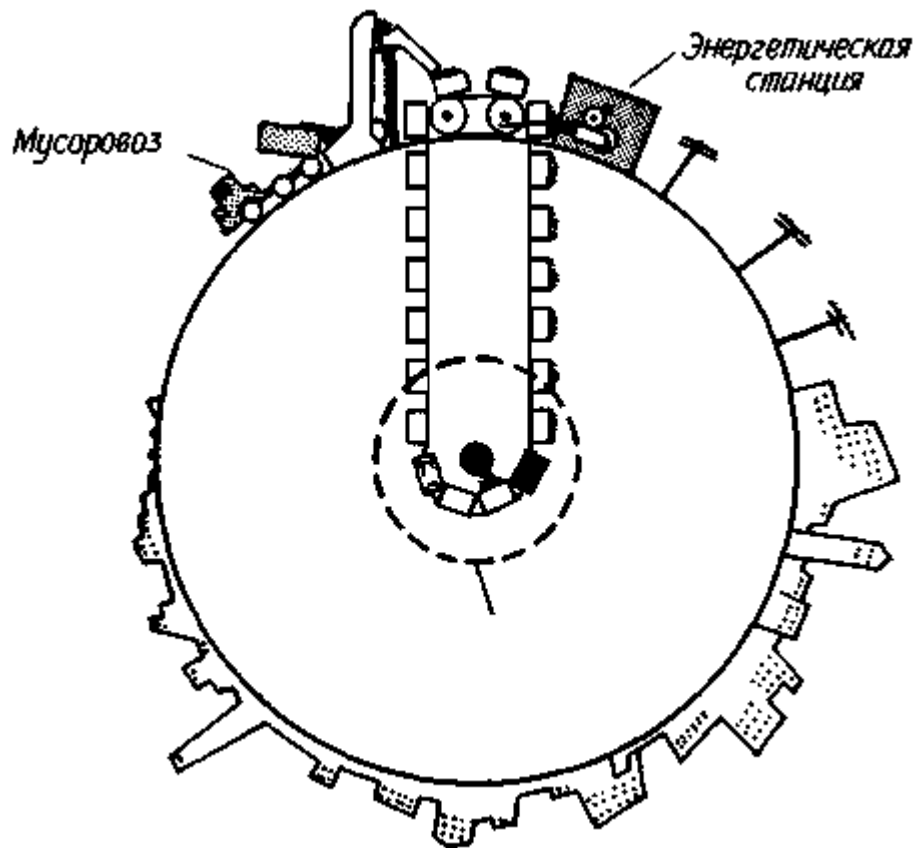


Рис. 11.6. *Город, не загрязняющий окружающую среду.* Когда мусор из контейнеров выбрасывается с ленты конвейера в эргосфере, лента конвейера испытывает ускорение. Если присоединить к ней электрогенератор, то можно использовать энергию, извлеченную из черной дыры. (По Мизнеру, Торну и Уилеру.)

Другое приложение механизма Пенроуза, хотя и менее фантастическое, но столь же удивительное, было найдено в начале 1970-х годов рядом астрофизиков, в том числе Прессом и Тьюкольским.

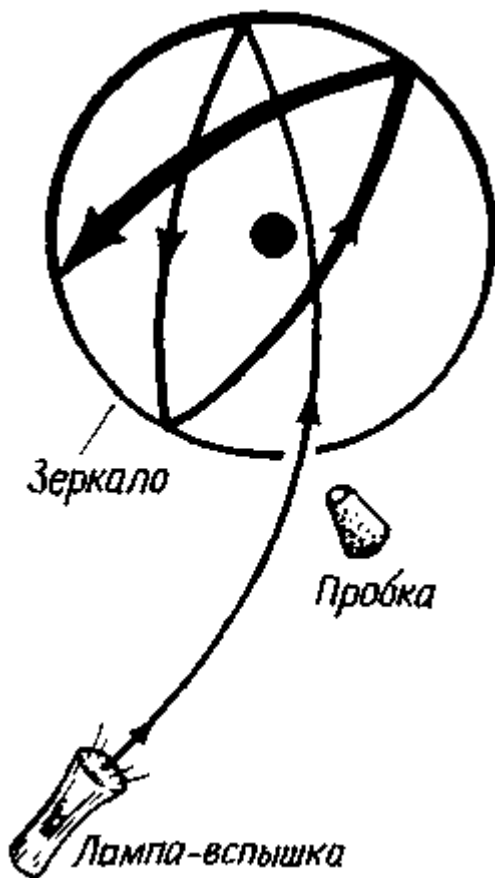


Рис. 11.7. *Сверхизлучательное рассеяние.* Проходящий вблизи вращающейся черной дыры свет усиливается. Если окружить такую черную дыру сферическим зеркалом, то излучение можно усилить практически неограниченно. Если в зеркале не будет никаких отверстий, то может произойти такое усиление света, что он разорвет на части зеркало и получится *чернодырная бомба*.

Подобно тому как частицы могут извлекать энергию из вращающейся черной дыры при пролете через ее эргосферу, может быть усилено и излучение, проходящее мимо такой дыры. Это явление называется *сверхизлучательным рассеянием*. Для иллюстрации представим себе черную дыру, окруженную сферическим зеркалом, как на рис. 11.7. Направим луч света на дыру через небольшое отверстие в зеркале. При многократном отражении в сферическом зеркале свет способен извлекать из черной дыры все большее количество энергии, а черная дыра постепенно замедляет вращение. В итоге через отверстие в окружающем дыру зеркале начинает выходить большое количество излучения - получается почти неисчерпаемый источник энергии. Однако если сразу после поступления первоначального луча отверстие в зеркале заделать, то излучению будет некуда выходить. Постоянно встречаясь со сферическим зеркалом и отражаясь от него, излучение будет становиться все более мощным при каждом прохождении через эргосферу. Поэтому зеркало будет

подвергаться все более сильному давлению излучения изнутри, пока напряжения в нем не станут столь велики, что зеркальная сфера взорвется, высвобождая огромное количество накопленной им энергии. Таков механизм *чернодырной бомбы*!

Помимо того что над вращающейся черной дырой происходят столь необычные вещи, решение Керра таит еще более удивительные неожиданности в "перекошенном" пространстве-времени вблизи сингулярности. В некоторых отношениях геометрия вращающихся черных дыр напоминает геометрию заряженных черных дыр. Поэтому дальше в этой главе будет много общего с анализом решения Райснера-Нордстрёма, проведенным в [гл. 10](#).

Вспомним, что у шварцшильдовской черной дыры имеется сингулярность, окруженная одним-единственным горизонтом событий. Такова простейшая из черных дыр. Черная дыра без вращения *сферически симметрична* - она одинакова во всех направлениях. Однако при "включении" вращения свойства черной Дыры уже оказываются *неодинаковы* во всех направлениях: существуют некие "привилегированные" направления. *Ось вращения,*

вокруг которой крутится черная дыра, непохожа на все другие направления. *Экваториальная плоскость* дыры (она пересекает ее на симметричные половины перпендикулярно оси вращения) тоже непохожа на все другие плоскости. Короче говоря, в разных направлениях свойства вращающейся черной дыры различны. Ввиду вращения такой черной дыры вокруг некоторой оси решение Керра называют *осесимметричным* (или *аксиально симметричным*).

Самые фундаментальные изменения в зависимости от направления во вращающейся черной дыре связаны с сингулярностью. Сингулярность - это всегда то место внутри черной дыры, где искривление пространства-времени бесконечно велико. Как в шварцшильдовской черной дыре, так и в черной дыре Райснера-Нордстрёма сингулярность представляет собою точку в центре дыры. Однако когда черная дыра еще и вращается, то природа сингулярности резко меняется. В керровской черной дыре сингулярность-это *кольцо* в середине дыры. Такая *кольцевая сингулярность* лежит в экваториальной плоскости вращающейся черной дыры: центр кольца находится на оси вращения, а само кольцо перпендикулярно оси. Если черная дыра не вращается (т. е. это решение Шварцшильда или Райснера-Нордстрёма), то всякий, направляющийся к центру дыры, наталкивается на сингулярность. Однако в случае вращающейся черной дыры в сингулярность попадает *только тот* космонавт, который летит к дыре в экваториальной плоскости. Кривизна пространства-времени становится бесконечной лишь при подходе со стороны экваториальной плоскости. Двигаясь под любым иным углом, а не в экваториальной плоскости, космонавт *не заметит* бесконечного искривления пространства-времени. Космонавт, приближающийся к центру керровской черной дыры под любым отличным от нуля углом к экваториальной плоскости, *не будет* непременно разорван на части бесконечно большими приливными силами.

Такой кольцевой характер керровской сингулярности - поистине изумительное свойство вращающихся черных дыр. Он означает, что космонавт, летящий к центру керровской черной дыры, может пройти невредимым *сквозь* это кольцо (рис. 11.8). Прокочив сквозь кольцевую сингулярность, космонавт попадает в совершенно новую и странную область пространства-времени, с какой мы еще не встречались. Это - *отрицательное пространство*. Вопреки тому, что говорилось в предыдущих главах, космонавт, пройдя сквозь кольцевую сингулярность, оказывается на *отрицательном расстоянии* от центра черной дыры. Так можно оказаться в "минус десяти километрах" от дыры!

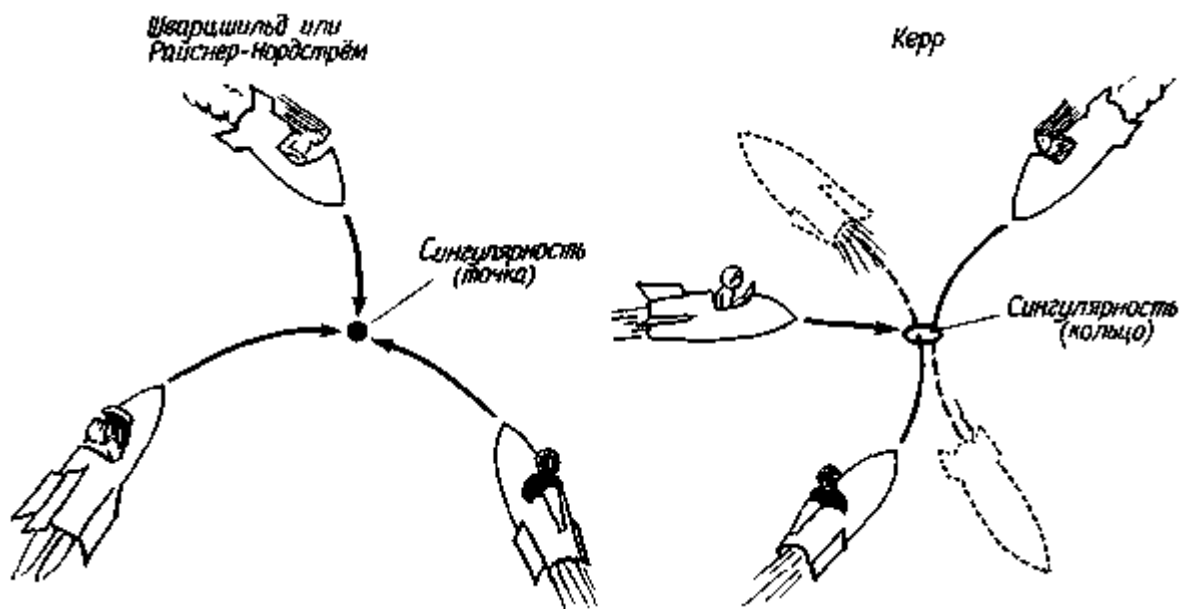


Рис. 11.8. Сингулярности в черных дырах, соответствующих решениям Шварцшильда

Некоторые физики отвергают саму мысль об отрицательном расстоянии. В поисках другого истолкования этой новой области они обнаружили, что здесь реализуются все свойства антигравитации - по "другую сторону" кольцевой сингулярности тяготение превращается в отталкивание. В этой области пространства-времени черная дыра отталкивает и вещество, и лучи света. Поэтому говорят об *отрицательной Вселенной* или о *мире антигравитации*. Существование миров антигравитации - самое удивительное свойство вращающихся черных дыр в отличие от дыр заряженных и Райснера-Нордстрёма, сингулярность точечная. С какой бы стороны вы ни летели к центру такой дыры, вас ждет гибель. Однако сингулярность керровской черной дыры - это кольцо, сквозь которое космонавт может попасть в отрицательную Вселенную (в мир антигравитации).

Несмотря на резкое различие сингулярностей вращающихся и заряженных черных дыр, поведение горизонтов событий в обоих случаях вполне аналогично. При появлении хотя бы небольшого вращения ($M \gg a$) в непосредственной близости к сингулярности появляется второй горизонт событий. При дальнейшем росте момента количества движения (когда $M > a$) внутренний горизонт событий расширяется, а внешний - сжимается. Когда же черная дыра вращается с такой скоростью, что $M = a$, оба горизонта сливаются в один. Этот случай часто называют *предельной керровской черной дырой*. Если же удастся еще ускорить вращение ($M < a$), то всякие горизонты событий исчезают, и у нас остается - в нарушение закона космической этики - "голая" *кольцевая сингулярность*. На рис. 11.9 приведена последовательность схем, изображающих типичное расположение горизонтов событий у черных дыр с одной и той же массой, но с разными скоростями вращения.

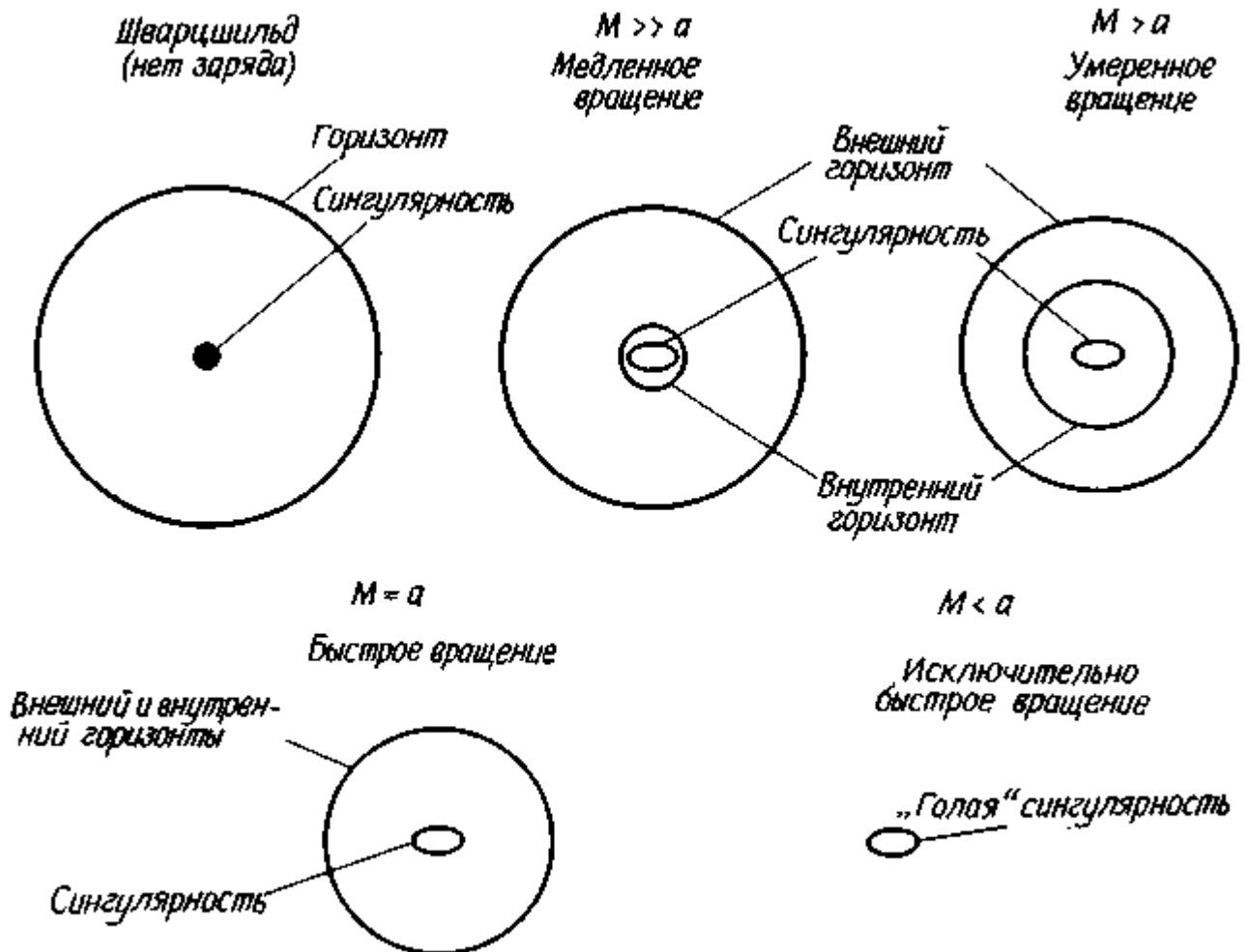


Рис. 11.9. Изображение керровских черных дыр в пространстве. Когда вращение отсутствует ($a = 0$, решение Шварцшильда), точечную сингулярность окружает только один горизонт событий. При слабом вращении

($M \gg a$) сингулярность становится кольцевой и около нее появляется второй горизонт событий. По мере роста момента количества движения оба горизонта постепенно сближаются. Их слияние происходит в случае предельного решения Керра ($M=a$). При $M < a$ оба горизонта исчезают.

В предыдущей главе мы привели достаточно веские доводы в пользу того, что реальная черная дыра должна быть либо нейтральна, либо ее заряд должен быть очень мал. Вместе с тем мы должны ожидать, что момент количества движения реальной черной дыры будет большим, потому что дыра возникает из массивной вращающейся звезды. Каким же может оказаться момент количества движения реальной черной дыры? Ограничен ли реалистический случай неравенством $M \gg a$, или он должен Приближаться к "предельному случаю" $M=a$?

В 1974 г. Кип С. Торн опубликовал результаты расчетов для достаточно реалистических моделей черных дыр. Он показал, что при разумных предположениях черная дыра должна вращаться с некоторой конкретной угловой скоростью, при которой реализуется *каноническое* значение параметра $a = 99,8\% M$. Это очень быстрое вращение. Оно оправдывает наши усилия, затраченные на освоение техники построения диаграмм Пенроуза для (нереалистических) заряженных черных дыр.

Чтобы определить характер *глобальной* структуры пространства-времени вблизи вращающейся черной дыры, уместно снова начать с упрощенных диаграмм пространства-времени. Если бы сингулярность была точечной, эти диаграммы были бы аналогичны рассмотренным для решения Райснера-Нордстрёма. Как и прежде, существуют два горизонта событий, постепенно сближающихся по мере роста момента количества движения. Однако теперь сингулярность - это кольцо, сквозь которое космонавты могут попадать в отрицательное пространство. Поэтому диаграммы пространства-времени должны обладать "левой" стороной. Чтобы включить в них расстояния, меньшие нуля, эти диаграммы следует продолжить влево от сингулярности. При этом на диаграммах пространства-времени для вращающейся черной дыры сингулярность изображена пунктирной линией, что отражает необязательность для всех космонавтов, направляющихся к центру керровской черной дыры, испытать бесконечное искривление пространства-времени - это происходит лишь с теми из них, кто движется в экваториальной плоскости дыры. Все прочие проскакивают в отрицательное пространство. Тогда получаются

диаграммы пространства-времени, изображенные на рис. 11.10 (сравните с [рис. 10.4](#)).

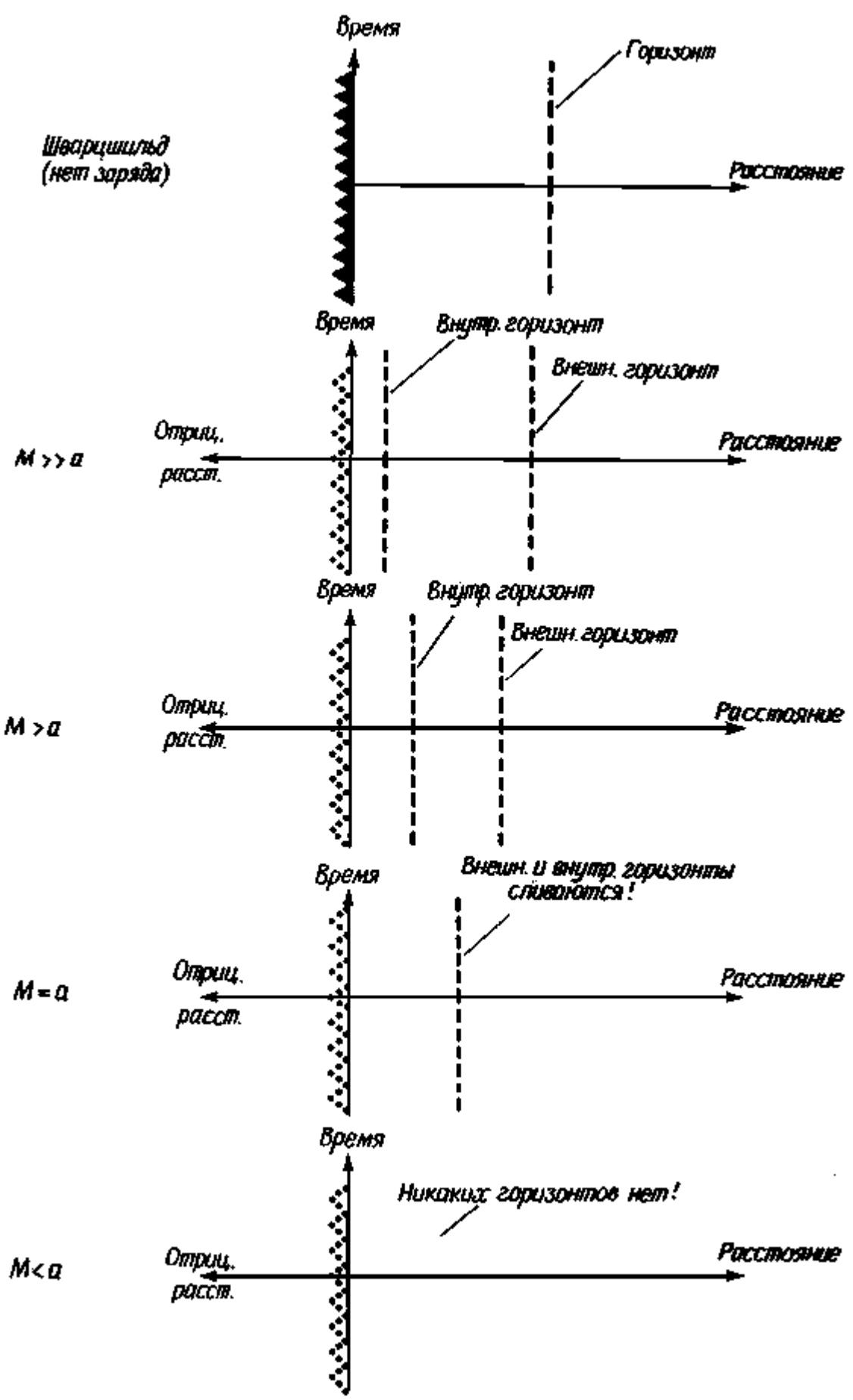


Рис. 11.10. Диаграммы пространства-времени для керровских черных дыр. На этой серии диаграмм изображена (упрощенно) структура пространства-времени для черных дыр с одной и той же массой (M), но с разными скоростями вращения (a). Сингулярность изображается пунктирной линией; сквозь нее можно перейти в область отрицательных расстояний.

Рассмотрим диаграмму пространства-времени для керровской черной дыры с умеренным моментом импульса ($M > a$). Далеко от черной дыры во внешней Вселенной пространственно-подобное и временноподобное направления ориентированы как обычно. Временноподобное направление вертикально (параллельно оси времени), а пространственноподобное - горизонтально (параллельно пространственной оси). Но при пересечении горизонта событий всякий раз происходит смена ролей у пространства и времени. Поэтому между внутренним и внешним горизонтами событий временноподобное направление горизонтально, а пространственноподобное - вертикально, как показано на рис. 11.11. Наконец, после перехода под внутренний горизонт событий роли пространства и времени меняются еще раз. Поэтому повсюду слева от внутреннего горизонта событий на рис. 11.11 временноподобное направление снова вертикально, а пространственноподобное - горизонтально.

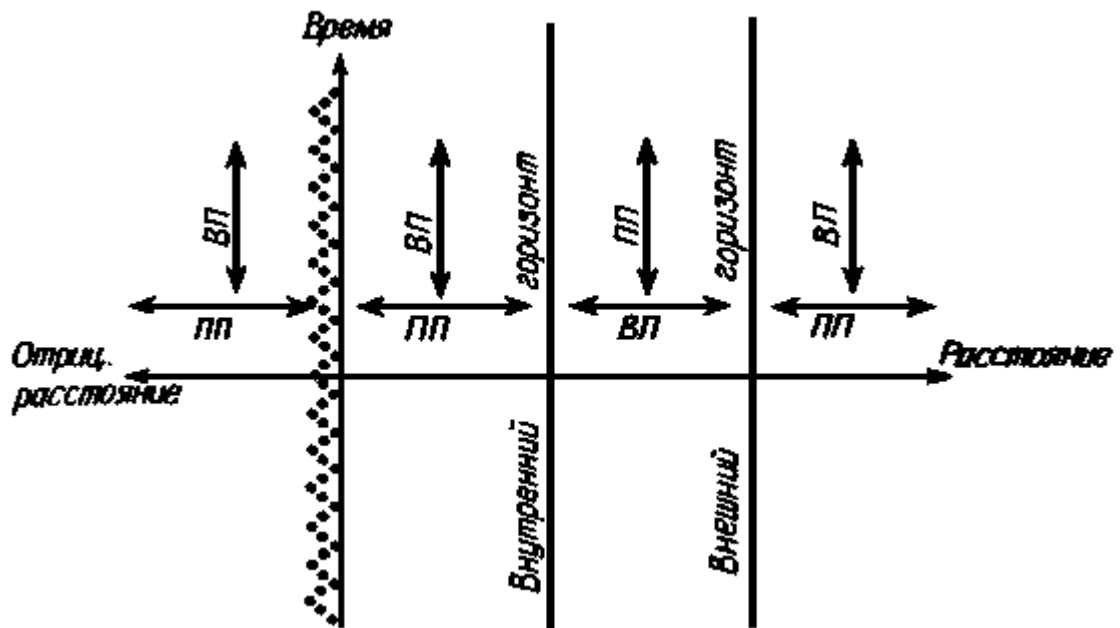


Рис. 11.11. Диаграмма пространства-времени для керровской черной дыры ($M > a$). На этой диаграмме показана ориентация пространственно- и временноподобных направлений для неопределяемой керровской черной дыры. Всякий раз при пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями.

Чтобы построить диаграммы Пенроуза для керровских черных дыр, воспользуемся правилами, сформулированными в предыдущей главе. Напомним содержание этих

правил: при пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями. Все горизонты событий имеют наклон 45° . Все внешние Вселенные изображаются в виде треугольников, и причем каждый имеет по пять бесконечностей (см. [рис. 10.6](#)). Поскольку решение Керра сводится к решению Шварцшильда, если остановить вращение черной дыры ($a \rightarrow 0$), то "напротив" нашей Вселенной должна быть другая Вселенная, в которую от нас ведут только пространственноподобные пути. Наконец, так как горизонтов событий два, а потому и смена ролей у пространства и времени происходит дважды, если идти из внешней Вселенной к сингулярности, то сингулярность должна быть временноподобной. На диаграмме Пенроуза ее мировая линия должна быть направлена по вертикали.

При сборке из "запасных частей" конформной карты пространства-времени представим себе сначала космонавта, вылетевшего с Земли и отправившегося к вращающейся черной дыре. Он пересекает внешний горизонт событий, а затем проваливается и сквозь внутренний горизонт событий. Как показано на рис. 11.12, наша Вселенная, как обычно, изображена в виде треугольника, а горизонт событий наклонен под углом 45° .

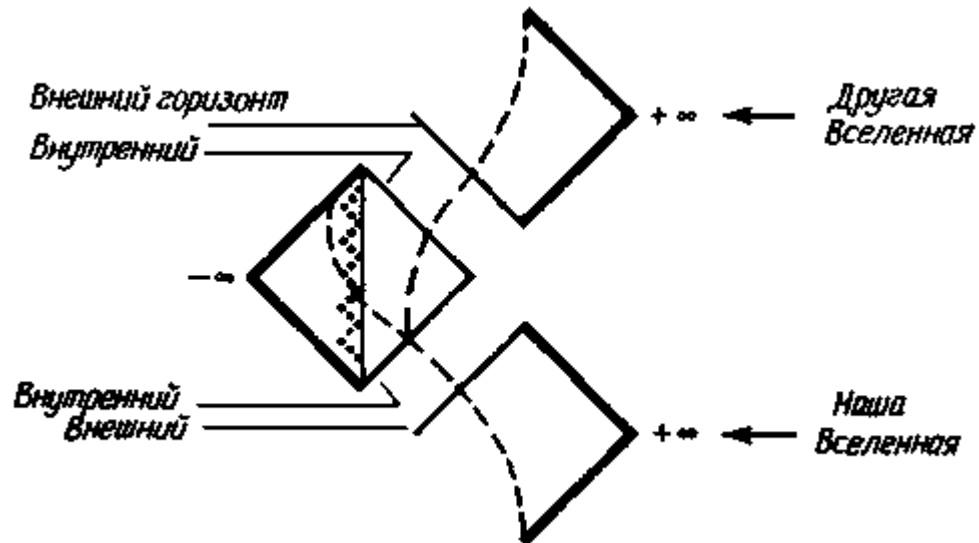


Рис. 11.12. Часть диаграммы Пенроуза. Глобальную структуру пространства-времени легче понять, проследив за космонавтом, летящим во вращающуюся черную дыру. Здесь показано путешествие космонавта, вылетевшего с Земли в нашей Вселенной. (Ср. с рис. 10.8.)

После пересечения внутреннего горизонта событий космонавт стоит перед разными возможностями. Если, к несчастью, он оказался в экваториальной плоскости, то он может врезаться в сингулярность, которая на диаграмме Пенроуза должна быть

изображена по вертикали (быть временноподобной). Но если он приближается к центру дыры под углом к экваториальной плоскости, то проскакивает сквозь кольцевую сингулярность в отрицательную Вселенную. Сингулярность изображена пунктирной линией, чтобы подчеркнуть, что космонавт уцелел при переходе сквозь кольцо. На конформной карте отрицательная Вселенная изображена, как обычно, в виде треугольника.

Так как сингулярность временноподобна и поэтому изображается в виде вертикали, у космонавта есть полная возможность избежать сингулярности, попросту направив свой космический корабль вонне от нее. Покидая черную дыру, он проходит через внутренний горизонт событий, а затем выходит и за внешний горизонт событий. Так он оказывается во Вселенной будущего. Он может остаться в этой новой Вселенной и посетить в ней какие-либо планеты, но может повернуть назад и снова скрыться в черной дыре на пути ко все новым и новым Вселенным будущего.

Чтобы прийти к остальным частям диаграммы Пенроуза, заметим, что, если бы черная дыра прекратила вращение, все свелось бы к геометрии Шварцшильда (см. рис. 9.18). Это значит, что должна существовать еще другая Вселенная, противоположная нашей, достижимая лишь по пространственноподобным (запретным) путям. Поэтому нам придется рассмотреть путешествие "чужого" космонавта, вылетевшего с планеты этой "чужой" Вселенной и нырнувшего во вращающуюся черную дыру на летающей тарелочке. Перед ним будут стоять те же альтернативы, что и перед космонавтом с Земли. Как видно из рис. 11.13, чужак может врезаться в сингулярность, если полетит в экваториальной плоскости, или попасть в отрицательную Вселенную сквозь кольцо с сингулярностью, если будет приближаться к нему под углом. Кроме того, он может пересекать горизонты событий в ту и другую стороны, посещая всевозможные Вселенные будущего.

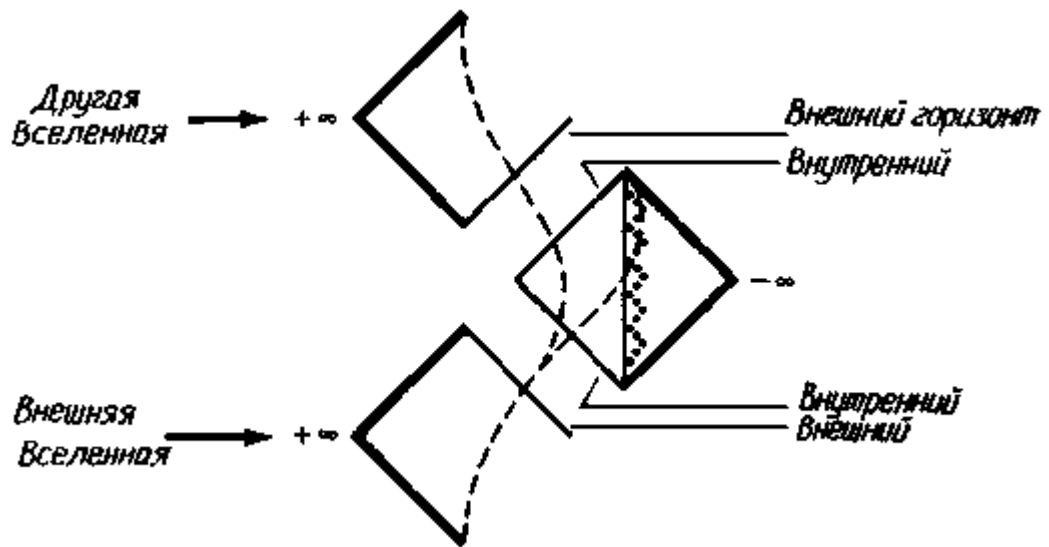


Рис. 11.13. Другая часть диаграммы Пенроуза. Другую часть диаграммы Пенроуза можно построить, следя за полетом чужого космонавта (разумеется, на летающей тарелке), который отправился во вращающуюся черную дыру из чужой Вселенной. (Ср. с рис. 10.9.)

Наконец, чтобы получить полную картину, оба этих фрагмента (рис. 11.12 и 11.13) нужно сложить вместе. Окончательная диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры представлена на рис. 11.14. Так как космонавт может бесконечное число раз пересекать горизонты событий, проходя из одной Вселенной в другую, то диаграмма должна быть продолжена до бесконечности в будущее и в прошлое.

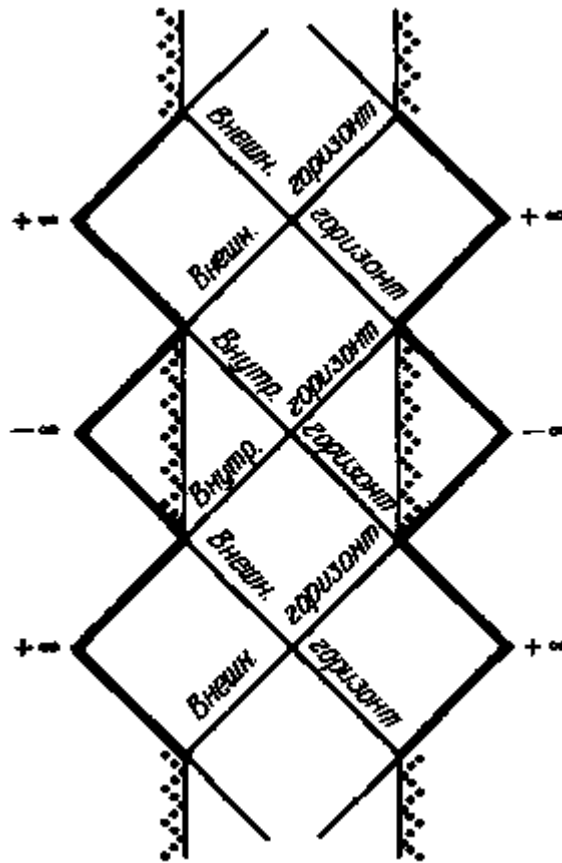


Рис. 11.14. Полная диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры ($M > a$). Эта полная диаграмма Пенроуза получается при объединении фрагментов, показанных на рис. 11.12 и 11.13. Следует рассматривать ее как повторяющуюся до бесконечности в будущее и в прошлое, подобно ленте с трафаретным рисунком. (Ср. с рис. 10.10.)

Заметим, что полученная диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры при $M > a$ очень похожа на диаграмму Пенроуза для черной дыры Райснера-Нордстрёма при $M > |Q|$, изображенную на [рис. 10.10](#). Существует лишь одно важное отличие. В заряженной черной дыре сингулярность точечная, и на каждого, приближающегося к центру такой дыры, будет воздействовать бесконечно сильное искривление пространства-времени, так что нечего и надеяться попасть там в отрицательное пространство. Однако в случае вращающейся черной дыры попасть в отрицательное пространство можно, если пройти сквозь кольцевую сингулярность. Лишь тот горекосмонавт, который полетит в экваториальной плоскости, будет разорван на части приливными силами. Поэтому на диаграмме Пенроуза для керровской черной дыры сингулярность изображена пунктирными линиями. Она является дверью в миры антигравитации.

В случае решения Райснера-Нордстрёма тремя возможными вариантами ($M > Q$, $M = Q$ и $M < Q$) соответствовали диаграммы Пенроуза резко различного вида. Точно так же и для решения Керра диаграммы Пенроуза, соответствующие трем разным вариантам ($M > a$, $M = a$ и $M < a$), сильно отличаются друг от друга. Описанные выше рассуждения, на основе которых мы получили рис. 11.14, относились к случаю малых или умеренных значений момента импульса ($M > a$). Чтобы проанализировать предельную геометрию Керра ($M = a$), возвратимся снова к упрощенной диаграмме пространства-времени. В случае предельной керровской черной дыры внутренний и внешний горизонты событий сливаются в один. При этом промежуточная область между горизонтами исчезает. Поэтому, как показано на рис. 11.15, при пересечении нового (двойного) горизонта событий в целом смены пространственноподобного направления на временноподобное и наоборот не происходит. Временноподобное направление повсюду вертикально, а пространственноподобное - горизонтально.

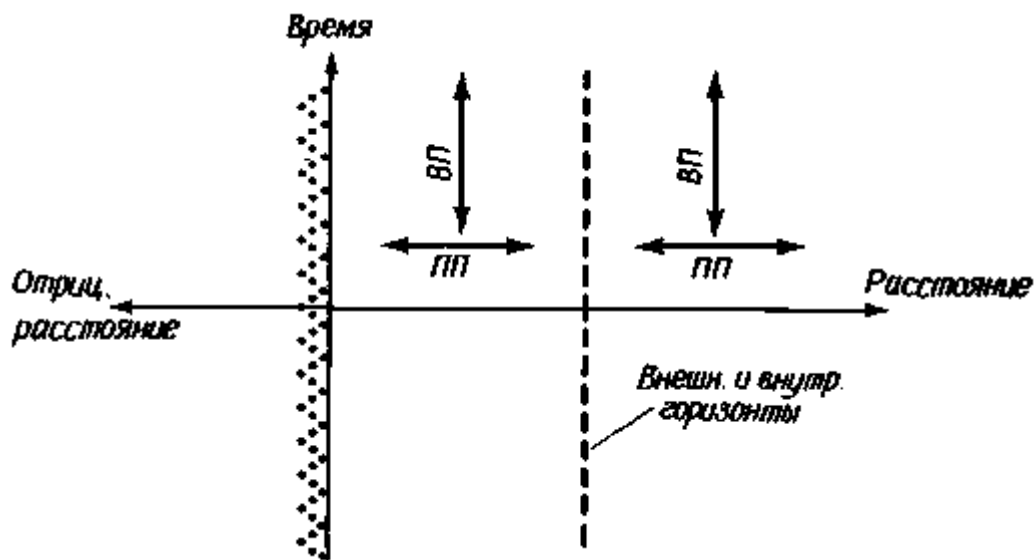


Рис. 11.15. Диаграмма пространства-времени для предельной керровской черной дыры ($M = a$). Если черная дыра вращается столь быстро, что $M = a$, внутренний и внешний горизонты событий сливаются. Область, существовавшая между этими горизонтами, теперь исчезает, и при пересечении такого (двойного) горизонта пространственноподобное и временноподобное направления не испытывают изменений.

Чтобы построить диаграмму Пенроуза для предельной керровской черной дыры, рассмотрим снова космонавта, вылетевшего с Земли и нырнувшего в черную дыру. После пересечения всего лишь одного горизонта событий он встречается с сингулярностью. Однако, так как пространственноподобное и временно-подобное направления в целом не меняются ролями, сингулярность должна быть

временноподобной и изображаться на диаграмме Пенроуза вертикалью. У космонавта теперь имеются разные возможности. При полете в экваториальной плоскости он может наткнуться на сингулярность, где заведомо жизнь станет ему не мила. Однако космонавт может приблизиться к центру черной дыры и под углом к экваториальной плоскости. В этом случае он пройдет сквозь кольцевую сингулярность и вынырнет в мире антигравитации, изображенном, как обычно, в виде треугольника. Он может выбрать и третью возможность - вообще уклониться от центра черной дыры, повернуть назад и выйти сквозь горизонт событий в обычную Вселенную будущего, как показано на рис. 11.16. После этого он может либо остаться в этой новой Вселенной, нанося визиты на ее планеты, либо вернуться в черную дыру и снова сделать выбор между теми же альтернативами. Поэтому диаграмма Пенроуза бесконечно продолжается как в прошлое, так и в будущее.

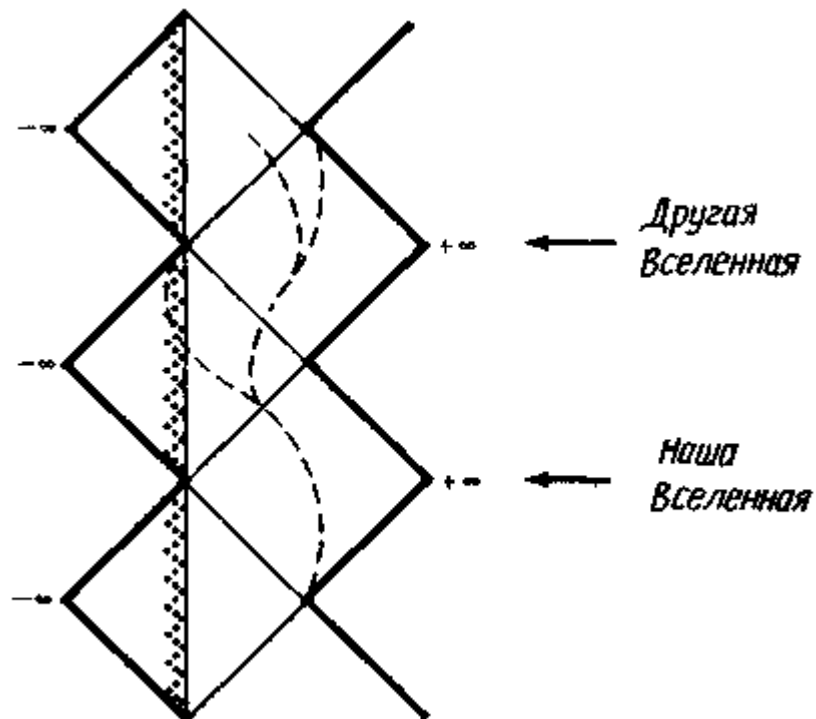


Рис. 11.16. Диаграмма Пенроуза для предельной керровской черной дыры ($M = a$). Конформную карту предельной керровской черной дыры можно получить, прослеживая возможные мировые линии космонавта. Как обычно, диаграмма повторяется бесконечное число раз в будущее и в прошлое. (Сравните с рис. 10.13.)

Отметим снова, что диаграмма Пенроуза для предельного решения Керра очень похожа на предельную диаграмму решения Райснера-Нордстрёма. Основным (и

единственным) отличием является то, что теперь можно пройти сквозь керровскую сингулярность в миры антигравитации.

Наконец, если черная дыра вращается настолько быстро, что $M < a$, горизонты событий пропадают и "голая" сингулярность открывается взорам внешней Вселенной. Однако, в отличие от случая "голой" сингулярности Райснера-Нордстрёма, космонавт теперь может пройти сквозь кольцевую сингулярность и вынырнуть в мире антигравитации. Так получается диаграмма Пенроуза, показанная на рис. 11.17 и имеющая очень простой вид. При этом астроном может наблюдать свет, приходящий через кольцевую сингулярность из мира антигравитации. В свою очередь "чужой" астроном из мира антигравитации может наблюдать свет, приходящий из нашей Вселенной.

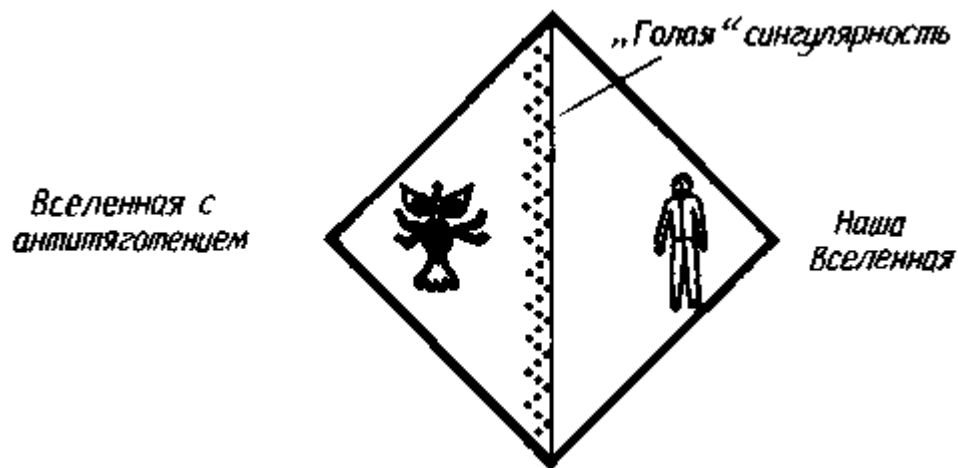


Рис. 11.17. "Голая" керровская сингулярность. Если черная дыра вращается настолько быстро, что $a > M$, оба, горизонта событий исчезают, открывая для обозрения "голую" сингулярность. Космонавты могут путешествовать сквозь кольцевую сингулярность, разграничивающую нашу Вселенную и мир антигравитации.

Поскольку реальные черные дыры должны вращаться и поэтому их следует описывать с помощью геометрии Керра, поучительно проанализировать решения Керра поподробнее. В следующей главе мы специально уделим внимание тому, что увидят астрономы и космонавты при наблюдении и исследовании вращающихся черных дыр.

12. Геометрия решения Керра

Астрофизики-теоретики часто сталкиваются в своих математических построениях с разными возможностями. Они могут облегчить или, наоборот, усложнить себе жизнь, если представят рассматриваемые уравнения в удобном для работы или, напротив, в громоздком виде. И это особенно верно по отношению к анализу геометрии вращающихся черных дыр.

При описании геометрии пространства в окрестностях Керровской черной дыры физики могут по-разному выбирать способы для описания положения точек в этой окрестности. Речь идет о выборе *системы координат*, т.е. попросту о выборе, сетки, которая покрывает пространство. Например, физик может ввести прямоугольные декартовы координаты. Такие координаты, изображенные в левой стороне рис. 12.1, выглядят как линии на обычной миллиметровке. Положение точки задается в прямоугольных координатах посредством указания расстояний в направлениях вверх-вниз и налево-направо.

Однако было бы весьма неразумно, если бы для описания пространства вблизи черной дыры физик выбрал прямоугольные декартовы координаты. Такие координаты удобны, чтобы описывать тела, которые сами обладают прямыми углами, а черные дыры совсем не похожи на кирпичи. Прямоугольные координаты не отражают свойств симметрии черных дыр, и физик не получит с их помощью удобных для работы уравнений.

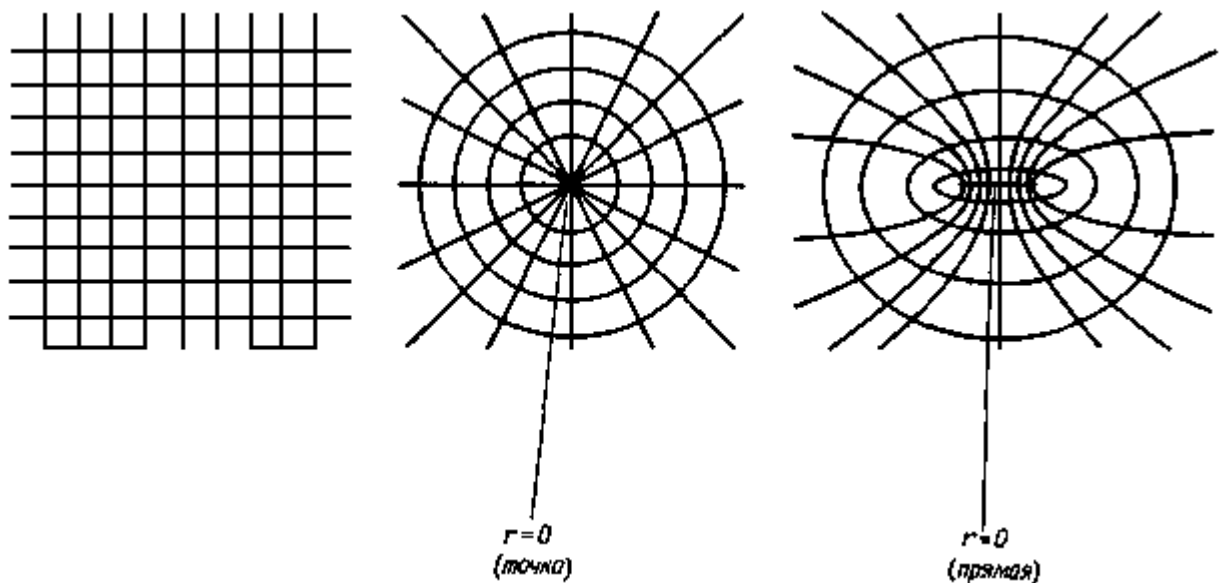


Рис. 12.1. Разные системы координат (слева - декартовы прямоугольные, в середине - полярные, справа - эллипсоидальные). Система координат - это всего лишь сетка, с помощью которой определяют положение точек в пространстве. Для вращающихся черных дыр удобно выбрать эллипсоидальные координаты (они получаются при вращении правого рисунка вокруг его оси симметрии). Такая система координат лучше

всего отражает особенности геометрии решения Керра.

Второй возможный выбор состоит в использовании полярных (или сферических) координат. В центре рис. 12.1 показан пример подобных координат с центром в некоторой выбранной точке. Положение другой точки задается в этих координатах расстоянием от центра и величиной угла.

Сферические координаты (т.е. полярные, обобщенные на три измерения) предпочтительны во всех тех случаях, когда имеет место сферическая симметрия. Шварцшильдовские черные дыры и черные дыры Райснера-Нордстрёма обладают сферической симметрией. Поэтому сферические координаты идеально подходят для описания пространства решений Шварцшильда и Райснера-Нордстрёма, так что в сферических координатах уравнения принимают тогда особенно простой вид.

Если для сферически симметричных черных дыр сферические координаты превосходно себя оправдывают, то они оказываются уже не столь удобными в случае решения Керра. Вращающаяся черная дыра *не является* сферически симметричной. У нее существует привилегированное направление - ось вращения, вокруг которой она вращается. Чтобы работать с решением Керра, физикам необходимо выбрать такую систему координат, которая наиболее полно отражает геометрию вращающейся черной дыры; в противном случае придется иметь дело со слишком сложными уравнениями.

Имеется еще одна система координат, как будто специально придуманная для решения Керра. Для случая двух измерений эти координаты называются эллиптическими и изображены справа на рис. 12.1. По сути дела, положения точек определяются здесь заданием расстояния от прямой и величиной некоторого угла. Кривые равного расстояния от прямой - это эллипсы, а кривые постоянного угла - гиперболы. Можно сказать, что эллиптические координаты - это полярные координаты, у которых центр (начало координат) вытянут в линию.

Чтобы прийти к системе трехмерных координат, удобной для работы с решением Керра, представим себе, что мы вращаем эллиптические координаты вокруг оси симметрии. Эллипсы становятся тогда эллипсоидами вращения, а гиперболы - гиперболоидами. Концы отрезка линии, находившиеся в центре, вычертят кольцо. У нас получилась трехмерная система координат, которые называются *сплюснутыми эллипсоидальными координатами*; они изображены на рис. 12.2.

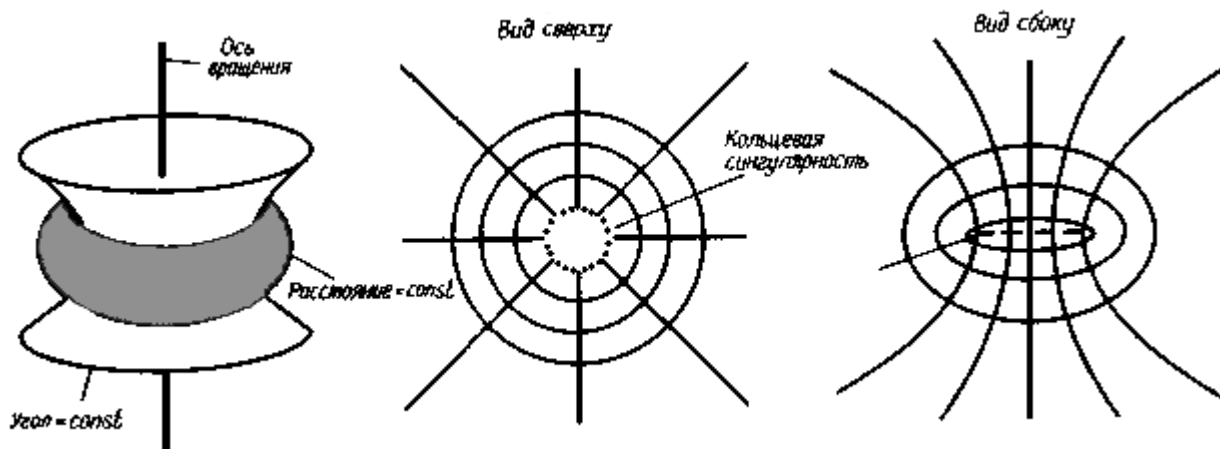


Рис. 12.2. Сплюснутые эллипсоидальные координаты. Сплюснутые эллипсоидальные координаты получаются, если вращать эллипсоидальные координаты на плоскости вокруг оси симметрии. Центр координатной системы - это кольцо. Такая осесимметричная система идеально подходит для описания решения Керра, поскольку керровская сингулярность кольцеобразна.

Сплюснутые эллипсоидальные координаты идеально подходят для описания решения Керра. Эта система координат имеет осевую симметрию, как и сама вращающаяся черная дыра. В центре системы расположено кольцо, а керровская сингулярность - это тоже кольцо. Вот почему хитроумные физики пользуются в данном случае именно сплюснутыми эллипсоидальными координатами. Хотя мы здесь не будем проводить никаких вычислений, важно отметить основные свойства подобных координат. Если посмотреть на центральную часть таких координат вдоль оси вращения, то видно, что координатные линии равного расстояния (или соответствующие места в керровской черной дыре) представляют собой окружности. Глядя же вдоль экваториальной плоскости, мы замечаем, что эти координатные линии (как и керровская черная дыра в этом сечении) выглядят как эллипсы (рис. 12.2).

При описании в гл. 8 особенностей шварцшильдовской черной дыры было очень важно проследить пути световых лучей, как это сделано, например, на рис. 8.1. Когда лучи проходят вблизи черной дыры, они отклоняются в искривленном пространстве-времени. Далее лучи света, приближающиеся к черной дыре точно на определенное расстояние, захватываются на *круговую* орбиту вокруг дыры. В результате возникает *фотонная сфера* - сферическая поверхность, образованная неустойчивыми круговыми орбитами световых лучей. Для иллюстрации на рис. 12.3 приведены траектории лучей света вблизи шварцшильдовской черной дыры.

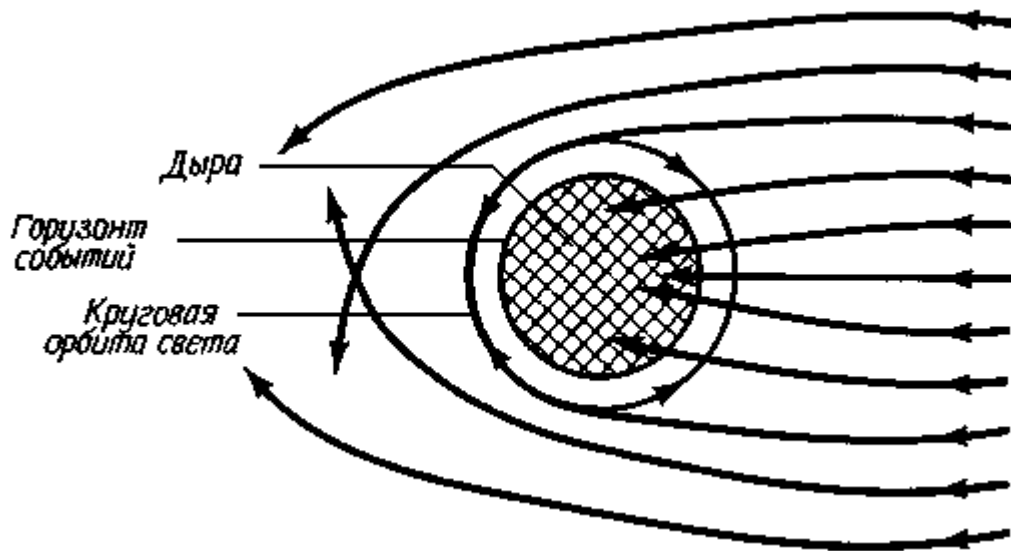


Рис. 12.3. Орбиты света вокруг шварцшильдовской черной дыры. Невращающаяся черная дыра окружена сферой неустойчивых круговых орбит света. Всякий луч света, который приблизится к такой дыре точно на нужное расстояние, может быть захвачен на круговую орбиту на фотонной сфере.

Важно подчеркнуть то, что вокруг шварцшильдовской черной дыры имеется лишь *единственная* фотонная сфера. Существует только одно расстояние от горизонта событий, на котором могут проходить круговые орбиты световых лучей. К тому же лучи света движутся на фотонной сфере вокруг дыры под всевозможными углами, в том числе и по, и против часовой стрелки. Чтобы луч света оказался захваченным на подходе к черной дыре, он должен всего-навсего оказаться на нужном расстоянии от нее, однако не имеет значения направление его прихода. Угол, под которым свет подходит к дыре, не играет никакой роли. Дело в том, что шварцшильдовская дыра сферически симметрична, и для нее нет "верха" и "низа", "правой" и "левой" сторон. Единственное, что существенно, - это расстояние луча света от дыры, или *прицельный параметр*. Если прицельный параметр имеет нужную величину, то луч попадет *на одну и ту же* фотонную сферу, как и все иные лучи с тем же значением параметра, независимо от того, откуда они пришли.

Но если черная дыра вращается, все меняется. В случае керровской черной дыры ее ось вращения определяет особое направление в пространстве, так что пространство-время оказывается искривленным по-разному в зависимости от угла к оси вращения. Теперь геометрия пространства *осесимметрична*, а не сферически симметрична. Это усложнение приводит к радикальным изменениям характера круговых орбит лучей света.

Чтобы разобраться в расположении орбит света вокруг керровской черной дыры, представим себе, что мы смотрим вдоль оси вращения в сторону черной дыры на лучи света, идущие к ней в экваториальной плоскости. Как видно из рис. 12.4, лучи света, проходящие вдали от дыры (т.е. при больших значениях прицельного параметра), отклоняются лишь немного. Когда прицельный параметр имеет строго определенное значение, луч света и в данном случае может пойти по круговой орбите вокруг черной дыры. Однако теперь появляются *две* возможности. Если луч света приближается к черной дыре с одной стороны, он может быть захвачен на неустойчивую круговую орбиту, по которой он обращается в направлении, противоположном направлению вращения дыры. Такая *круговая орбита с обратным вращением* расположена на большем расстоянии от черной дыры, чем фотонная сфера в шварцшильдовском случае.

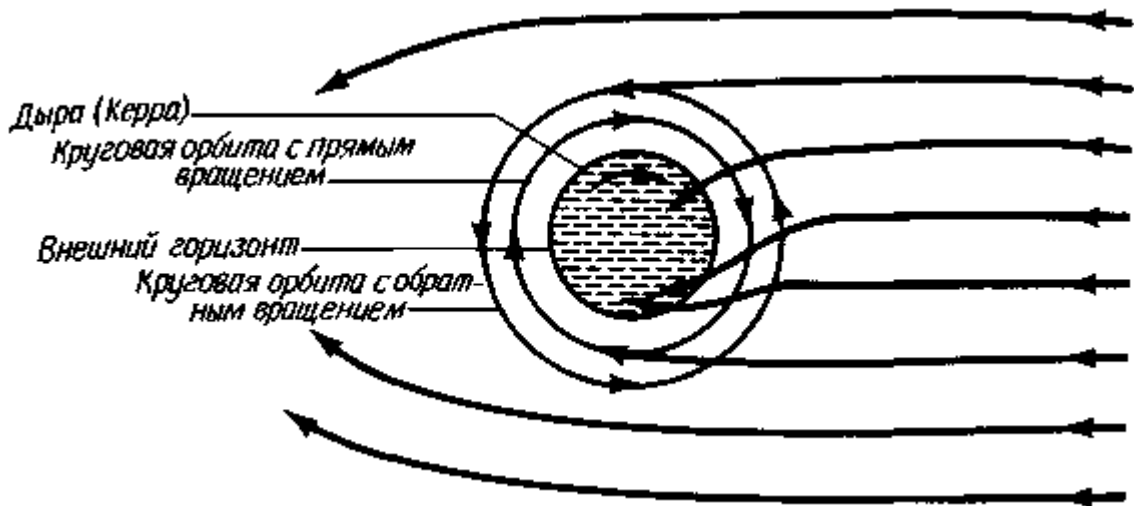


Рис. 12.4. Орбиты вокруг света керровской черной дыры (в ее экваториальной плоскости). Те лучи света, которые проходят далеко от вращающейся черной дыры, отклоняются лишь на малые углы. Луч света, приближающийся к дыре с требуемым значением прицельного параметра, может направиться по круговой орбите вокруг этой дыры. Но в экваториальной плоскости есть *две* неустойчивые круговые орбиты света. Внешняя орбита содержит лучи с обратным вращением, а внутренняя - с прямым.

Если же луч света приближается к черной дыре с другой стороны, он также может быть захвачен на неустойчивую круговую орбиту, но теперь луч обращается в том же направлении, в каком вращается сама дыра. Такая *круговая орбита с прямым вращением* расположена намного ближе к дыре - ближе, чем фотонная сфера в шварцшильдовском случае.

Анализ поведения лучей света в экваториальной плоскости показывает, что существуют две круговые орбиты - внутренняя, по которой свет обращается в ту же

сторону, в которую вращается черная дыра, и внешняя, по которой свет обращается в противоположную сторону. Можно сказать, что, когда шварцшильдовская черная дыра приобретает момент количества движения, фотонная сфера "расщепляется" на две. Между орбитами с прямым и обратным вращением в экваториальной плоскости имеется множество неустойчивых круговых орбит для световых лучей. Эти орбиты соответствуют световым лучам, приходящим к черной дыре с разных направлений, не лежащих в экваториальной плоскости.

Для того чтобы разобраться, что же происходит вне экваториальной плоскости, рассмотрим световые лучи, приближающиеся к черной дыре параллельно ее оси вращения. На рис. 12.5 изображены траектории таких лучей в окрестностях предельной черной дыры ($M=a$), вычисленные Ч.Т.Каннингэмом. Если на рис. 12.4 изображен "вид сверху", а именно орбиты, лежащие в экваториальной плоскости, то рис. 12.5 - это "вид сбоку" на орбиты световых лучей в плоскости, проходящей через ось, вокруг которой вращается черная дыра.

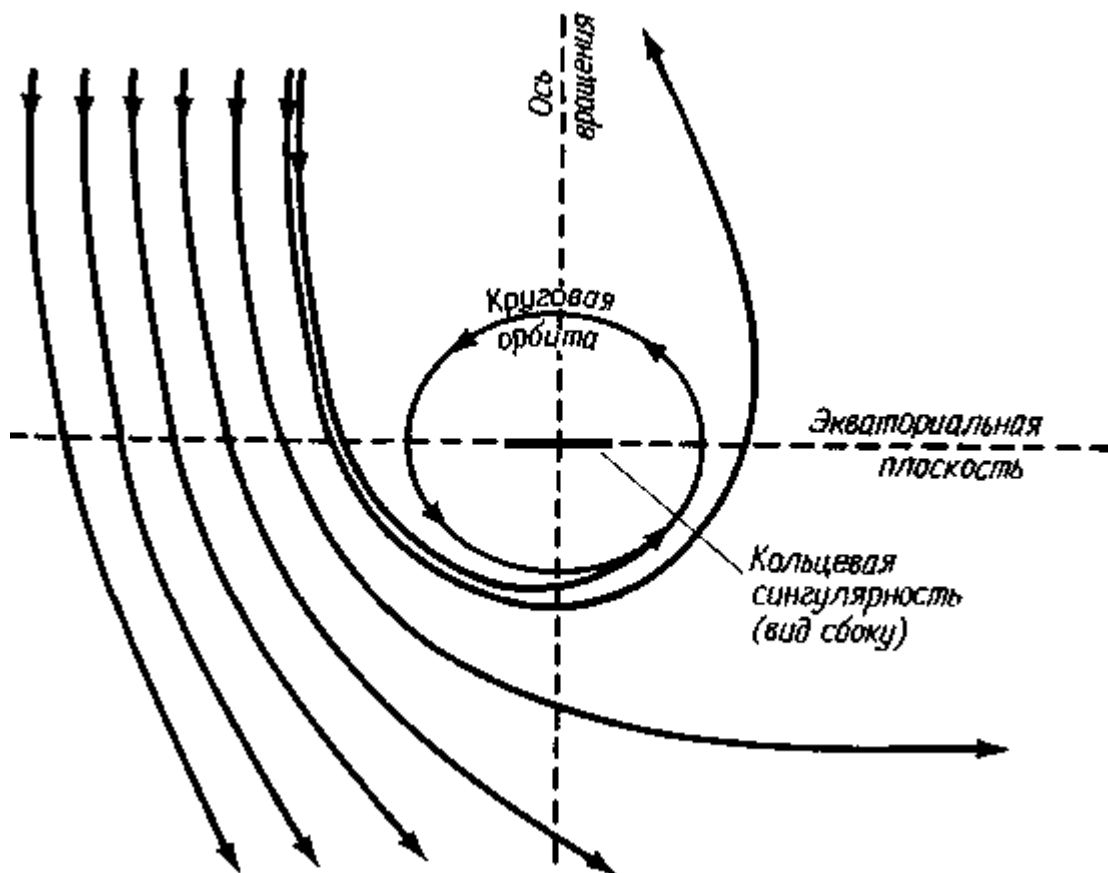
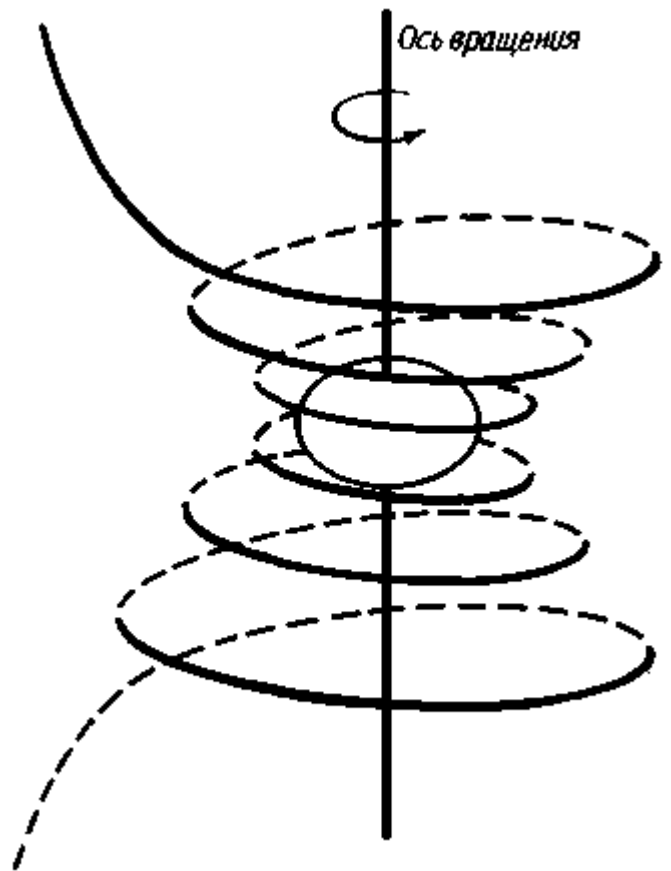


Рис. 12.5. Орбиты света вокруг керровской черной дыры (параллельно оси вращения).

Те лучи света, которые проходят далеко от вращающейся черной дыры, отклоняются лишь на малые углы. Для луча, пришедшего к дыре параллельно ее оси вращения, существует только одна возможная круговая орбита. (Диаграмма построена для предельного решения Керра, когда $M=a$.)

Как всегда, лучи света, проходящие вдалеке от черной дыры, отклоняются лишь на малые углы. Лучи, прицельные параметры которых меньше (т. е. которые проходят ближе к оси вращения), отклоняются сильнее. Теперь среди всех значений прицельного параметра существует лишь *одно*, при котором свет захватывается на круговую орбиту вокруг дыры (см. рис. 12.5). Итак, для лучей, подходящих к черной дыре параллельно ее оси вращения, существует только *одна* неустойчивая круговая орбита. Эта орбита находится от черной дыры на расстоянии, промежуточном между расстояниями для орбит в экваториальной плоскости с прямым и обратным вращением. Если вас смутит тот факт, что на рис. 12.5 эта "круговая" орбита имеет вид эллипса, то вспомните, что используются *сплющенные* эллипсоидальные координаты. Если смотреть на эти координаты "в профиль" (см. рис. 12.2), то линии постоянного расстояния от кольцевой сингулярности оказываются эллипсами.

В определенном смысле рис. 12.5 дает слишком упрощенную картину. Пространство-время в окрестностях вращающейся черной дыры увлекается в сторону ее вращения. И хотя на рис. 12.5 верно изображены расстояния от черной дыры падающих на нее лучей света, этим и исчерпывается правильность рисунка. На самом деле луч, приближаясь к черной дыре, начинает обращаться вокруг нее по спирали в силу эффекта увлечения инерциальных систем. На рис. 12.6 показано, как увлечение действует на некий конкретный луч. В целом траектория движения луча света в



трехмерном пространстве представляет собою сложную спираль. Следовательно, чтобы получить полную картину происходящего с лучами света, приближающимися к черной дыре, следует вращать рис. 12.5 (и любую другую подобную схему) вокруг оси вращения черной дыры. Тем не менее схемы типа приведенной на рис. 12.5 дают достаточно хорошее представление о том, как меняется расстояние (и только расстояние) луча света от черной дыры.

Итак, вокруг черной дыры существует множество различных неустойчивых круговых орбит световых лучей. Самая далекая из них - это круговая орбита с обратным вращением в экваториальной плоскости. Самая близкая - круговая орбита с прямым вращением, опять-таки в экваториальной плоскости. Между этими двумя пределами находятся различные возможные орбиты лучей света, подошедших к черной дыре под разными углами. Для каждого данного угла будут существовать орбиты как с прямым, так и с обратным вращением, за исключением тех лучей, которые пришли

Рис. 12.6. Луч света, проходящий мимо керовской черной дыры. При прохождении луча света вблизи вращающейся черной дыры его траектория закручивается вокруг дыры вследствие увлечения пространства-времени. Поэтому, чтобы обрисовать реальные траектории в трехмерном пространстве, орбиты, изображенные на рис. 12.5 (и на всех подобных схемах), необходимо вращать вокруг оси черной дыры.

параллельно оси вращения. Для луча света, подошедшего к черной дыре параллельно ее оси вращения, имеется лишь одна круговая орбита.

Если черная дыра вращается медленно, то разброс круговых орбит невелик. Все возможные орбиты расположены друг около друга над внешним горизонтом событий на расстояниях, близких к положению шварцшильдовской фотонной сферы (которая существовала бы, *если бы* дыра не вращалась). При более быстром вращении черной дыры расстояние между орбитами в экваториальной плоскости с прямым и обратным вращением становится больше. Соответственно увеличивается и разброс радиусов круговых орбит. Наибольший возможный разброс имеет место для предельной керровской черной дыры (когда $M = a$).

Для наглядного представления разброса круговых орбит света вблизи вращающейся черной дыры удобнее всего изобразить *огибающую поверхность* всех таких орбит, состоящую из двух частей - внешней и внутренней. На рис. 12.7 изображено сечение огибающей поверхности всех возможных круговых орбит вокруг быстро вращающейся керровской дыры ($a = 90\% M$). Каждый луч света движется весьма сложным образом вдоль поверхности эллиптического кольца внутри этих границ. При потере момента количества движения черной дырой по мере замедления вращения должен уменьшаться и объем, заключенный между частями огибающей поверхности. При полной остановке вращения вся огибающая поверхность превращается в фотонную сферу шварцшильдовской черной дыры.

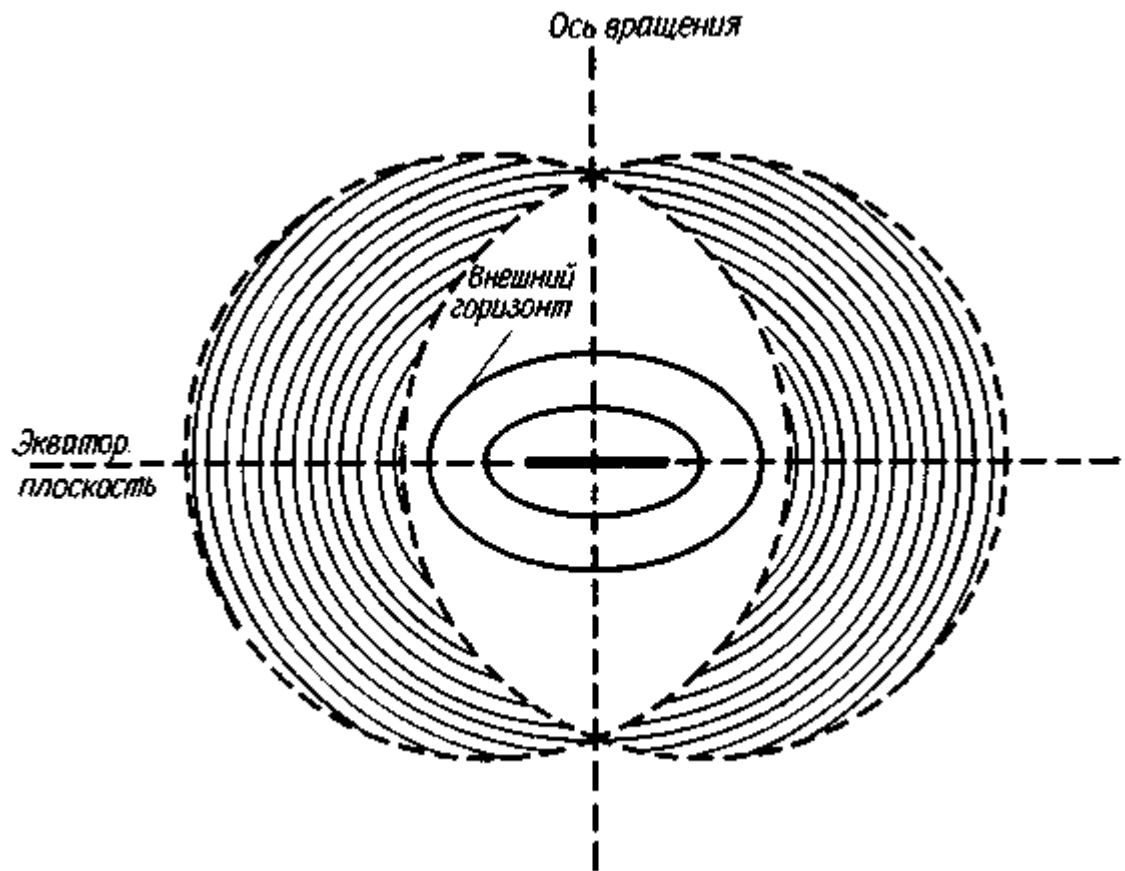


Рис. 12.7. Разброс круговых орбит света вблизи быстро вращающейся черной дыры. Все возможные круговые орбиты света вблизи керровской черной дыры (при $a = 90\% M$) лежат внутри показанных здесь границ. Каждый луч света, идущий по круговой орбите, весьма сложным образом искривляется, оставаясь на поверхности эллипсоида внутри указанных границ.

До сих пор мы касались лишь того, что происходит *вне* керровской черной дыры. Чтобы познакомиться с геометрией внутри такой дыры, представим себе, что мы послали световой луч с прицельным расстоянием меньше требуемого для захвата на круговую орбиту. На рис. 12.8 изображены лучи света, подходящие к керровской черной дыре параллельно ее оси вращения, причем значение прицельного параметра меньше, чем требуется для захвата луча на круговую орбиту. Рис. 12.8 - это просто продолжение рис. 12.5, и он также основан на расчетах Каннингэма. Отметим тот важный факт, что траектории этих лучей света вблизи центра черной дыры *поворачивают* и идут от сингулярности. Если вдали от керровской черной дыры гравитация вызывает притяжение и затягивает все тела вовнутрь, то вблизи сингулярности она действует как сила отталкивания и стремится вытолкнуть их наружу! Те лучи света, которые нацелены прямо на кольцо, отклоняются сильнее всего - такие лучи буквально отскакивают от черной дыры. Эта "отталкивательная"

природа керровской сингулярности означает, что на некотором расстоянии от центра дыры гравитационное отталкивание уравнивает гравитационное притяжение. Значит, в этой нейтральной области снова скажутся возможными круговые орбиты света! На рис. 12.9 представлены границы всех возможных круговых орбит света глубоко под внутренним горизонтом событий. В отличие от внешних световых орбит вокруг черной дыры, во внутренней области могут существовать не только неустойчивые, но и устойчивые орбиты. Поэтому сингулярность керровской черной дыры окружена световыми лучами.

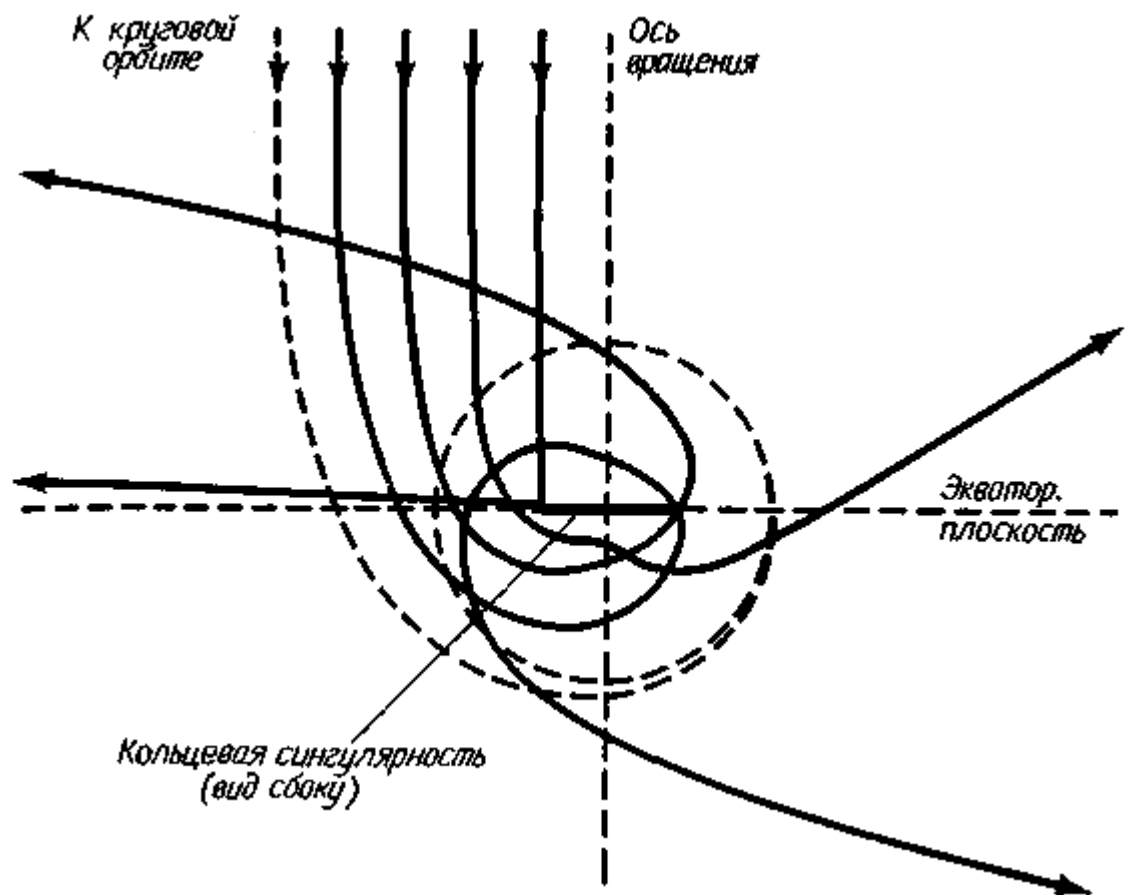


Рис. 12.8. Траектории лучей света внутри керровской черной дыры. Те лучи света, которые направлены на вращающуюся черную дыру при меньшем, чем для круговой орбиты, значении прицельного параметра, попадают внутрь дыры. Вид траекторий лучей света глубоко внутри дыры показывает, что сингулярность отталкивает световые лучи. Вблизи сингулярности лучи света испытывают действие антигравитации. (Схема построена для предельного решения Керра, когда $M=a$.)

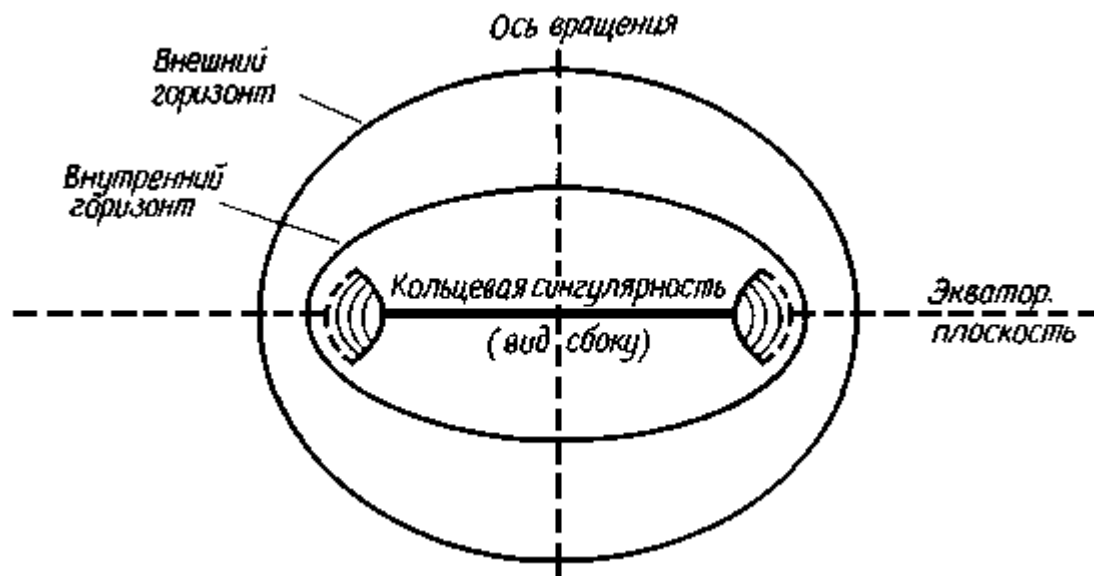


Рис. 12.9. Разброс круговых орбит света внутри быстро вращающейся черной дыры. Под внутренним горизонтом событий существует область, в которой притяжение гравитационного поля уравновешено гравитационным отталкиванием сингулярности. В этой области могут существовать как устойчивые, так и неустойчивые круговые орбиты. (Схема построена для случая $a = 90\% M$.)

Чтобы исследовать самые глубокие области керровской черной дыры, вообразим, что мы посылаем лучи света параллельно оси вращения и *очень близко* к ней, так что значение прицельного параметра для этих лучей света меньше, чем необходимое для опадания в кольцевую сингулярность. Поэтому лучи света, идущие по оси вращения или очень близко к ней, пройдут сквозь кольцо в отрицательное пространство. Значит, чтобы изобразить траектории таких лучей света полностью, следует включить в схему и отрицательное пространство. Лучи света на рис. 12.5 и 12.8 вообще не проходят сквозь сингулярность и потому всегда остаются в положительном пространстве - их расстояние от сингулярности всегда выражается положительными числами. Однако, как только объект вошел в отрицательное пространство, его расстояние от сингулярности становится отрицательным числом. Эта трудность преодолена на рис. 12.10 очень просто: верхняя половина схемы представляет положительное пространство, а нижняя половина - отрицательное. Поэтому на рис. 12.10 свет, идущий по оси вращения или очень близко от нее, прямо проходит из положительного пространства сквозь центр кольца в отрицательное пространство.

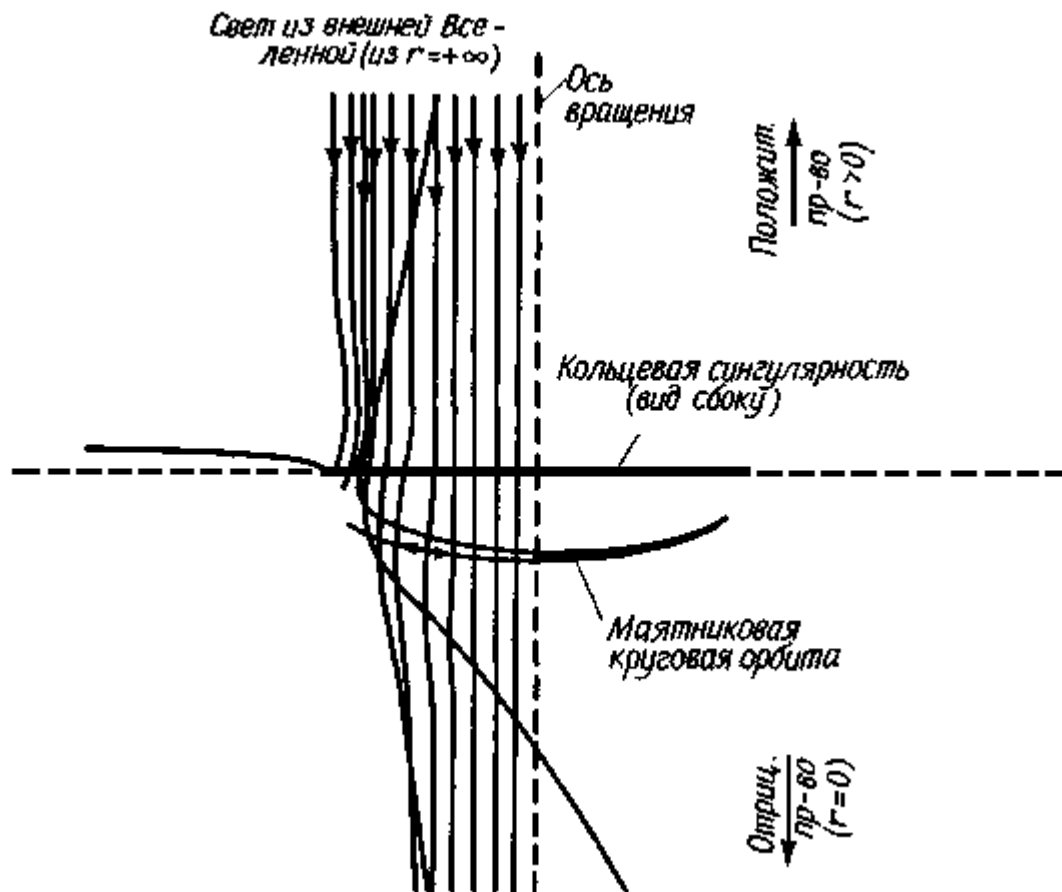


Рис. 12.10. Траектории света сквозь кольцевую сингулярность. В верхней половине этой схемы изображено положительное пространство (откуда приходят эти лучи света), а в нижней половине - отрицательное пространство (куда эти лучи уходят). Лучи света отклоняются в сторону от кольцевой сингулярности благодаря гравитационному отталкиванию вблизи нее. Некоторые лучи света могут попасть на круговые орбиты в отрицательном пространстве. (Схема построена для предельного решения Керра, когда $M = a$.)

Рассматривая прохождение лучей света сквозь сингулярность, отметим прежде всего, что лучи отклоняются *в сторону* от краев кольца.

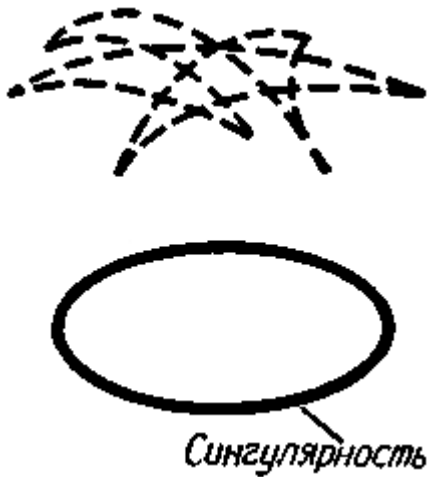


Рис. 12.11. Маятниковые круговые орбиты в отрицательном пространстве. Лучи света, которые прошли сквозь сингулярность, имея точно выдержанное значение прицельного параметра, попадают на круговую орбиту вокруг сингулярности в отрицательном пространстве. Эти орбиты называются маятниковыми, так как лучи света отскакивают взад и вперед на поверхности постоянного расстояния (поверхности эллипсоида) от сингулярности. Это расстояние отрицательно.

Это опять-таки связано с гравитационным отталкиванием вблизи сингулярности. Однако нас ждет одна неожиданность. На рис. 12.10 показан луч света, проходящий сквозь сингулярность и прыгающий взад и вперед по дуге эллипса в отрицательном пространстве. Вспомним еще, что эллипс - это кривая, находящаяся на постоянном расстоянии от сингулярности (см. рис. 12.2, где изображены сплюснутые эллипсоидальные координаты). Таким образом, этот луч света сохраняет

в отрицательном пространстве постоянное расстояние от сингулярности. Значит, он движется по круговой орбите! А так как он прыгает взад и вперед, то его траектория называется *маятниковой круговой орбитой*.

Типичная маятниковая круговая орбита в отрицательном пространстве схематически изображена на рис. 12.11. Хотя на рис. 12.10 показан только один луч света, захваченный на маятниковую круговую орбиту, существует целый Диапазон значений

прицельного параметра для лучей света, почти параллельных оси вращения, при которых они захватываются на подобные удивительные орбиты. В результате в отрицательном пространстве существует ряд маятниковых круговых орбит. На рис. 12.12 изображены границы всех возможных маятниковых круговых орбит для быстро вращающейся черной дыры. Заметим, что все изображенное на рис. 12.12 полностью находится в отрицательном пространстве, а соответствующие ему рис. 12.7 и 12.9 - полностью в положительном пространстве. Все маятниковые круговые орбиты неустойчивы.

Чтобы довести до конца наш анализ распространения световых лучей, заметим, что, согласно рис. 12.10, луч, проходящий рядом с внутренним краем кольца, может проникнуть в отрицательное пространство и снова отразиться назад. Тот факт, что луч может на мгновение нырнуть в отрицательное пространство и вернуться оттуда, сыграет важную роль при рассмотрении картины керровской черной дыры, какой она представляется удаленному астроному.

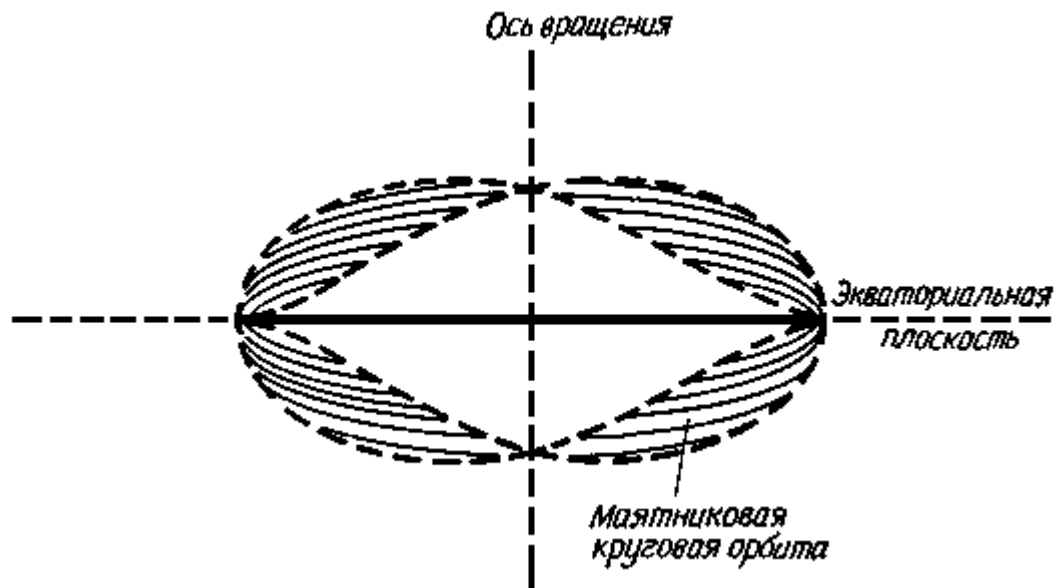


Рис. 12.12. Разброс маятниковых круговых орбит света в отрицательном пространстве ($r < Q$). Все возможные маятниковые круговые орбиты вблизи сингулярности керровской черной дыры (при $a = 90\% M$) лежат внутри границ, показанных на схеме. Внутри этой области отрицательного пространства лучи света отскакивают туда и обратно по эллипсоидальной поверхности.

Наконец, рассмотрим луч света, проходящий к керровской сингулярности со стороны отрицательной Вселенной. Те из них, которые идут по оси вращения или очень близко к ней, непосредственно попадают в положительное пространство сквозь кольцевую сингулярность. Однако, как показано на рис. 12.13, *все* лучи света, обладающие при сближении с черной дырой большими значениями прицельного параметра, *отталкиваются* от нее. При взгляде из отрицательного пространства дыра оказывается источником антигравитации. Она *все* отталкивает от себя и *ничего* не притягивает. Вот почему отрицательная Вселенная иногда называется "миром антигравитации".

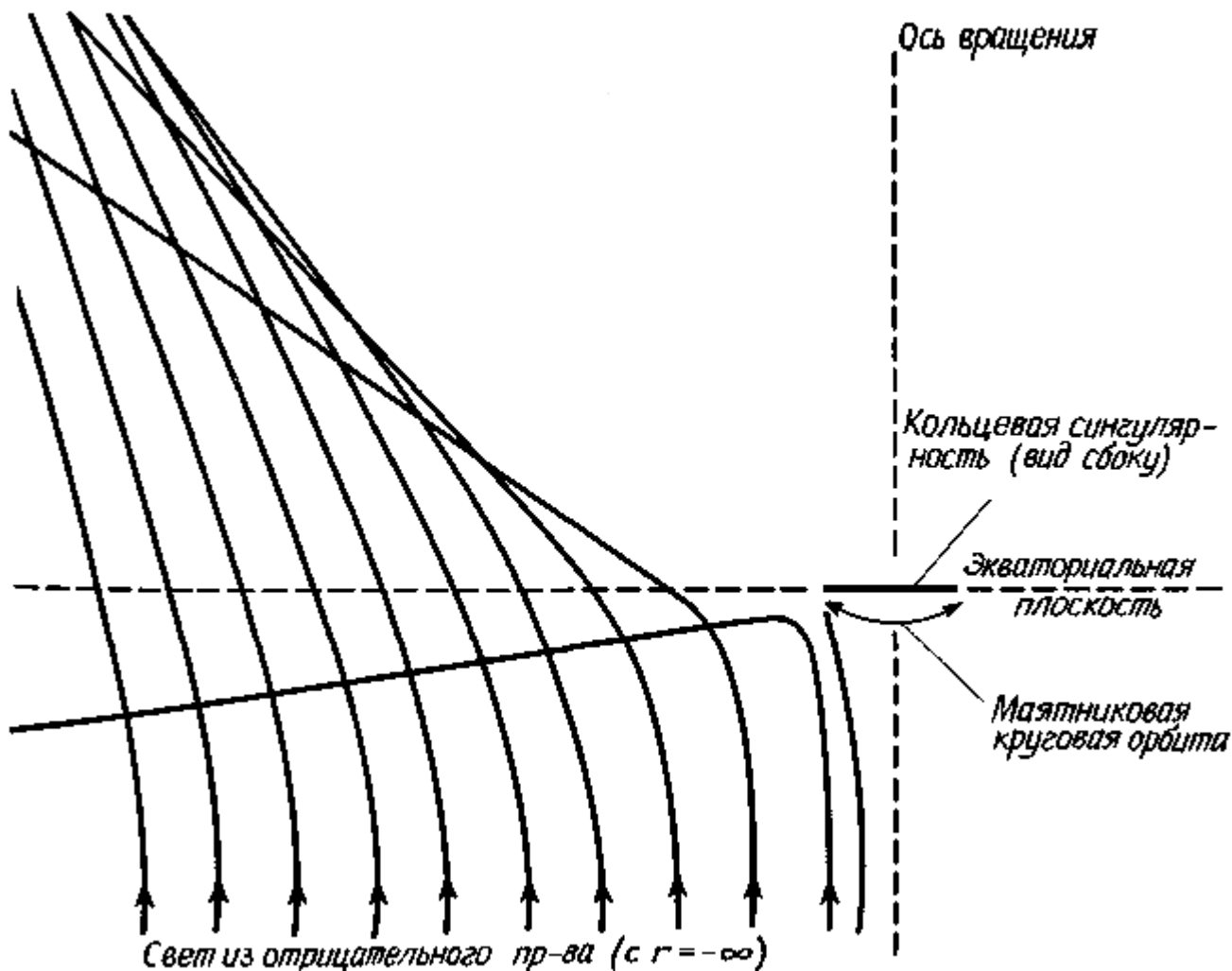


Рис. 12.13. Лучи света, идущие от отрицательного пространства. Приближающиеся к вращающейся черной дыре из отрицательного пространства лучи света отталкиваются этой дырой. В отрицательном пространстве вращающаяся черная дыра является источником антигравитации. (Схема построена для предельного решения Керра, когда $M=a$.)

Теперь, после того как мы подробно рассмотрели ход различных траекторий лучей света вблизи керровской черной дыры, можно представить себе, как будет выглядеть вращающаяся черная дыра "для удаленного астронома или достаточно смелого космонавта. Представим себе сначала астронома в нашей Вселенной, наблюдающего керровскую черную дыру. Поскольку дыра обладает осевой симметрией, астроном будет наблюдать разные картины в зависимости от того, под каким углом к оси вращения дыры он наблюдает. Для удобства на рис. 12.14 введен азимутальный угол θ . При $\theta = 0$ удаленный астроном смотрит прямо вдоль оси вращения дыры, а при $\theta = 90^\circ$ - вдоль ее экваториальной плоскости.

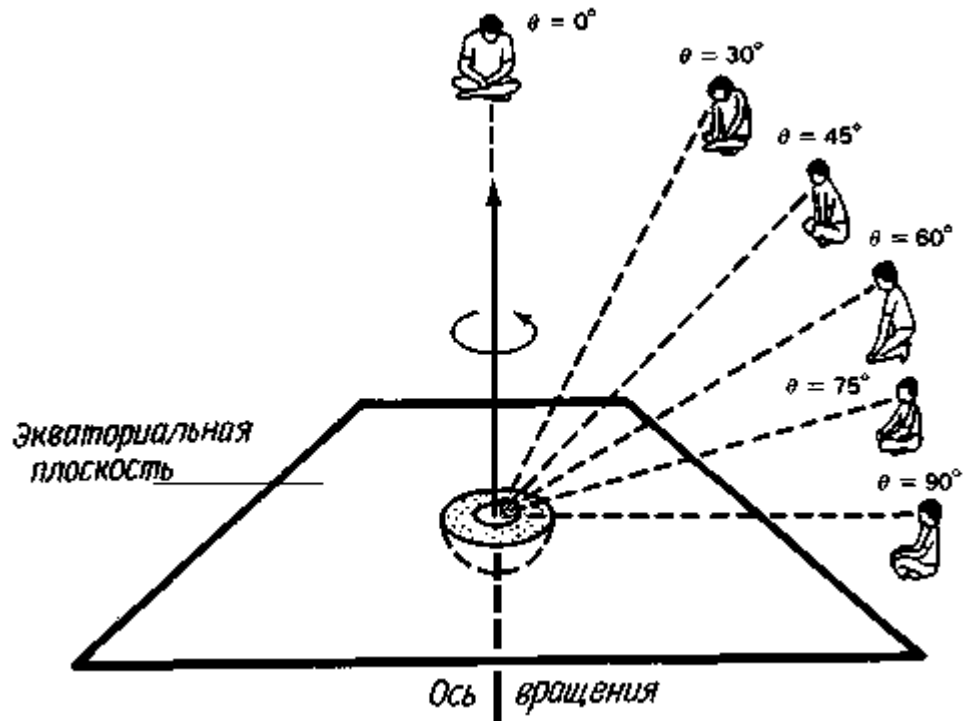


Рис. 12.14. Азимутальный угол θ . Если рассматривать керровскую черную дыру под разными углами, она будет выглядеть различно. Для указания, с какого направления рассматривается черная дыра, удобно пользоваться азимутальным углом θ .

Пусть наш астроном излучает центр вращающейся черной дыры с помощью чрезвычайно мощного телескопа. Астроном находится так далеко от дыры, что пространство-время для него плоское, а телескоп направлен прямо на сингулярность. На рис. 12.15, выполненном по расчетам Каннингэма, показано, что увидит астроном под разными углами в случае предельной керровской дыры ($M=a$). Глядя вниз по оси вращения (при $\theta=0$), он видит круговую область, заполненную светом, проходящим из отрицательного пространства через кольцевую сингулярность. Если сама сингулярность также излучает свет (а это действительно так; причины будут обсуждены в одной из следующих глав), то ее излучение выглядит как кольцо, окружающее круг света, идущего из отрицательного пространства. Между кругом света из отрицательного пространства и световым кольцом от сингулярности находится область, в которой распространяется свет из положительного пространства - тот самый, который сначала нырнул в отрицательное пространство, а потом снова вынырнул оттуда. Свет из предыдущей Вселенной прошлого (в положительном пространстве), пришедший к дыре рядом с внутренним краем кольцевой сингулярности, подвергается действию сильного

антигравитационного поля. Поэтому такой свет отталкивается сингулярностью и снова выбрасывается в положительное пространство нашей Вселенной. Снова необходимо подчеркнуть, что говорить о выходе света из керровской черной дыры можно потому, что мы рассматриваем здесь сильно идеализированный теоретический случай. В такое полное решение Керра фактически входят как черная, так и белая дыра.

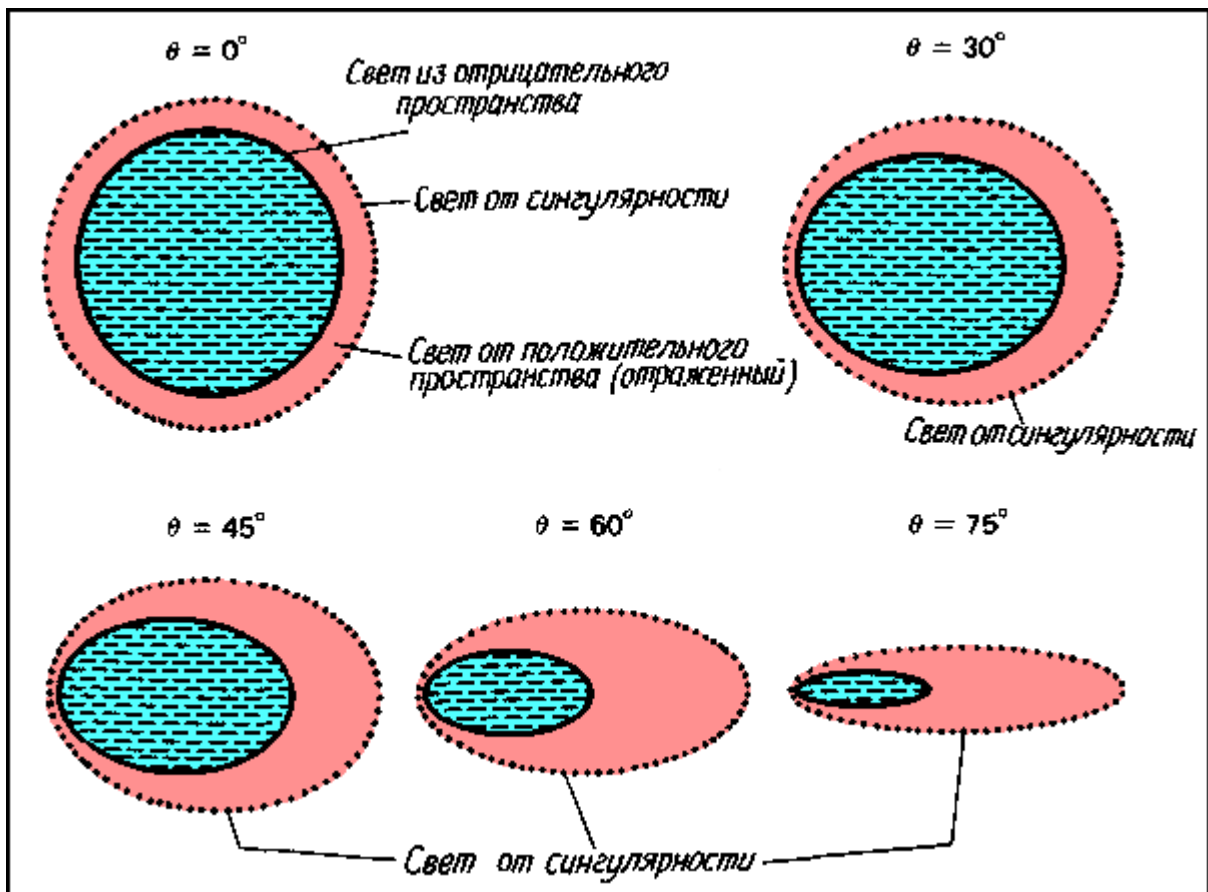


Рис. 12.15. Как выглядит сингулярность. На этой последовательности схем показано, как выглядит сингулярность предельной керровской черной дыры ($M=a$) под разными углами. Свет из отрицательного пространства проникает сквозь центр кольцевой сингулярности (изображен пунктирной линией).

Если смотреть на дыру под углом к оси ее вращения, то кружок света из отрицательной Вселенной становится эллиптическим и уменьшается в размерах. При еще больших углах область, заключающая в себе свет из отрицательной Вселенной, уменьшается и вытягивается еще сильнее. К тому же и светящийся образ сингулярности становится все более вытянутым эллипсом по мере того, как мы смотрим на керровскую сингулярность все более и более в профиль. Как и прежде, область между светом из отрицательного пространства и от сингулярности

заполнена лучами из положительного пространства, которые ненадолго нырнули в отрицательную Вселенную и вернулись назад.

Описанный только что анализ касался лишь вида самой сингулярности. Если наблюдающий черную дыру астроном сменит окуляр своего телескопа на широкоугольный, то он сможет увидеть и области на больших расстояниях от сингулярности. Чтобы разобраться в такой цельной картине вращающейся черной дыры, необходимо обратиться к диаграммам Пенроуза.

Рассмотрим диаграмму Пенроуза для предельной керровской дыры ($M=a$), изображенную на рис. 12.16. Вспомним, что на всех таких пространственно-временных

диаграммах лучи света всегда направлены под углом 45° . На данной диаграмме Пенроуза изображены мировые линии характерных лучей света, которые может увидеть астроном в нашей Вселенной (Вселенная 3). Прежде всего он получает свет от \mathcal{I}^- из

отрицательной Вселенной (Вселенная 2). Этот свет приходит от самого центра кольцевой сингулярности. Астроном получает также свет от сингулярности,

ограничивающей Вселенную 2 и тем самым разделяющий положительное пространство (справа) и отрицательное пространство (слева). Вид световой области из Вселенной 2 и от сингулярности показан на рис. 12.15. Однако с наружной границы света, приходящего от сингулярности, астроном видит световые лучи, идущие еще от двух источников.

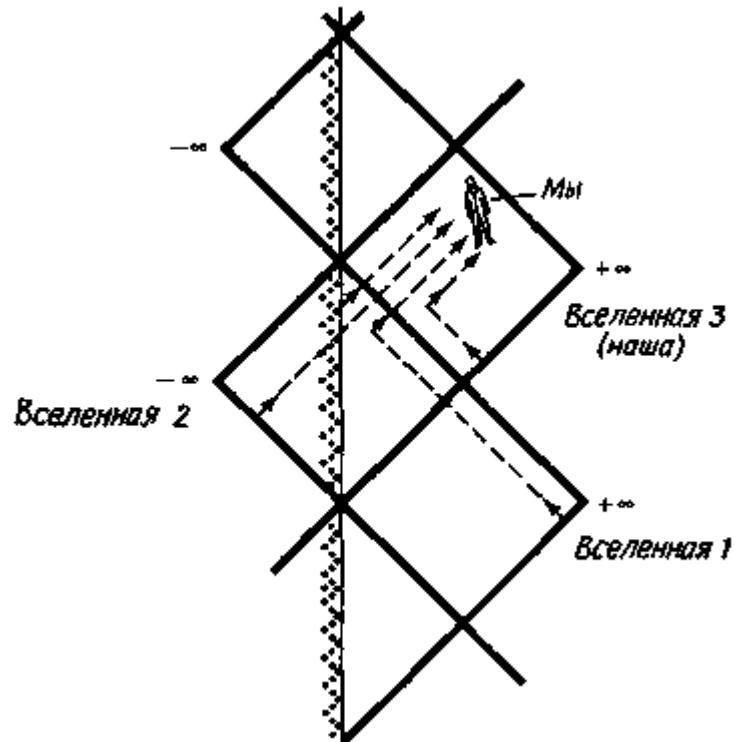


Рис. 12.16. Диаграмма Пенроуза для предельной керровской черной дыры ($M = a$). Астроном в нашей Вселенной видит свет, приходящий из разных мест, при наблюдении вращающейся черной дыры. К астроному в нашей Вселенной (Вселенная 3) приходит свет из отрицательного пространства (Вселенная 2) и связанной с этим пространством сингулярности. К астроному также отражается изнутри дыры свет из предыдущей Вселенной (Вселенная 1) и из ранних эпох нашей Вселенной.

Звезды и галактики в нашей Вселенной (а также наверняка и в других Вселенных) испускают свет во всех направлениях. Часть этого света попадает на вращающуюся черную дыру. Когда этот свет проходит в эргосферу дыры, он многократно прокручивается вокруг оси вращения. Грубо говоря, часть этого света испытывает действие "центробежных сил", отбрасывающих лучи назад во Вселенную. Иными словами, луч света из \mathcal{J}^- нашей Вселенной и \mathcal{J}^- предыдущей Вселенной (Вселенной 1) могут снова отражаться в положительное пространство. Удаленный астроном может поэтому видеть свет из Вселенной 1 и из нашей Вселенной (от ранних этапов ее истории!).

На рис. 12.17, А-В, изображен полный вид предельной керровской черной дыры, как ее видел бы удаленный астроном в нашей Вселенной.

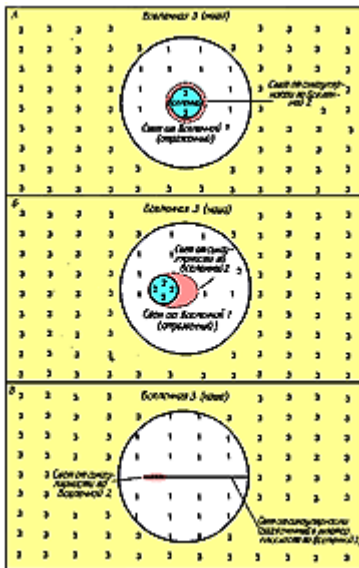


Рис. 12.17. Вид предельной керровской черной дыры под разными углами.

Во всех случаях характерный вид сингулярности взят с рис. 12.15. Центральная часть дыры всякий раз окружена большой круговой областью, заполненной светом из Вселенной 1. Этот свет отражается в сторону астронома из глубокой внутренней части дыры. Вне этой круговой области астроном видит свет от объектов из его собственной Вселенной. Таким образом, астроном, рассматривая вращающуюся черную дыру, может наблюдать, что происходит в отрицательной Вселенной и что происходило в предшествующей положительной Вселенной. К тому же свет из Вселенной 3, наблюдаемый рядом с дырой, приходит от раннего этапа нашей собственной Вселенной (из \mathcal{J}^- Вселенной 3). Поэтому астроном в принципе должен увидеть, что происходило

миллиарды лет назад! У него появляется принципиальная возможность увидеть образование Земли, динозавров или доисторического человека - все зависит от того, куда именно он будет смотреть.

Общая картина черной дыры при наблюдении под разными углами имеет одни и те же особенности. Однако при наблюдении под углом к ее оси вращения видимое положение сингулярности оказывается сдвинутым в одну сторону ввиду вращения дыры. Когда астроном наблюдает дыру в ее экваториальной плоскости ($\theta=90^\circ$), он

видит сингулярность сбоку. В отличие от предыдущих случаев свет, обращающийся вокруг сингулярности в экваториальной плоскости, может "раскрутиться" наружу и попасть в телескоп далекого астронома.

Если черная дыра вращается медленнее, чем с предельной скоростью, то вид ее при наблюдении с направлений вне экваториальной плоскости в основном такой же, как у предельной керровской дыры. Однако при взгляде из экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) обнаруживаются некоторые новые детали. Чтобы понять их происхождение, следует обратить внимание на соответствующую диаграмму Пенроуза. На рис. 12.18 изображена диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры при $M > a$.

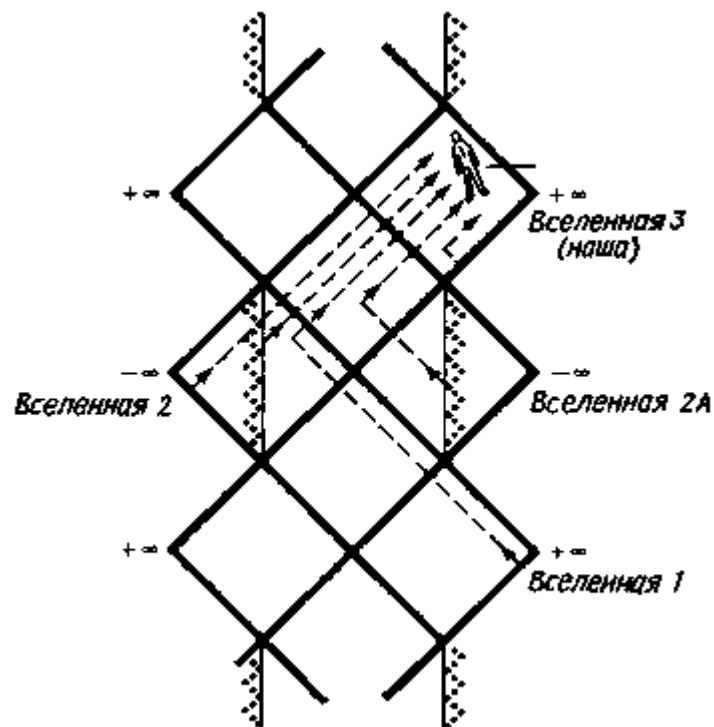


Рис. 12.18. Диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры с $M > a$. Если черная дыра вращается со скоростью меньше предельной, то свет от сингулярности, которая ограничивает вторую отрицательную Вселенную (Вселенную 2А), отражается изнутри черной дыры к удаленному астроному в нашей Вселенной.

В нашей Вселенной (Вселенная 3) астроном все еще наблюдает свет, приходящий как непосредственно из Вселенной 2, так и с ограничивающей ее сингулярности. К нему продолжает поступать и отраженный свет из Вселенной 1 (предшествующей Вселенной с положительным пространством) и из отдаленного прошлого его собственной Вселенной. Однако, поскольку дыра вращается медленно, на диаграмме Пенроуза появляется еще одна Вселенная с отрицательным

пространством. Свет от сингулярности, ограничивающей эту добавочную отрицательную Вселенную (Вселенную 2А), также отражается изнутри дыры в сторону удаленного астронома. Таким образом, последний может видеть свет с сингулярности Вселенной 2А. Соответствующие лучи попадают к удаленному астроному лишь в том случае, если он находится в экваториальной плоскости черной дыры ($\theta = 90^\circ$). На рис. 12.19, основанном на расчетах Каннингэма, показан вид почти - предельной керровской черной дыры ($a = 10\% M$). Вид этот почти такой же, как и в предельном случае (рис. 12.17, В), однако теперь виден свет от сингулярности, ограничивающей вторую отрицательную Вселенную. Свет от этой второй сингулярности появляется несколько левее в поле зрения и включает два небольших "крыла", слегка поднимающихся и опускающихся относительно экваториальной плоскости.

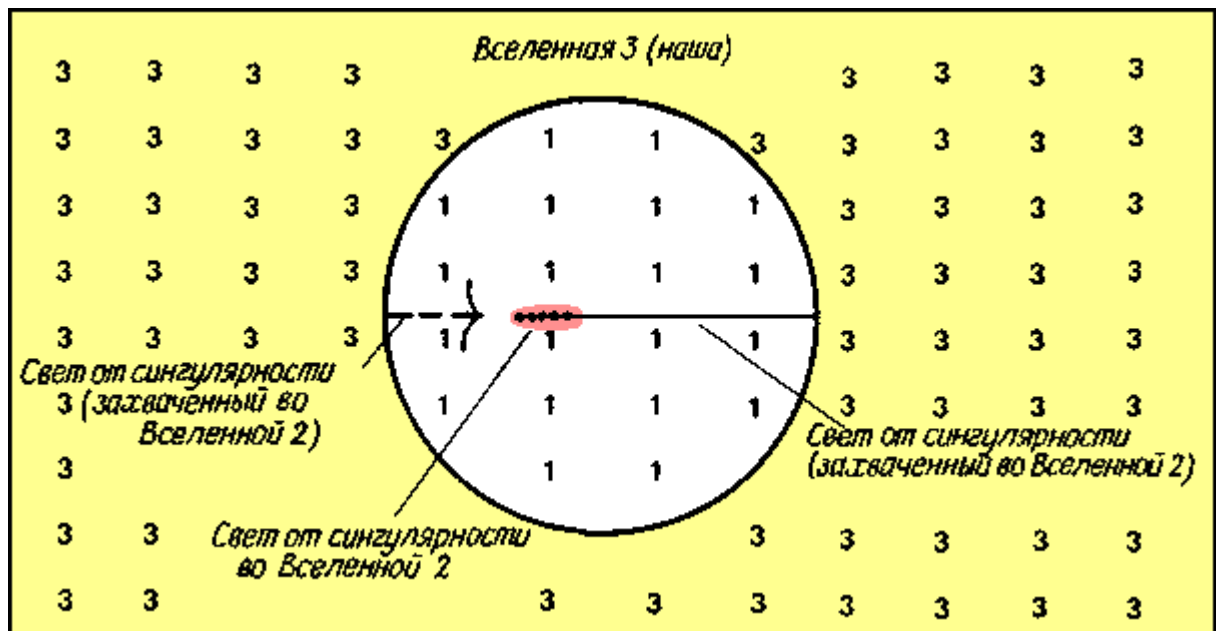


Рис. 12.19. Вид почти предельной керровской черной дыры при $\theta = 90^\circ$. При наблюдении из экваториальной плоскости непрелюдной ($M > a$) вращающейся черной дыры астроном может видеть свет из второй отрицательной Вселенной (Вселенной 2А), отраженный к нему изнутри дыры.

На очереди - занимательное упражнение, героями которого будут отчаянные космонавты: что они увидят, ныряя во вращающуюся керровскую черную дыру и выныривая из нее? Рассмотрим сначала полет "камикадзе". Два космонавта покидают нашу Вселенную и ныряют в непрелюдную керровскую черную дыру в ее экваториальной плоскости. Направив свой космический корабль в экваториальной плоскости дыры, они понимают, что врежутся в сингулярность и будут разорваны

бесконечно сильно искривленным пространством-временем. И все же они решаются ...

На рис. 12.20 приведена мировая линия этих космонавтов-самоубийц. Они направляются прямо к сингулярности в экваториальной плоскости. Согласно обозначениям, использованным в предыдущем случае, они начинают путешествие в нашей Вселенной (Вселенной 3). Как и астроном, наблюдающий черную дыру, космонавты могут видеть свет из Вселенной 2, Вселенной 2А и Вселенной 1. Кроме того, после пересечения внешнего горизонта событий они могут видеть Вселенную 4 - Вселенную с положительным пространством, находящуюся на диаграмме Пенроуза напротив нашей Вселенной. Наконец, после пересечения внутреннего горизонта событий они увидят и Вселенную 5 - ту Вселенную с отрицательным пространством, которую ограничивает роковая для них сингулярность. На рис. 12.20 изображены эти различные Вселенные и мировые линии, по которым распространяются характерные лучи света.

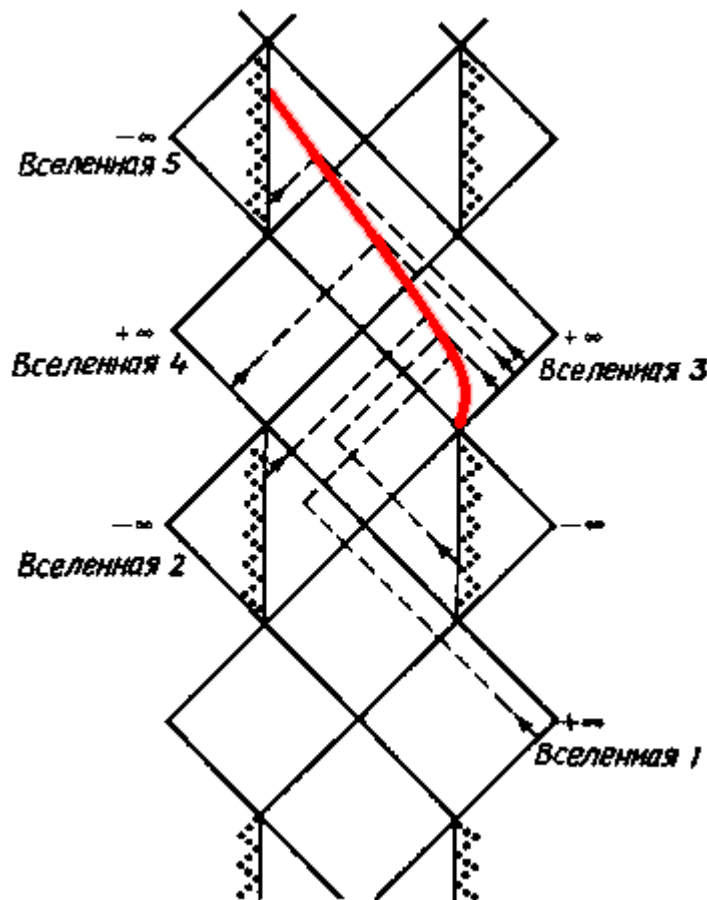


Рис. 12.20. Полет "камикадзе". Здесь на диаграмме Пенроуза изображена мировая линия двух космонавтов, гибнущих в черной дыре. Космонавты ведут свой космический корабль в

экваториальной плоскости неопредельной керровской черной дыры ($M > a$).

Для своего путешествия космонавты сконструировали специальный корабль. Их космический корабль снабжен двумя большими иллюминаторами (рис. 12.21). В каждый из них видно в точности половину небесной сферы. При конструировании корабля космонавты учли один важный факт: при вхождении в эргосферу эффект увлечения инерциальных систем должен вызвать быстрое вращение корабля. Для избежания этой помехи предусмотрены стабилизирующие ракетные двигатели, которые обеспечивают ориентацию носового иллюминатора всегда в сторону сингулярности, а кормового - всегда в сторону внешней Вселенной.

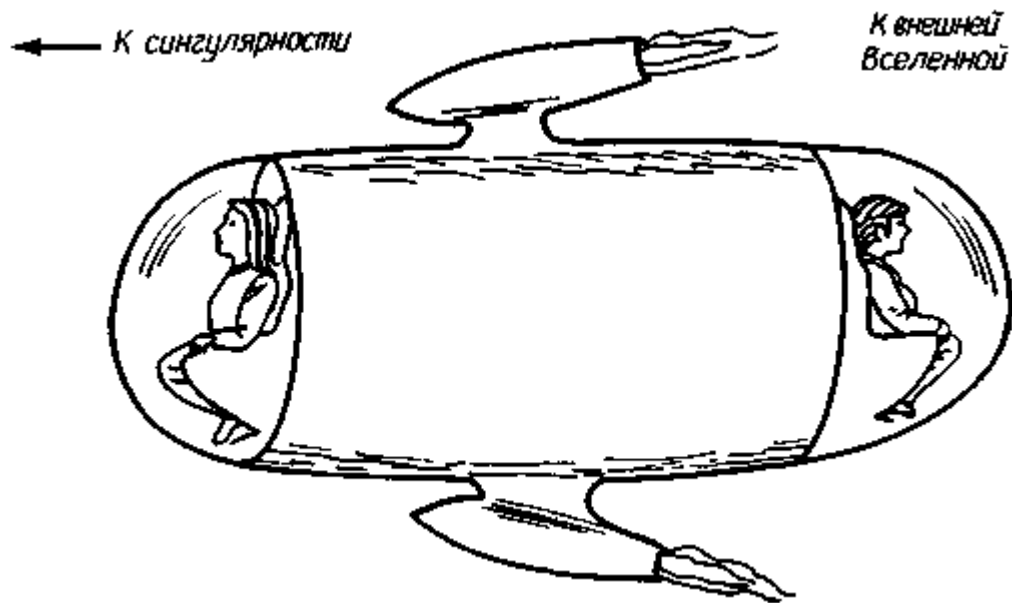


Рис. 12.21. Космический корабль, увлекающий космонавтов в дыру. Через каждый из двух иллюминаторов корабля видно в точности половину небесной сферы. Космический корабль оснащен стабилизирующими ракетными двигателями, чтобы носовой иллюминатор был всегда направлен на сингулярность, а кормовой - в прямо противоположную сторону.

В течение полета космонавты делают парные фотоснимки, один из которых всегда запечатлевает вид вперед, а другой - вид назад, на разных характерных этапах падения космонавтов в дыру. На диаграмме Пенроуза (рис. 12.22) на мировой линии космонавтов отмечены точки, показывающие, где сделана каждая из семи пар фотографий.

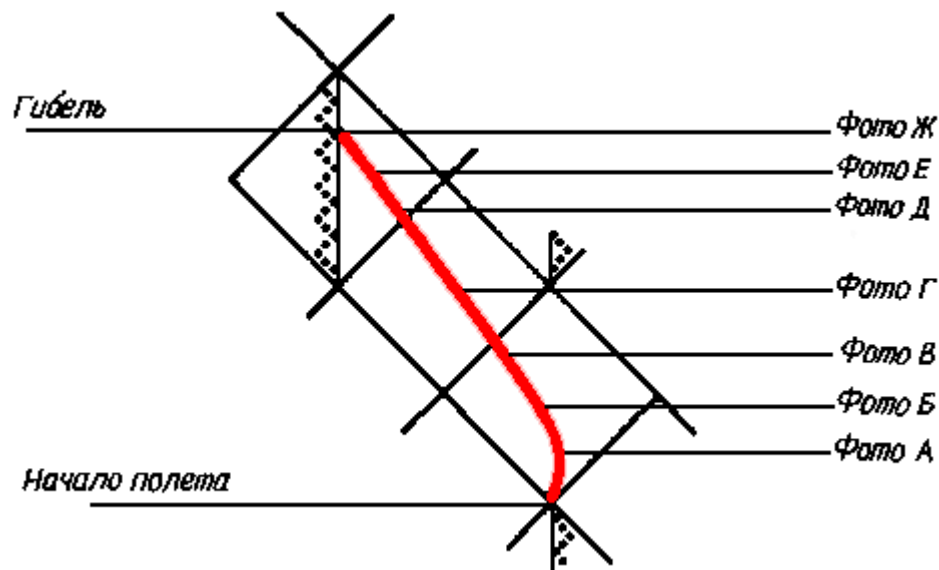


Рис. 12.22. Точки, в которых производилось фотографирование. Космонавты делали по паре снимков (один из носового, другой -лиз кормового иллюминатора) в семи точках при своем спуске в дыру.

Астронавты погрузились в свой космический корабль и взлетели. Еще будучи очень далеко от черной дыры, они сделали первую пару снимков (рис. [12.23,А](#)). Поскольку пространство-время вокруг них было почти плоским, вид впереди очень похож на тот, который наблюдал астроном, спокойно устроившийся на Земле (ср. с рис. 12.19,А). Вид из кормового иллюминатора особого интереса не представляет: просто видно, откуда летят космонавты.

Приближаясь к черной дыре, космонавты входят в область круговых орбит света. Здесь они наблюдают свет, захваченный гравитационным полем дыры. На второй паре снимков (рис. [12.23,Б](#)) этот захваченный свет занимает часть поля зрения (он обозначен значком Т). Через кормовой иллюминатор видна только наша Вселенная, хотя сам вид звезд и галактик теперь начал понемногу искажаться.

По мере того как падающий в дыру корабль приближается к внешнему горизонту событий, часть поля зрения, занятая захваченным светом, все возрастает. При этом космонавты постепенно удаляются от Вселенной 1. Та часть поля зрения, которая занята изображением Вселенной 1, постепенно уменьшается, что видно на паре снимков, сделанных непосредственно над внешним горизонтом событий (рис. [12.23,В](#)). В тот момент, когда корабль проходит через внешний горизонт событий, Вселенная 1 вообще исчезает из виду. По пути к внешнему горизонту событий через кормовой иллюминатор была все время видна только Вселенная 3. Но по мере того,

Продолжая падать, космонавты видят, как увеличивается изображение сингулярности во Вселенной 5. Они должны при этом заметить, что сингулярность окружена новой областью захваченного света, который на последующих снимках обозначен как t (рис. [12.23,Е](#)). К тому же свет из Вселенной 3 теперь доходит до космонавтов по двум каналам. Они видят свет, непосредственно приходящий из нашей Вселенной (главным образом через кормовой иллюминатор), но тот же свет приходит к ним и косвенно, отразившись от сингулярности во Вселенной 5.

Наконец, непосредственно перед тем, как космонавты будут разорваны на части в сингулярности, вторая область захваченного света разрастется настолько, что перетянется и в поле зрения кормового иллюминатора. Эта пара снимков (рис. [12.23,Ж](#)) - последнее, что увидят космонавты перед своей гибелью. Отметим также, что и большая часть отраженного света из Вселенной 4 здесь перетянута в поле зрения кормового иллюминатора.

Узнав о трагическом конце своих коллег, еще два космонавта вдохновились идеей космического путешествия в черную дыру, но наметили себе более безопасный маршрут. Опираясь на тот факт, что керровская сингулярность имеет форму кольца, космонавты решили спуститься в черную дыру вдоль ее оси вращения. По их расчетам это поможет избежать гибели в точке с бесконечной кривизной пространства-времени. Кроме того, космонавты решили *не ставить* на свой космический корабль никаких ракетных двигателей. Их путешествие будет сводиться к *свободному падению* на вращающуюся черную дыру. Тот факт, что космонавты свободно падают на дыру вдоль ее оси вращения, приводит к важным последствиям. При подходе к кольцевой сингулярности их встретит столь сильная антигравитация, что их выбросит прочь из дыры. Прорваться в отрицательную Вселенную по другую сторону кольца они могли бы только при использовании тяги ракетных двигателей. Их путешествие поэтому получило кодовое название "прыжок с отскоком".

На рис. 12.24 показан "прыжок с отскоком" на диаграмме Пенроуза. В тех же обозначениях, что и прежде, можно сказать, что это путешествие началось во Вселенной 3 (нашей Вселенной). Нырнув в черную дыру, космонавты отражаются от сингулярности во Вселенной 5. Их путешествие заканчивается прибытием во Вселенную 7.

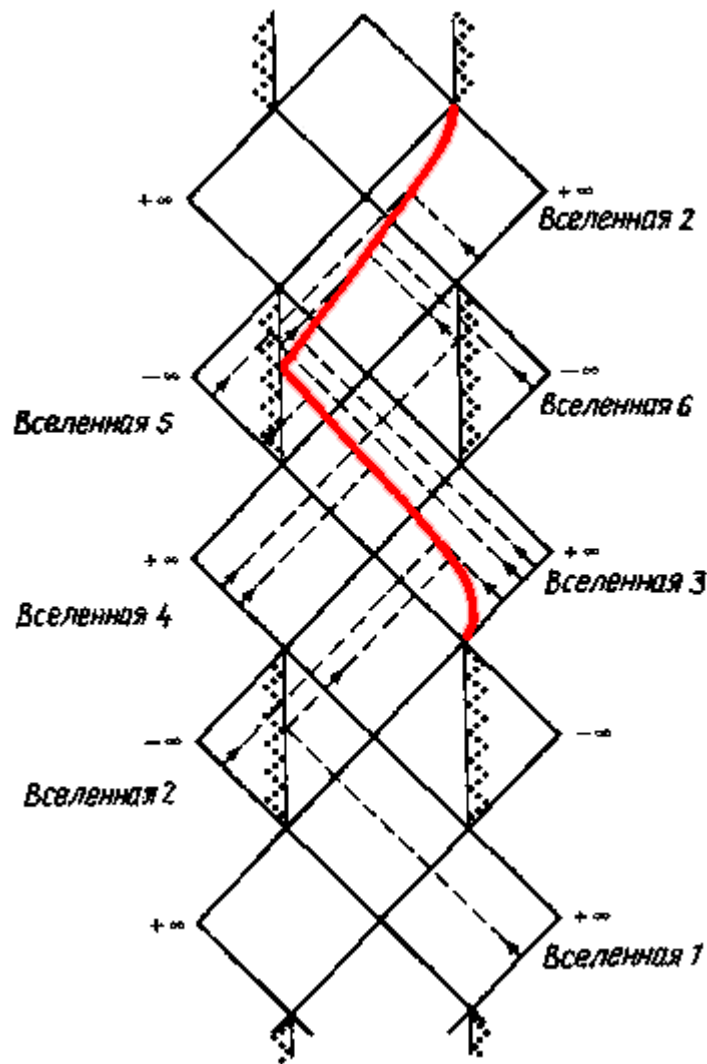


Рис. 12.24. Путешествие "прыжок с отскоком". На диаграмме Пенроуза изображена мировая линия двух космонавтов. Их космический корабль свободно падает вдоль оси вращения неопределяемой Керровской черной дыры ($M > a$).

Конструкция использованного в этом путешествии космического корабля представлена на рис. 12.25. Заметьте, что у корабля нет ракетных двигателей! Предоставив своему кораблю свободно падать на черную дыру, космонавты обеспечивают его "отскок" наружу под действием антигравитации вблизи кольцевой сингулярности. Космический корабль снабжен двумя большими иллюминаторами, причем из каждого можно наблюдать в точности половину небесной сферы. Космонавты условились называть носовым иллюминатором тот, который *всегда* обращен к сингулярности (как до, так и после отскока). Напротив, тот иллюминатор, который все время смотрит во внешнюю Вселенную (до отскока - во Вселенную 3, а после - во Вселенную 7), они именуют кормовым.



Рис. 12.25. *Космический корабль.* На корабле, на котором два космонавта отправились к черной дыре вдоль ее оси вращения, вообще нет ракетных двигателей. Корабль снабжен двумя иллюминаторами, в каждый из которых видно в точности половину небесной сферы. Носовой иллюминатор всегда направлен в сторону сингулярности - как в начале прыжка, так и после отскока.

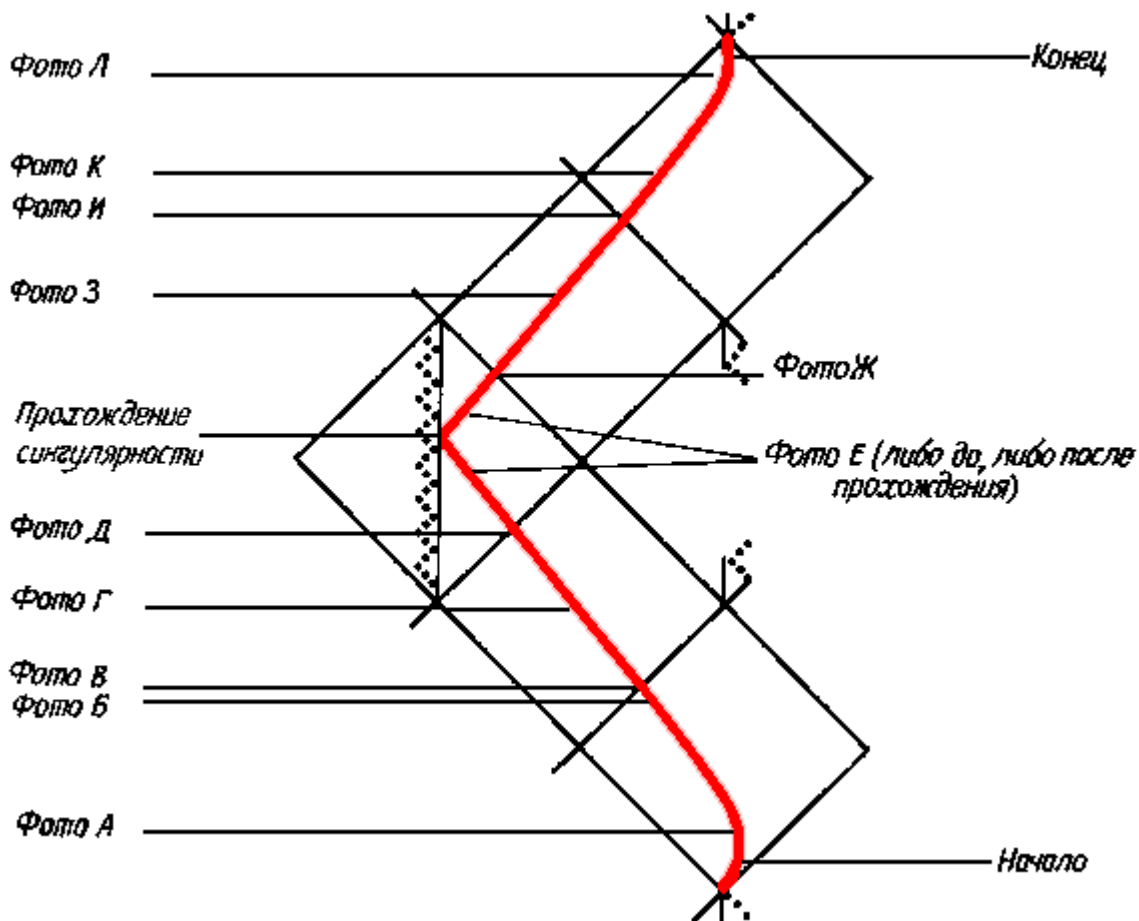


Рис. 12.26. *Точки, в которых производилось фотографирование.* Космонавты во время своего путешествия сделали в одиннадцати точках по паре снимков (по одному из носового иллюминатора, направленного на сингулярность, и по одному - из кормового иллюминатора, смотрящего во внешнюю Вселенную).

Во время полета космонавты сделали 11 пар фотоснимков (от А до Л), на которых оказались запечатленными изменения вида неба. Как и в случае первого

(самоубийственного) путешествия, приведенные картины основаны на расчетах Каннингэма. На рис. 12.26 на диаграмме Пенроуза показаны те точки на мировой линии космического корабля, в которых делались снимки. Уверенные в том, что гибель им не грозит, два космонавта садятся в свой корабль и начинают падать вниз, в дыру. Находясь еще далеко от черной дыры, они делают первую пару снимков (рис. [12.27,А](#)). Так как они находятся пока в почти плоском пространстве-времени, картина получается почти такой же, какую наблюдает любой достаточно удаленный астроном. (Ср. рис. [12.27,А](#) и рис. [12.17,А](#))

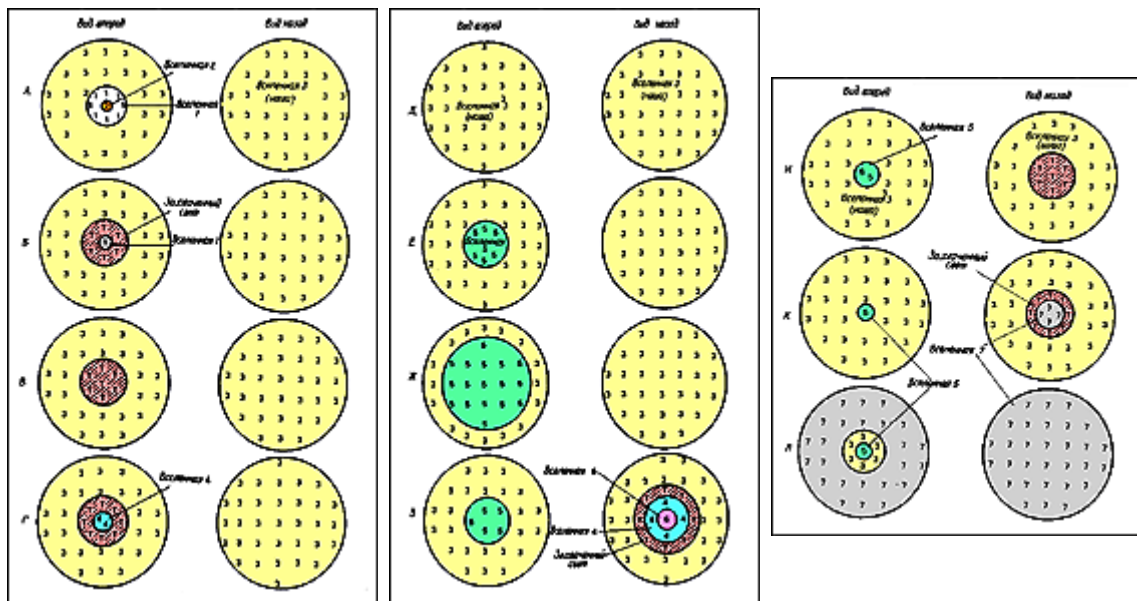


Рис. 12.27. *Фотографии черной дыры, сделанные свободно падающими наблюдателями из разных точек* (см. Рис. [12.26](#)).

Приближаясь ко внешнему горизонту событий, космонавты оказываются все дальше и дальше от Вселенных 1 и 2, изображения которых становятся все меньше и меньше. Они вообще исчезают навсегда, как только космический корабль пересекает внешний горизонт событий. Этот факт подтверждается анализом мировых линий типичных лучей света на диаграмме Пенроуза (см. рис. [12.24](#)). Непосредственно перед тем, как пересечь внешний горизонт событий, космонавты замечают, что становится виден захваченный свет, обращающийся вокруг черной дыры; это видно на второй паре фотографий (рис. [12.27,Б](#)).

Как уже отмечалось, Вселенные 1 и 2 исчезли с глаз космонавтов при пересечении ими внешнего горизонта событий. На третьей паре снимков (рис. [12.27,В](#)) видно, что

средняя часть поля зрения носового иллюминатора заполнена лишь захваченным черной дырой светом.

Упав под внешний горизонт событий, космонавты могут видеть свет из Вселенной 4. В этом легко удостовериться, рассмотрев мировые линии типичных лучей света на диаграмме Пенроуза (рис. [12.24](#)). Поэтому на паре снимков, сделанных в промежутке между двумя горизонтами (рис. [12.27,Г](#)), в центре поля зрения носового иллюминатора появляется область, заполненная светом из Вселенной 4.

На пути от внешнего к внутреннему горизонту событий область, занятая светом из Вселенной 4, сначала увеличивается, но потом начинает уменьшаться, а на внутреннем горизонте событий Вселенная 4 вообще исчезает из виду. Все поле зрения как носового, так и кормового иллюминатора заполнено лишь светом из Вселенной 3. В момент пересечения внутреннего горизонта событий до космонавтов не может дойти свет ни из какой другой Вселенной, как видно по паре фотографий, снятых в этой точке (рис. [12.27,Д](#)). Отметим, что здесь изображения звезд и галактик нашей Вселенной подверглись сильнейшему искажению.

Опустившись под внутренний горизонт событий, космонавты могут видеть свет из Вселенной 5. Как до, так и после момента отскока Вселенная 5 видна в центре поля зрения носового иллюминатора. Нужно помнить, что как *до* отскока, так и *после* носовой иллюминатор направлен на сингулярность. Аналогично кормовой иллюминатор *все время* смотрит во внешнюю Вселенную (на пути туда - во Вселенную 3, а на обратном пути - во Вселенную 7). Поэтому пара снимков, сделанных близ момента отскока (рис. [12.27,Е](#)), будет правильно отражать картину как непосредственно до, так и сразу после этого момента.

Удаляясь на обратном пути из черной дыры от сингулярности, космонавты видят, как область, занятая светом из Вселенной 5, продолжает увеличиваться в размерах. Из пары снимков, сделанных на внутреннем горизонте событий (рис. [12.27,Ж](#)) видно, что Вселенная 5 занимает почти все поле зрения носового иллюминатора, направленного к сингулярности.

Когда космонавты поднимаются сквозь внутренний горизонт событий, они начинают видеть Вселенную 6. Кроме того, к ним попадает и отраженный свет из Вселенной 4. Он отражается от сингулярности, ограничивающей Вселенную 6, что можно выяснить, исследуя мировые линии типичных лучей света на диаграмме Пенроуза

(рис. [12.24](#)). Пара снимков, сделанных между двумя горизонтами (рис. [12.27,З](#)), показывает также, что космонавты снова видят захваченный свет. И наконец, поскольку они уходят все дальше и дальше от Вселенной 5, ее изображение теперь становится все меньше и меньше.

Исследуя на диаграмме Пенроуза (рис. [12.24](#)) мировые линии типичных лучей света, можно увидеть, что на внешнем горизонте событий до космонавтов не может доходить свет из Вселенной 4 или 6. Поэтому, как только космонавты достигают внешнего горизонта событий, эти две Вселенные пропадают из виду. Как видно на паре снимков, сделанных в этой точке (рис. [12.27,И](#)), захваченный свет заполняет середину поля зрения кормового иллюминатора (направленного во внешнюю Вселенную). Отметим также, что Вселенная 5, от которой космонавты удаляются, стала казаться еще меньше.

Вылетев за внешний горизонт событий, космонавты оказываются во Вселенной 7, в которой их путешествие завершается. Поэтому Вселенная 7 появляется в центре поля зрения внешнего (кормового) иллюминатора, как это видно на паре снимков, сделанных сразу над внешним горизонтом событий (рис. [12.27,К](#)). По мере того как космонавты удаляются от черной дыры, Вселенная 7 занимает все больше и больше места в иллюминаторе. При этом изображение Вселенной 5 продолжает уменьшаться в размерах, как и изображение нашей Вселенной (Вселенной 3). Поэтому на очень большом расстоянии от черной дыры Вселенная 7 заполняет полностью весь внешний (кормовой) иллюминатор. Свет из Вселенных 3 и 5 сохраняется лишь в крохотном кружке в центре внутреннего (носового) иллюминатора. На паре снимков, сделанных в конце путешествия (рис. [12.27,Л](#)), будет наблюдаться та же картина, которую видит "чужой" астроном, живущий во Вселенной 7.

В заключение необходимо отметить, что приведенные здесь пары снимков, сделанных как космонавтами-смертниками, так и участниками "прыжка с отскоком", неполно характеризуют картину полетов. Чтобы не усложнять чрезмерно эти схемы, мы даже не пытались изобразить те многообразные и сложные искажения вида звезд и галактик, которые должны были наблюдать космонавты. Кроме того, мы не стали характеризовать и те разнообразные и сложные явления красного и фиолетового смещения, с которыми при этом столкнулись бы космонавты. Однако в одной из

следующих глав мы увидим, что существование на горизонтах событий весьма сильного фиолетового смещения света влечет за собой важные и глубокие последствия.

14. Белые дыры и рождение частиц

Возможность существования в космосе черных дыр - это одно из самых замечательных предсказаний теоретической физики XX в. Мысль о том, что черные дыры должны существовать реально, является прямым выводом из современных представлений об эволюции звезд. Умирая, массивные звезды катастрофически сжимаются (коллапсируют) - как бы взрываются внутрь - и порождают область, в которой тяготение настолько сильно, что оттуда не может выйти ничто - даже свет.

При анализе характеристик черных дыр, выведенных из теории, было отмечено, что все эти дыры должны обладать массой. Вдобавок к массе они могут обладать также зарядом и (или) моментом количества движения. Вообще говоря, черная дыра, которая может существовать реально, имеет, вероятно, ничтожно малый заряд, но вращается очень быстро. Поэтому такую дыру хорошо описывает решение Керра.

Из описанного выше теоретического анализа следует, что полная геометрическая структура даже идеальной черной дыры чрезвычайно сложна. Ведь в глобальной структуре пространства-времени дыры объединено множество Вселенных - это видно из диаграмм Пенроуза. В случае простейшей черной дыры, которая характеризуется только массой (это шварцшильдовская черная дыра, представленная на рис. [9.11](#) и [9.18](#)), помимо нашей собственной Вселенной существует еще одна, иная. Ввиду пространственноподобного характера шварцшильдовской сингулярности в эту другую Вселенную невозможно проникнуть из нашей Вселенной, если пользоваться любыми допустимыми (временноподобными) мировыми линиями. Однако, как только у дыры будет либо заряд, либо вращение, сингулярность становится временно-подобной, и полная геометрическая структура решений Райснера-Нордстрёма или Керра объединяет бесконечно большое число Вселенных прошлого и будущего (см. рис. [10.10](#) и [11.14](#)). Свойство решений Керра и Райснера-Нордстрёма включать множество Вселенных приводит к поразительной возможности гипотетических путешествий в черные дыры,

а из них - во Вселенные будущего, что мы обсуждали в [гл. 12](#). Тем самым появляется возможность машины времени!

ль "Другие" Вселенные, появившиеся на диаграмме Пенроуза, можно истолковать разными способами. Один способ - это сказать, что на самом деле это разные, отдельные Вселенные, вообще никак не связанные с нашей Вселенной. Столь же приемлема и другая трактовка: ряд этих "других" Вселенных на самом деле являются вариантами нашей собственной Вселенной, но отнесенными к иной эпохе. Иными словами, теоретически не исключено, чтобы одна из "других" Вселенных на диаграмме Пенроуза была *нашей* Вселенной, скажем, миллиард лет назад, как это показано на рис. 14.1. Смелычак-космонавт мог бы, покинув Землю сейчас и нырнув в черную дыру, вынырнуть в нашей же Вселенной в прошлом. Это - путешествие во времени.

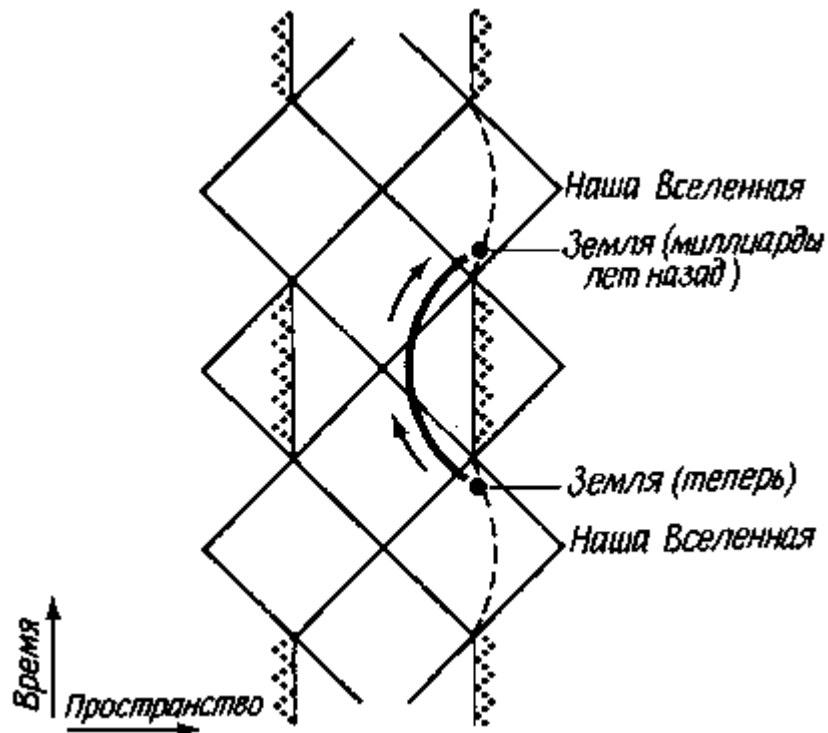


Рис. 14.1. *Машина времени.* Если та или иная Вселенная на диаграмме Пенроуза - это в действительности наша Вселенная в более ранние моменты времени, то космонавт может, вылетев сейчас с Земли, вернуться на Землю в прошлом, пройдя через черную дыру.

Аналогично какая-то другая Вселенная на диаграмме Пенроуза могла бы на самом деле быть нашей собственной Вселенной в очень далеком будущем. Тогда наш космонавт мог бы, улетев с Земли, вернуться на нее через миллиарды лет в

будущем, просто-напросто отправившись в соответствующую Вселенную на Диаграмме Пенроуза.

Хотя на рис. 14.1 изображена диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры (с сингулярностями, обозначенными пунктиром, и отрицательными Вселенными), те же в общем характеристики свойственны и черной дыре Райснера-Нордстрёма. В любом случае, истолковывая ряд других Вселенных как иные варианты нашей собственной Вселенной в разные времена, мы могли бы путешествовать в прошлое и в будущее.

В общем-то мысль о возможности существования машины времени ученым не по душе. Ведь тогда могли бы происходить поистине чудовищные вещи. Представим себе, например, космонавта, вылетевшего с Земли и нырнувшего во вращающуюся или заряженную черную дыру. Немного пространствовав там, он обнаружит Вселенную, являющуюся его же собственной, только на 10 мин более ранней во времени. Войдя в эту более раннюю Вселенную, он обнаружит, что все обстоит так, как было за несколько минут до его отправления. Он может даже встретить самого себя, полностью готового к посадке в космический корабль (рис. 14.2). Встретив самого себя, он может рассказать себе же, как он славно попутешествовал. Затем, вдвоем с самим собой, он может сесть в ожидающий космический корабль, и он (или правильнее сказать: они? ...) может (вдвоем!) снова повторить тот же полет!

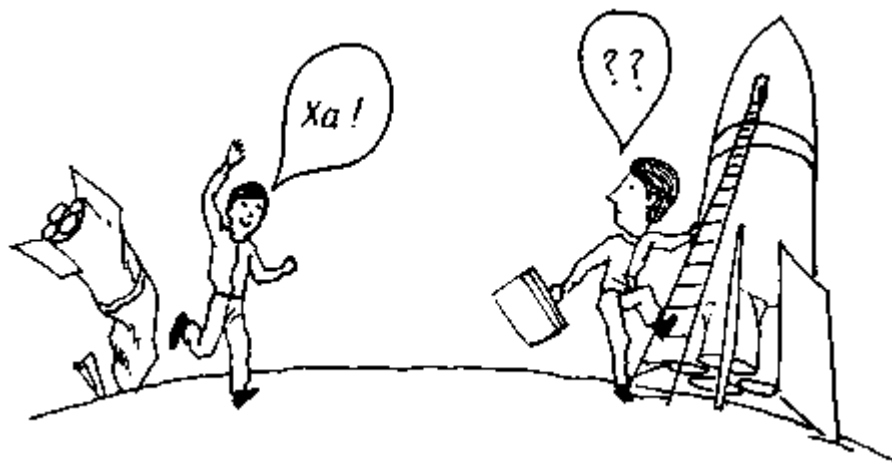


Рис. 14.2. *Нарушение принципа причинности.* Вернувшись в свою собственную Вселенную немного раньше времени своего отправления, космонавт может встретить самого себя, садящегося в космический корабль. Это - нарушение принципа причинности !

Описанное путешествие - наглядное свидетельство того, как машина времени нарушает *принцип причинности*. Принцип причинности сводится, по существу, к

простому утверждению, что следствие бывает *после* причины. Если у вас в комнате внезапно зажглась лампочка, то резонно предположить, что кто-то долей секунды раньше щелкнул выключателем. И было бы абсурдным думать, что лампочка может зажечься *сейчас* потому, что кто-то *через* десять лет, в будущем, повернет выключатель. Сама мысль о том, что следствия могут происходить *до* их причин, отвергается человеческим умом.

Поэтому существуют две возможности. Первая: возможно, причинность нарушается? Это означало бы, что физическая действительность иррациональна на самом фундаментальном уровне, т. е. мир абсолютно безумен, а кажущаяся его рациональность - чисто воображаемая, искусственно вложенная в ум человека. Может быть, ученые уверовали в причинность, надеясь понять мир, который вообще непознаваем?...

Вторая возможность: диаграммы Пенроуза - не последняя инстанция в постижении истины. Может быть, действуют какие-то дополнительные, физические эффекты, предотвращающие возможность путешествия в другие Вселенные. Может быть, диаграммы Пенроуза - это такая идеализация, которая не описывает ничего, могущего существовать реально.

Диаграммы Крускала-Секереша и Пенроуза были созданы для того, чтобы полнее и нагляднее понять геометрию пространства-времени черной дыры. С помощью этих диаграмм удастся понять многие свойства черных дыр. Помимо того, эти диаграммы предсказывают кое-что новое. Например, на рис. 14.3 изображена диаграмма Крускала-Секереша для шварцшильдовской черной дыры. Все как полагается - вещество из нашей Вселенной падает сквозь горизонт событий внутрь и сталкивается с сингулярностью. Но предположим, что вблизи сингулярности прошлого уже были вещество и излучение. Тогда с течением времени эти вещество и излучение выйдут из-под горизонта событий, находящегося в прошлом, и перейдут в нашу Вселенную. Это и есть *белая дыра*, изображенная на рис. 14.4.

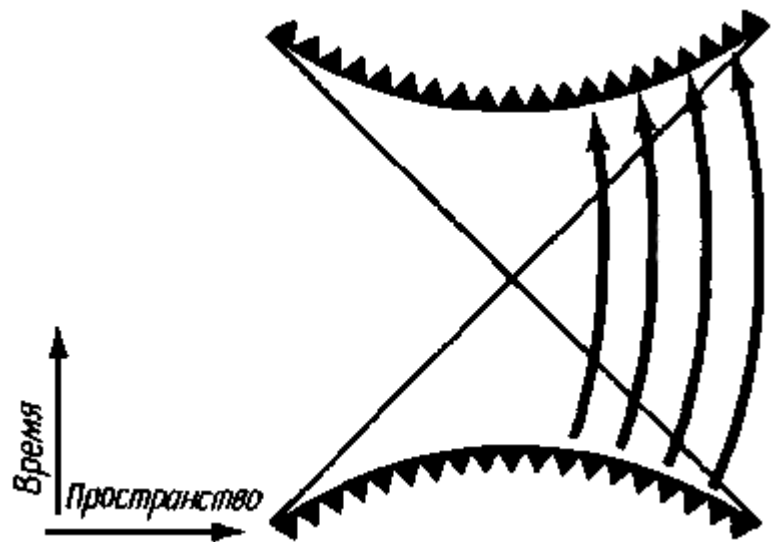
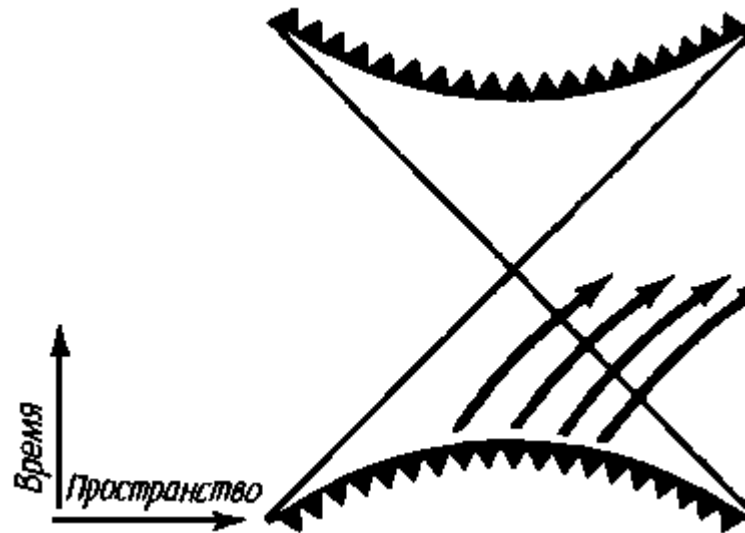
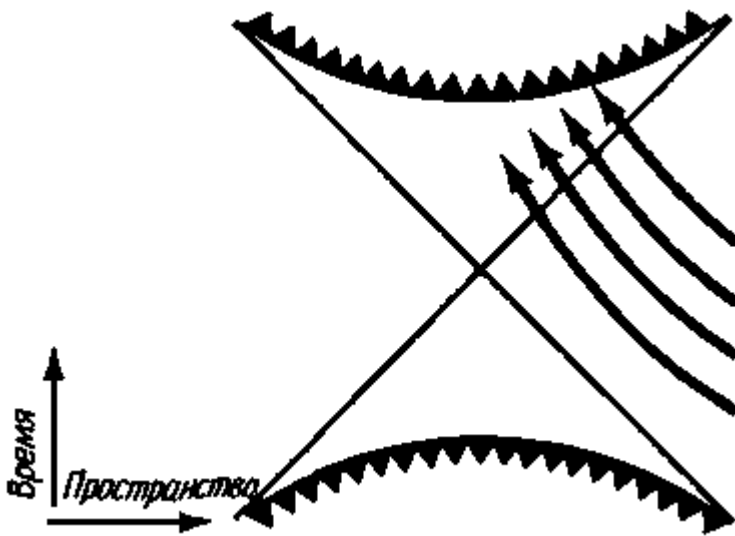


Рис. 14.5. *Серая дыра.* Аналогично рис. 14.4 вещество из области вблизи сингулярности прошлого может вырваться в нашу Вселенную, но лишь затем, чтобы снова упасть в дыру и встретиться с сингулярностью будущего.

Рис. 14.3. *Черная дыра.* В случае шварцшильдовской черной дыры все падающее на нее вещество и излучение проходят через горизонт событий и разрушаются, попадая в сингулярность.

Рис. 14.4. *Белая дыра.* Можно представить себе, как вещество и излучение в области пространства-времени вблизи сингулярности прошлого могут выйти в нашу Вселенную. Именно это и приводит к эффекту белой дыры.

Представим себе теперь вещество, выбрасываемое из области вблизи сингулярности прошлого, поднимающееся на некоторую высоту над черной дырой, а затем падающее опять на нее. Как показано на рис. 14.5, диаграмма Крускала-

Секереша в принципе допускает такой процесс, поскольку мировые линии вещества повсюду временноподобны. Объект с таким поведением именуется *серой дырой*.

Если представление о черной дыре появилось из исследования эволюции звезд, то идея о серой дыре или белой возникла чисто математически в связи с решением Шварцшильда. Но следует ли нам принять на веру возможность реального существования во Вселенной - наряду с машинами времени - белых дыр и серых дыр?

Представим себе умирающую массивную звезду, при коллапсе которой образуется черная дыра. Первоначально сингулярности не было; отсутствовал и горизонт событий. Поэтому ни сингулярности прошлого, ни горизонта событий в прошлом быть не могло. Имеются только горизонт событий в будущем и сингулярность будущего, так как черная дыра формируется в будущем-после смерти звезды. Иными словами, как показано на рис. 14.6, область, занятая веществом звезды, "вырезает" значительную часть диаграммы Крускала-Секереша. И только выше поверхности звезды пространство-время достаточно верно описывается решением Шварцшильда. Поэтому, если это решение применять с учетом реалистических ограничений, серых и белых дыр существовать не должно. У коллапсирующей звезды, превращающейся в шварцшильдовскую черную дыру, попросту нет сингулярности прошлого или горизонта событий в прошлом. Нет и "другой Вселенной".

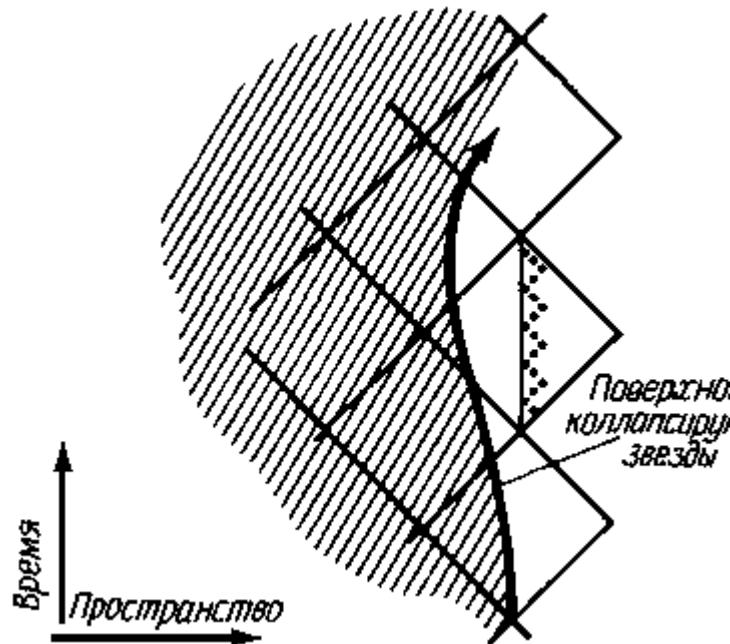
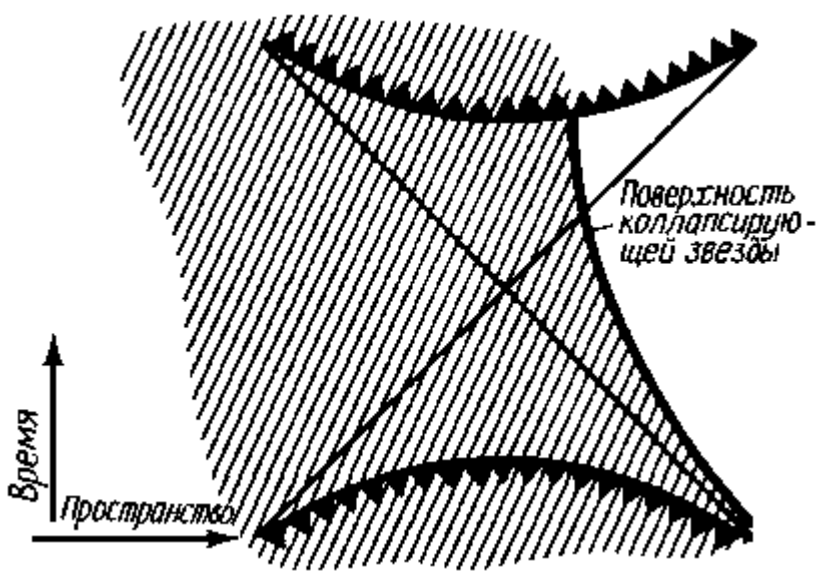


Рис. 14.6. *Образование черной дыры.* Когда умирающая звезда коллапсирует, образуя шварцшильдовскую черную дыру, большая часть диаграммы Крускала - Секереша "вырезается" веществом звезды.

Рис. 14.7. *Керровская белая дыра.* При образовании вращающейся черной дыры в нашей Вселенной могла бы появиться и белая дыра в другой Вселенной.

Но хотя анализ процессов, происходящих при умирании звезд, исключает возможность образования шварцшильдовских как серых, так и белых дыр, трудности еще не исчерпаны. Как уже неоднократно отмечалось, реальные звезды вращаются, а следовательно, из них должны возникать керровские черные дыры. Полная структура пространства-времени керровской черной дыры представлена на диаграмме Пенроуза, где сингулярности временноподобны. Если представить себе, что реальная звезда коллапсирует, образуя керровскую черную дыру, то из рассмотрения выпадут большие участки пространства-времени, которые находятся над поверхностью звезды. И все же, как видно из рис. 14.7, подобная звезда, дающая черную дыру в одной Вселенной, может проявляться как белая дыра в другой Вселенной. Вследствие временноподобного характера сингулярности звезда может, коллапсируя в одной Вселенной, расширяться в другую Вселенную. Поэтому представляется, что решение Керра (как и решение Райснера-Нордстрёма, также имеющее временноподобные сингулярности) допускает возможность существования белых дыр.

Представление о шварцшильдовских белых дырах было возрождено в середине 1960-х годов советским ученым И. Д. Новиковым. Хотя шварцшильдовские белые дыры не могут образоваться при смерти звезд, они могут быть, по мысли Новикова, связаны с рождением наблюдаемой нами Вселенной. Большинство астрономов считают, что начало Вселенной определилось чудовищным взрывом первичного бесконечно плотного состояния. Иначе говоря, вся Вселенная, наблюдаемая нами, должна была представлять собой одну гигантскую сингулярность, которая по неизвестной нам причине вдруг взорвалась. Допустим, что какие-то отдельные области не приняли участия в этом всеобщем расширении Вселенной, иными словами, по какой-то причине небольшой "кусочек" первичной сингулярности сумел сохраниться, не расширяясь, в течение очень длительного времени. Когда же подобный "отсталый элемент" начал, наконец, расширяться, он должен проявлять все свойства белой дыры. Такой отсталый элемент - в буквальном смысле кусочек сингулярности прошлого (Большого Взрыва), из которой в нашу Вселенную вторглись вещество и излучение. Мысль о том, что маленькие кусочки Большого Взрыва могли

сохраниться в течение длительного времени, привела Новикова к предположению о возможности существования шварцшильдовских белых дыр.

Проблема шварцшильдовских белых дыр рассматривалась Д. М. Эрдли в Калифорнийском технологическом институте в начале 1970-х годов. Эрдли понимал, что если от Большого Взрыва и сохранились "отсталые" элементы, то они должны выглядеть как кусочки сингулярности прошлого, а поэтому их должен окружать горизонт событий в прошлом (рис. 14.8).

Но что нам известно о горизонте событий? В обычных черных дырах горизонт событий соответствует остановке времени с точки зрения удаленного наблюдателя. Для такого наблюдателя свет, приходящий из окрестностей горизонта событий, испытывает сильнейшее красное смещение. Грубо говоря, свет из окрестностей горизонта событий затрачивает очень много энергии, выбираясь из области сильного гравитационного поля, окружающего обычную черную дыру. Обратное, если свет падает в черную дыру, он должен приобретать много энергии. Падающий внутрь дыры свет должен испытывать сильное фиолетовое смещение.

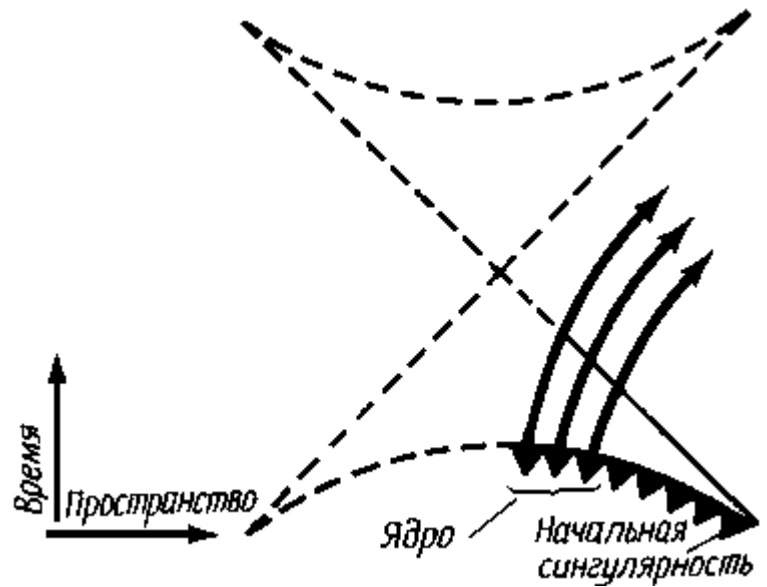


Рис. 14.8. "Спящий зародыш". Если "кусочек" Большого Взрыва не стал расширяться вместе со всей Вселенной, то он мог бы проявить себя позднее в виде шварцшильдовской белой дыры.

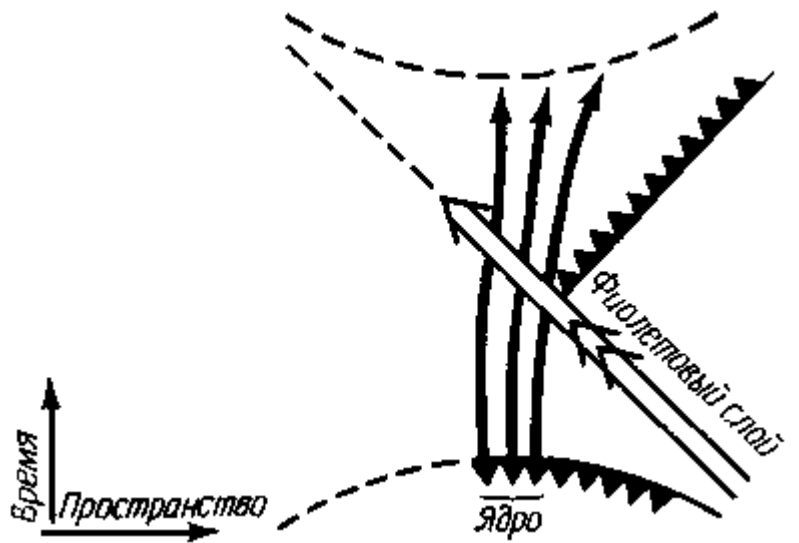


Рис. 14.9. Смерть белой дыры. Если бы могла существовать потенциальная белая дыра - "спящий зародыш", оставшийся от Большого Взрыва, - то она собрала бы на себе столько света, что образовалась бы черная дыра. Так потенциальная белая дыра превратилась бы за очень короткое время в черную дыру.

Представим себе на мгновение очень ранний этап эволюции Вселенной. Если Большой Взрыв действительно имел место, то Вселенная первоначально должна быть чрезвычайно горячей. При чудовищных температурах в триллионы градусов Вселенная должна была заполняться мощнейшим излучением. Если от Большого Взрыва остались "спящие зародыши", то такое излучение (а оно уже было очень

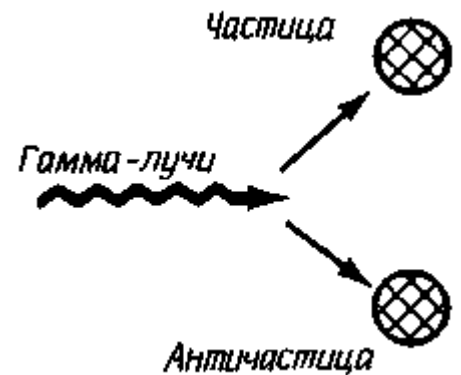
сильным) должно подвергаться сильнейшему фиолетовому смещению при падении на горизонт

событий, окружающий эти зародыши. Вокруг каждого "спящего зародыша" накапливалось грандиозное количество крайне мощного излучения. Иначе говоря, на диаграмме Пенроуза свет, идущий от J^- , собирается вблизи горизонта событий прошлого, образуя фиолетовый слой. Через очень короткое время в фиолетовом слое собирается так много света, что его энергия (и связанная с ней масса) сама начинает сильно искривлять пространство-время. Согласно расчетам Эрдли, свет, собирающийся вокруг "спящих зародышей", настолько сильно искривляет пространство-время, что *вокруг потенциальной белой дыры образуется черная дыра*. Как показано на рис. 14.9, при этом образуются горизонт событий в будущем и сингулярность. Такое превращение потенциальной белой дыры в черную дыру происходит примерно за $1/1000$ с. Значит, если какие-либо "спящие зародыши" и существовали, они должны были превратиться в черные дыры вскоре после рождения нашей Вселенной.

Расчеты Эрдли надежно "закрыли" возможность существования в природе шварцшильдовских белых дыр. Но что можно сказать о белых дырах Райснера-Нордстрёма или о керровских белых дырах? Хотя детальные расчеты еще не проделаны, соображения Эрдли здесь также остаются в силе. Чтобы могла появиться одна из таких более сложных белых дыр, должно существовать и несколько внутренних и внешних горизонтов событий, через которые вещество может переходить из одной Вселенной в другую, следующую. При анализе диаграммы Пенроуза для заряженной или вращающейся черной дыры нетрудно видеть, что горизонт событий в будущем для одной Вселенной является одновременно горизонтом событий в прошлом для другой Вселенной. Горизонт событий, сквозь который вещество "проваливается" в черную дыру в одной Вселенной, - это одновременно и горизонт событий, через который вещество извергается из черной дыры в следующую Вселенную. Значит, если существуют белые дыры Райснера-Нордстрёма или Керра, то у них *должны* быть горизонты событий в прошлом. А если белая дыра в какой-то Вселенной обладает горизонтом событий в прошлом, то с самого рождения этой Вселенной вблизи горизонта будет собираться свет. Такой горизонт *должен* породить фиолетовый слой. В согласии с

доводами Эрдли, света должно собраться столько, что скопившаяся в фиолетовом слое энергия сделает горизонт событий неустойчивым. В результате поверх потенциальной белой дыры сформируется черная дыра, а получившаяся сингулярность поглотит все окружающее! Хотя детальные расчеты еще ждут своего исполнителя, представляется вполне разумным предположение, что в диаграмме Пенроуза для *реальной* заряженной или вращающейся черной дыры образуется *пространственноподобная* сингулярность, которая отрежет все Вселенные будущего. Вопрос только в том, насколько быстро этой произойдет. Ответить на него можно, если знать, насколько быстро в фиолетовом слое вдоль горизонта событий, открытого в бесконечность J^- некоторой конкретной Вселенной, скапливается свет. Если те физики, которым по душе мысль о белых дырах, попробуют утверждать, что вызванная фиолетовым слоем неизбежная неустойчивость образуется медленно, то им придется иметь дело с трудностью совершенно нового свойства, касающейся вещества и антивещества.

Наука уже в течение многих лет знает о существовании антивещества. Впервые оно было открыто в ливнях космических лучей, а теперь античастицы всех видов регулярно получают при лабораторных экспериментах по ядерной физике. Физикам-ядерщикам проще всего создать вещество и антивещество с помощью гамма-лучей высокой энергии. На рис. 14.10 показано, как в определенных



условиях гамма-квант может самопроизвольно превратиться в частицу и античастицу вещества. Этот процесс возможен, если гамма-квант обладает достаточно большой энергией - большей, чем энергия (в том числе связанная с массой) рожденных частиц. В понятии антивеществ нет ничего таинственного. В подобном процессе *рождения пар* всегда в одинаковых количествах возникают частицы и античастицы.

Рис. 14.10. рождение пары. Гамма-лучи высокой энергии способны порождать пары частиц и античастиц (например, электрон и позитрон или протон и антипротон). Вещество и антивещество всегда возникают в одинаковых количествах.

Изучая рождение пар, физики-теоретики обнаружили, что лишенное частиц пространство - *вакуум* - очень удобно представлять себе заполненным воображаемыми, или *виртуальными*, парами частиц. Например, точку в пустом

пространстве можно представить в виде виртуального электрона, "сидящего" на воображаемом позитроне. Другую точку можно мыслить в виде воображаемого протона, "сидящего" на воображаемом антипротоне. В каждом подобном случае влияние виртуальной частицы полностью компенсируется влиянием виртуальной античастицы. Однако, когда падающий извне мощный гамма-квант соударяется с виртуальной парой, эти воображаемые частицы могут поглотить из него столько энергии, что масса-энергия излучения перейдет в массу-энергию вещества согласно знаменитой формуле $E=mc^2$, и эти частицы появляются в реальном мире. Поэтому процесс рождения пар можно понимать как поглощение виртуальными парами частиц энергии, которая их превращает в реальные. Представление о том, что пустое пространство состоит из виртуальных пар, способных стать реальными, оказалось весьма полезным в ядерной физике.

Задумайтесь на минуту о том, что происходит вблизи пространственно-временной сингулярности в черной дыре. В сингулярности искривление пространства-времени бесконечно сильно, а это приводит к бесконечно сильным приливным напряжениям. Все, что падает на сингулярность, разрывается на части этими непреодолимыми напряжениями: в непосредственной близости от сингулярности приливные силы чудовищно велики. Вблизи сингулярности всегда можно отыскать такую точку, в которой приливные силы достаточно велики, чтобы разрушить любой наперед взятый объект. Рассмотрим, в частности, пустое пространство (вакуум) на расстоянии в доли миллиметра вблизи сингулярности. Хотя это пространство и пустое, его можно представить себе как содержащее виртуальные пары частиц и античастиц. Совсем рядом с сингулярностью приливные силы окажутся настолько сильными, что *оторвут друг от друга частицы и античастицы в виртуальных парах*. Тяготение окажется настолько сильным, что виртуальные электроны оторвутся от виртуальных позитронов, а виртуальные протоны - от виртуальных антипротонов. Расчеты показывают, что процесс разрывания виртуальных пар оказывается настолько мощным, что каждая виртуальная частица получает энергию, достаточную для того, чтобы превратиться в реальную! Приливные силы бесконечно сильно искривленного пространства-времени вблизи сингулярности буквально *рвут на части пространство-время*, порождая при этом вещество и антивещество. Таким образом, из сингулярности извергаются потоки вещества и антивещества! Подобно тому как

мощный гамма-квант порождает частицы и античастицы, мощное гравитационное поле вблизи сингулярности тоже порождает частицы и античастицы.

Если сингулярность пространственноподобна и находится в будущем, то частицам и античастицам некуда из нее деваться. Однако как показано на рис. 14.11, если сингулярность временноподобна или находится в прошлом, то вещество и антивещество *могут* уйти от нее: существуют такие временноподобные мировые линии, вдоль которых *ускользают* рожденные частицы и античастицы.

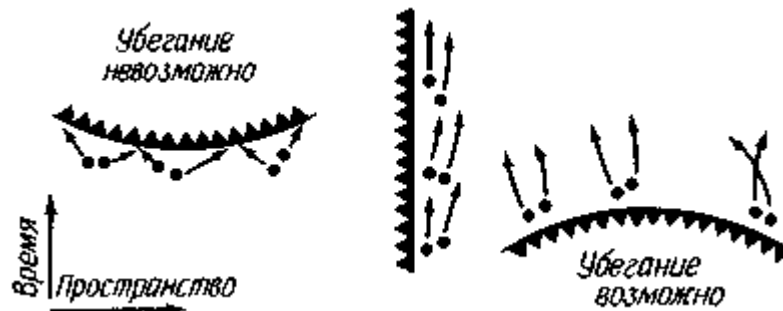


Рис. 14.11. Рождение пар вблизи сингулярности. Чудовищные приливные силы вблизи сингулярности буквально разрывают на части пространство-время, приводя тем самым к рождению пар частиц и античастиц. Возникающие пары могут уходить от сингулярности, если она временноподобна или если она пространственноподобна и находится в прошлом.

Предсказание этого замечательного явления, впервые сделанное в блестящих теоретических работах Стивена У. Хоукинга, приводит к ряду важных выводов. Если в шварцшильдовской дыре могла возникнуть сингулярность прошлого, то она вскоре "разорвала" бы около себя пространство-время и заполнила дыру веществом и антивеществом. В дырах Райснера-Нордстрёма и Керра, где сингулярности временноподобны, порождаемые ими пары также смогли бы уйти от сингулярности. Такой процесс рождения пар поэтому быстро заполнил бы диаграмму Пенроуза для заряженных и вращающихся дыр.

Итак, придется оставить надежды! Чтобы путешествия в другие Вселенные оказались возможными, сингулярности дыры должны быть временноподобными. Чтобы существовали белые дыры, сингулярности должны находиться где-то в прошлом. Во всех подобных случаях такие сингулярности приведут к рождению огромного количества вещества и антивещества, которое быстро заполнит дыры, тем самым исключая возможность всех чересчур необычных явлений. Неустойчивость фиолетовых слоев и рождение пар вблизи сингулярности устраняют большую часть

деталей картины на диаграмме Пенроуза. Хотя еще не было проделано подробных расчетов, диаграмма Пенроуза для реальной вращающейся или заряженной черной дыры, вероятно, выглядит так, как на рис. 14.12.

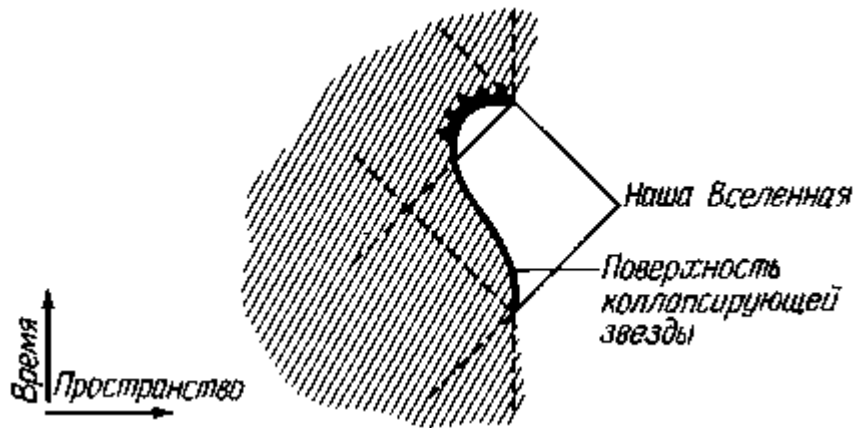


Рис. 14.12. Диаграмма Пенроуза для реальной черной дыры. Рождение пар вблизи сингулярности и неустойчивость голубых слоев совместно приводят к отбрасыванию большей части идеализированной диаграммы Пенроуза. По-видимому, образуется лишь сингулярность будущего, которая в общем пространственноподобна, что исключает возможность машины времени или путешествия в другие Вселенные.

Изложенные теоретические результаты середины 1970-х годов могут быть восприняты как жестокое разочарование каждым; кто любит пофантазировать о машинах времени и космических путешествиях в другие Вселенные. Но часто научное открытие, опрокидывающее один круг идей, дает начало совершенно новым представлениям. И действительно, как мы увидим в заключительной главе, процесс рождения пар в сильных гравитационных полях приводит к тому, что некоторые типы черных дыр должны испаряться и взрываться!

Словарь терминов

Абберация (света звезд). Явление, при котором вследствие движения наблюдателя изображение звезды смещается в сторону движения.

Абсолютная звездная величина. Мера истинной яркости звезды. Согласно определению, это та видимая звездная величина, которую имела бы данная звезда с расстояния 10 парсек.

Абсолютно удаленное. Область пространства-времени, абсолютно недостижимая для материальных объектов из вершины светового конуса.

Абсолютный нуль температуры. Температура 0 градусов Кельвина (0 K), т. е. примерно минус 273°C. Самая низкая из возможных температур.

Азимутальный угол. Здесь угол, отсчитываемый от оси вращения тела черной дыры.

Аккреционный диск. Диск вещества, вращающийся вокруг черной дыры.

Аккреция. Процесс, при котором массивный объект "засасывает" окружающее вещество вследствие своего тяготения.

Антигравитация. Такое гравитационное поле, которое отталкивает вещество и Световые лучи.

Астероид. Малая планета; большое число астероидов обращается вокруг Солнца, обычно в промежутке между орбитами Марса и Юпитера.

Атом. Наименьшая частица химического элемента, которая еще обладает свойствами, характерными для этого элемента.

Афелий. Точка орбиты тела, обращающегося вокруг Солнца, которая находится на наибольшем удалении от Солнца (для орбиты тела, обращающегося вокруг Земли, аналогичная точка называется **апогеем**).

Белая дыра. Область мощного гравитационного поля, включающая сингулярность и горизонт событий, откуда выбрасываются вещество и энергия. Соответствует черной дыре, обращенной во времени.

Белый карлик. Очень маленькая и горячая звезда, приблизившаяся к концу своей эволюции.

Большой Взрыв. Первичный взрыв, из которого, согласно современным представлениям, возникла наблюдаемая Вселенная.

Будущее. Та область пространства-времени, куда идут мировые линии материальных объектов.

Взрыв черной дыры. Катастрофический завершающий этап испарения первичной черной дыры.

Виртуальная пара. Пара частица-античастица в вакууме, которая еще не превратилась в реальные частицу-античастицу.

Внутренняя точка Лагранжа. В двойной системе звезд - точка между двумя частями предельной кривой (поверхности) Роша.

Возмущение. Малое отклонение от нормального состояния, вызванное внешними причинами.

Волновое уравнение. Уравнение, описывающее процесс распространения волны.

Волновой пакет. Квантовомеханическая модель частицы как сгустка волн.

Временноподобная бесконечность будущего (\mathcal{I}^+). Та область пространства-времени в очень далеком будущем, куда идут мировые линии частиц вещества.

Временноподобная бесконечность прошлого (\mathcal{I}^-). Та область пространства-времени в удаленном прошлом, откуда пришли все мировые линии частиц вещества.

Временноподобная мировая линия. Мировая линия ("траектория") в пространстве-времени, образующая с осью времени угол менее 45° .

Вселенная с антигравитацией. Вселенная, в которой гравитация носит характер отталкивания, - Вселенная по "ту" сторону кольцевой сингулярности керровской черной дыры.

Вторичные космические лучи. Вторичные частицы, возникшие при взаимодействии между частицами первичных космических лучей, пришедшими из космоса, и ядрами атомов атмосферы Земли.

Гамма-лучи. Фотоны с энергией, превышающей энергию фотонов рентгеновских лучей. Это самая высокоэнергичная форма электромагнитного излучения.

Геодезическая. Кратчайший путь (мировая линия) между двумя событиями в искривленном пространстве-времени. В плоском пространстве-времени геодезическая - это прямая линия.

Гипербола. Одно из конических сечений - кривая, которую можно получить, рассекая конус плоскостью.

Гиперповерхность. Двумерный срез (чаще трехмерный срез) через четырехмерное пространство-время.

Гиперсфера. "Сфера" в гипотетическом многомерном пространстве.

Главная последовательность. Совокупность звезд на диаграмме Герцшпрунга - Рассела, основным источником энергии которых является термоядерное "сжигание" водорода.

Голая сингулярность. Пространственно-временная сингулярность, не окруженная горизонтом событий.

Горизонт событий. Совокупность тех мест в пространстве-времени, где, с точки зрения удаленного наблюдателя, время останавливается. Горизонт событий является поверхностью, окружающей черную дыру.

Гравитационная антенна. Устройство, предназначенное для обнаружения гравитационных волн.

Гравитационная волна. "Рябь" пространства-времени, бегущая со скоростью света.

Гравитационная линза. Искажение изображения объекта или образование его множественных изображений под действием сильного гравитационного поля.

Гравитационное красное смещение. Эффект замедления времени в гравитационном поле, предсказываемый общей теорией относительности.

Гравитация. Явление притяжения материальных объектов друг другом.

Давление вырожденного нейтронного газа. Давление нейтронов, которое возникает в силу принципа запрета Паули; оно противостоит усиливающемуся сжатию вещества звезды на стадии нейтронной звезды.

Давление вырожденного электронного газа. Давление электронов, которое возникает в силу принципа запрета Паули; оно противостоит усиливающемуся сжатию вещества звезды на стадии белого карлика.

Двойная звезда. Система двух звезд, обращающихся вокруг общего центра масс.

Деферент. В геоцентрической системе Птолемея - окружность, по которой движутся эпициклы.

Диаграмма вложения. Изображение пространственноподобной гиперповерхности, представляющей собой срез четырехмерного искривленного пространства-времени.

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела. Диаграмма, выражающая связь между светимостями и температурами звезд.

Диаграмма Крускала - Секереша. Диаграмма пространства-времени шварцшильдовской черной дыры, описывающая *всю* геометрию дыры.

Диаграмма Пенроуза. Конформная карта, охватывающая *все* пространство-время.

Длина волны. Расстояние между двумя последовательными горбами (или впадинами) волны.

Доплеровское смещение. Смещение линий спектра **вследствие** доплер-эффекта.

Доплер-эффект. Явление, состоящее в том, что длины волн любого излучения изменяют свое значение вследствие относительного движения источника и наблюдателя.

Закон Хаббла. Связь между величиной красного смещения для далеких галактик и расстоянием до них.

Законы Кеплера. Сформулированные Иоганном Кеплером три закона, которые описывают движение планет вокруг Солнца.

Законы Ньютона. Законы механики и тяготения, сформулированные Исааком Ньютоном.

Замедление времени. Явление, состоящее в том, что с точки зрения покоящегося наблюдателя часы движущегося наблюдателя отстают.

Затмение. Явление, при котором весь свет от одного тела или часть его заслоняется другим телом, проходящим между первым телом и наблюдателем. Пример - солнечные затмения.

Затменная двойная (звезда). Двойная звезда, орбиты компонентов которой расположены так, что, если смотреть с Земли, каждая из двух звезд поочередно проходит перед другой.

Звезда главной последовательности. Звезда, которая изображается на диаграмме Герцшпрунга- Рассела точкой, находящейся на главной последовательности.

Звездная величина видимая. Мера наблюдаемого блеска звезды на небе.

Звездный ветер. Поток протонов и электронов, постоянно испускаемых звездой (например, Солнцем) и обладающих большими скоростями.

Изотропия. Свойство обладать одинаковыми характеристиками во всех направлениях.

Инвариант. Величина, значение которой одинаково для всех наблюдателей независимо от их состояния движения.

Интервал. "Расстояние" в пространстве-времени между двумя событиями.

Интерференционные полосы. Темные и светлые полосы, возникающие при взаимном уничтожении или усилении волн в двух световых пучках, когда они смешиваются.

Интерферометр Майкельсона. Прибор, изобретенный Альбертом А. Майкельсоном и первоначально предназначавшийся для наблюдения движения Земли относительно мирового "эфира".

Испарение черной дыры. Процесс, в ходе которого черная дыра испускает частицы и излучение.

Каталог Мессье. Каталог незвездных объектов, составленный Шарлем Мессье в 1787 г.

Квазар. Звездopodobные объекты, находящиеся, как полагают, на огромном расстоянии от нашей Галактики; часто являются мощными источниками радиоизлучения.

Квантовая механика. Область физики, изучающая свойства и поведение атомов и субатомных частиц.

Керровская черная дыра. Черная дыра, обладающая массой и моментом количества движения, - электрически нейтральная вращающаяся черная дыра.

Коллапс. Явление катастрофического сжатия тела под действием его собственного гравитационного поля.

Кольцевая сингулярность. Сингулярность в керровской черной дыре.

Комета. Небольшой объект, состоящий из пыли, газа и льда и обычно движущийся по сильно вытянутой эллиптической (или даже параболической или гиперболической) орбите вокруг Солнца.

Конические сечения. Семейство кривых, которые можно получить как линии пересечения поверхности конуса и плоскости, когда последняя образует разные углы с осью конуса. Частные случаи конических сечений; окружность, эллипс, парабола, гипербола, прямая.

Конус убегания. Воображаемый конус у поверхности коллапсирующей звезды, с помощью которого можно определить, какие лучи света способны уйти от звезды на бесконечность.

Конформная карта. Диаграмма пространства-времени, построенная по определенному математическому рецепту таким образом, чтобы охватывать все области пространства-времени сразу.

Конформное отображение. Метод построения конформных карт пространства-времени.

Координатное время. Время, которое измеряет наблюдатель, находящийся в плоском пространстве-времени далеко от всех источников тяготения (иногда определяется просто как переменная, описывающая течение времени, но в остальном совершенно произвольная).

Космические лучи. Приходящие на Землю из космоса с очень большой скоростью частицы (в основном протоны и электроны).

Космологическая модель Большого Взрыва. Космологическая модель Вселенной, в основу которой положено предположение о первичном взрыве как начале существования наблюдаемой Вселенной.

Красное смещение. Увеличение длины волны электромагнитного излучения при движении источника излучения от наблюдателя.

Красный гигант. Очень большая по размерам звезда с низкой (~ 3000 К) температурой поверхности.

Массивная черная дыра. Черная дыра с массой примерно от 100 до 1000 масс Солнца.

Машина времени. Гипотетическое устройство, с помощью которого можно путешествовать в далекое будущее или в прошлое.

Маятниковая круговая орбита. Разновидность круговой орбиты для света, характерная для отрицательного пространства керровской черной дыры.

Механизм Пенроуза. Способ извлечения энергии из вращающейся черной дыры.

Миксмастер-Вселенная. Теоретическая модель Вселенной, испытывающая попеременно сильное сжатие и расширение во всевозможных направлениях (что приводит к перемешиванию ее содержимого).

Мировая линия. "Траектория" объекта в пространстве-времени.

Модель звезды. Результат теоретического расчета физических условий внутри звезды.

Момент количества движения. Мера количества движения вращающегося тела; для материальной точки равен произведению ее массы на линейную скорость и на расстояние от оси вращения.

Нейтрон. Субатомная частица, у которой нет электрического заряда, а масса приблизительно равна массе протона.

Нейтронная звезда. Сильно сжатая звезда, которую поддерживает в равновесии давление вырожденного нейтронного газа. Состоит в основном из нейтронов.

Неправильная галактика. Галактика несимметричной формы.

Новая звезда. Звезда, проходящая стадию резкого выброса вещества и временно увеличившая свою светимость в сотни или тысячи раз.

Общая теория относительности. Теория гравитации, выражающая тяготение через геометрию пространства-времени.

Оптическая двойная система. Двойная звезда, оба компонента которой поддаются наблюдению.

Опыт Майкельсона-Морли. Опыт, впервые выполненный в 1888 г. Альбертом А. Майкельсоном и Эдвардом У. Морли и показавший, что "эфира" в действительности не существует.

Орбита. Траектория тела, обращающегося вокруг другого тела или вокруг некоторой точки.

Отрицательное пространство. Область пространства "по ту сторону" кольцевой сингулярности керровской черной дыры.

Парабола. Одно из конических сечений - кривая, которая получается, если пересечь конус плоскостью, параллельной одной из образующих конуса (точнее, параллельной какой-либо из плоскостей, касательных к конусу).

Парадокс близнецов. Кажущийся парадокс, связанный с представлением, что вследствие эффекта замедления времени два релятивистских путешественника, когда-то расставшиеся, а затем встретившиеся вновь, должны утверждать, что каждый из них провел в путешествии больше времени, чем другой.

Параллакс. Кажущийся сдвиг объекта при движении наблюдателя.

Параллакс звезды. Кажущийся сдвиг достаточно близкой звезды при движении Земли вокруг Солнца (вследствие наблюдения с разных концов диаметра земной орбиты).

Парсек. Единица длины, равная 3.26 светового года. Параллакс звезды, которая находилась бы на расстоянии 1 пк от Земли, равнялся бы 1".

Первичная черная дыра. Очень маленькая черная дыра (с массой менее одной массы Солнца), которая могла бы образоваться в период Большого Взрыва.

Первичные космические лучи. Частицы космических лучей, приходящие извне земной атмосферы (в противоположность вторичным космическим лучам, частицы которых образуются при столкновениях первичных космических лучей с молекулами газов атмосферы Земли).

Первичный огненный шар. Чрезвычайно горячий газ (состоящий из элементарных частиц и излучения), из которого, как полагают, состояла вся наблюдаемая Вселенная сразу после Большого Взрыва.

Переменная звезда. Звезда, светимость которой более или менее периодически меняется со временем.

Перенос массы. Процесс, при котором масса перетекает между компонентами двойной звезды.

Перигелий. Наиболее близкая к Солнцу точка орбиты тела, обращающегося вокруг Солнца (при обращении вокруг Земли аналогичная точка называется **перигеем**).

Планетарная туманность. Газовая оболочка, отделившаяся от звезды, когда она приближается к концу своего жизненного цикла.

Позитрон. Антиэлектрон; частица, аналогичная электрону, только с зарядом противоположного (положительного) знака.

Потенциальный барьер. Область пространства, в которую проникновению частиц препятствуют действующие там силы.

Предел статичности. Поверхность (окружающая черную дыру), внутри которой невозможно оставаться в состоянии покоя.

Предел Чандрасекара. Верхний предел величины массы белого карлика, равный примерно 1,5 массы Солнца.

Предельная керровская дыра. Электрически нейтральная вращающаяся черная дыра, для которой $M = a$.

Предельная поверхность Роша. Воображаемая поверхность (при виде сбоку имеет форму восьмерки), которая окружает обе звезды в двойной системе и указывает эффективные границы гравитационного воздействия каждой из них.

Предельная черная дыра Райснера-Нордстрема. Электрически заряженная невращающаяся черная дыра, для которой $M = |Q|$.

Преобразования Лоренца. Система соотношений в частной теории относительности, связывающих результаты измерений, производимых двумя наблюдателями, которые движутся относительно друг друга. Обычно речь идет об измерениях времени и расстояния, но иногда говорят о массе и т.д.

Принцип беспорядка. Представление о том, что сингулярность пространства-времени совершенно беспорядочно порождает вещество и энергию.

Принцип запрета Паули. Физический закон, согласно которому две одинаковые частицы (скажем, электроны или нейтроны) с одними и теми же значениями спина и скорости не могут одновременно находиться в одном и том же месте.

Принцип ковариантности. Утверждение, что большинство фундаментальных законов физики должно формулироваться независимо от состояния движения наблюдателя.

Принцип причинности. Утверждение, что следствия должны происходить *после* своих причин, а не *до* них.

Принцип эквивалентности. Представление о том, что в малых областях пространства-времени тяготение невозможно отличить от ускорения. Формулируется также как утверждение о равенстве инертной и гравитационной масс.

Пространственноподобная бесконечность (\mathcal{P}). Та очень удаленная область пространства-времени, в которую идут только пространственноподобные мировые линии.

Пространственноподобная мировая линия. "Траектория" в пространстве-времени, наклоненная по отношению к оси времени на угол, превышающий 45° .

Пространство-время. Непрерывное четырехмерное многообразие (континуум), в котором три измерения пространственные, а четвертое - временное.

Протон. Тяжелая субатомная частица, несущая положительный электрический заряд, - одна из двух главных составных частей атомного ядра. Протон-ядро атома обычного ("легкого") водорода.

Прошлое. Та область пространства-времени, откуда приходят мировые линии всех материальных объектов.

Пульсар. Импульсный источник космического радиоизлучения (разновидность нейтронной звезды).

Радиотелескоп. Инструмент, предназначенный для приема радиоволн, приходящих от космических источников.

Решение Керра. Решение уравнений гравитационного поля в общей теории относительности, описывающее электрически нейтральную вращающуюся черную дыру.

Решение Керра-Ньюмэна. Решение уравнений гравитационного и электромагнитного полей в общей теории относительности, описывающее заряженную вращающуюся черную дыру.

Решение Райснера-Нордстрема. Решение уравнений гравитационного и электромагнитного полей в общей теории относительности, описывающее невращающуюся заряженную черную дыру.

Решение Шварцшильда. Решение уравнений гравитационного поля в общей теории относительности, описывающее невращающуюся электрически нейтральную черную дыру.

Рождение пар. Процесс, при котором порождаются пары частиц и античастиц.

Сверхизлучательное рассеяние. Явление усиления света, проходящего вблизи вращающейся черной дыры.

Сверхмассивная черная дыра. Черная дыра, масса которой превышает 100000 масс Солнца.

Сверхновая. Грандиозный взрыв звезды, который иногда происходит вблизи конца эволюции очень массивных звезд.

Свет. Электромагнитное излучение, видимое для глаз.

Световая бесконечность будущего (\mathcal{J}^+). Та область пространства-времени в очень далеком будущем, куда идут мировые линии всех лучей света.

Световая бесконечность прошлого (\mathcal{J}^-). Та область пространства-времени в удаленном прошлом, откуда приходят мировые линии лучей света.

Световой год. Расстояние, которое свет проходит в вакууме за один год (приблизительно десять триллионов (10^{13}) км).

Световой конус. Геометрическое место событий (точек пространства-времени), в которые может прийти свет, излученный в данном событии (вершине светового конуса), или из которых он может достичь этой вершины.

Светоподобная мировая линия. "Траектория" в пространстве-времени, имеющая наклон к оси времени, равный 45° , -мировая линия светового луча. Называется также **изотропной мировой линией**.

Серая дыра. Область сильного гравитационного поля, состоящая из сингулярности и горизонта событий, откуда вещество может на время выходить, чтобы снова упасть обратно.

Сингулярность. Место, где кривизна пространства-времени обращается в бесконечность (например, в центре черной дыры).

Синтез (термоядерный). Термоядерная реакция, приводящая к слиянию легких атомных ядер и образованию ядер более тяжелых элементов.

Система координат. Воображаемая сетка, которой пользуются для описания положения тел в пространстве и времени.

Собственная длина. Расстояние между двумя точками, измеренное наблюдателем, который покоится относительно этих точек.

Собственная масса. Масса тела, измеренная наблюдателем, который покоится относительно этого тела.

Собственное время. Время, измеренное по часам наблюдателя, свободно падающего в гравитационном поле (чаще: время, измеренное наблюдателем по часам, которые относительно него покоятся).

Событие. Точка в пространстве-времени: момент и место совершения мгновенного и точечного процессов.

Соотношение масса-светимость. Взаимосвязь между массой и светимостью звезд главной последовательности.

Солнечная система. Система, включающая Солнце и обращающиеся вокруг него планеты с их спутниками, малые планеты, кометы, метеорные тела и прочие объекты, движущиеся вокруг Солнца.

Солнечный ветер. Поток электронов и протонов с большими скоростями, постоянно испускаемых Солнцем.

Соотношение неопределенностей. Утверждение, что невозможно одновременно знать со сколь угодно большой точностью и положение, и скорость субатомных частиц.

Спектр. Разложение белого света на "цвета радуги" при прохождении через призму (или иное устройство).

Спектр электромагнитных волн. Совокупность всех видов электромагнитного излучения, начиная с очень коротковолновых гамма-лучей и кончая самыми длинными радиоволнами.

Спектрально-двойная (звезда). Система двух звезд, заключение о двойственном характере которой получено по периодическому смещению линий в спектре.

Спектральная линия. Тонкая яркая или темная линия на фоне сплошного спектра.

Специальная теория относительности (частная теория относительности). Ковариантная формулировка механики и электродинамики в плоском пространстве-времени.

Спиральная галактика. Уплотненная вращающаяся галактика с закрученными рукавами, исходящими из галактического ядра.

Спиральная галактика пересечения. Спиральная галактика, спиральные рукава которой начинаются на концах "перекладины", проходящей через ядро галактики.

Сплюснутые эллипсоидальные координаты. Система координат, удобная для описания геометрических свойств керровской черной дыры.

Тардион. Объект, всегда движущийся со скоростью, меньшей, чем скорость света (иногда называется **брадионом**).

Тахион. Гипотетический объект, который всегда движется со скоростью, большей, чем скорость света.

Тензор кривизны Римана. Тензор, содержащий подробную математическую информацию о геометрии пространства любого данного числа измерений.

Тензор Риччи. Тензор, построенный из компонентов тензора кривизны Римана и входящий в состав уравнений гравитационного поля в общей теории относительности.

Тензор Эйнштейна. Тензор, построенный из компонентов тензора Риччи и стоящий в левой части уравнений гравитационного поля в общей теории относительности (уравнения Эйнштейна).

Тензор электромагнитной напряженности. Математическая величина, полностью описывающая электромагнитное поле в четырехмерном пространстве-времени.

Тензор энергии-импульса. Тензор, содержащий подробную математическую информацию о распределении в пространстве и изменении во времени энергии, импульса, давлений и пр. Стоит в правой части уравнений гравитационного поля в общей теории относительности (в качестве источника гравитационного поля).

Тензорный анализ. Область математики, рассматривающая свойства тензоров и операции над ними.

Термоядерная реакция. Реакция превращения легких элементов в тяжелые, происходящая при столкновениях ядерных частиц на высоких энергиях.

Термоядерная энергия. Энергия, выделяющаяся при термоядерных реакциях.

Туманность. Облако межзвездного газа или пыли, испускающее свет (или наоборот, поглощающее свет расположенных за ним звезд).

Туннельный эффект. Квантовомеханический процесс, при котором частицы могут проходить через потенциальный барьер.

Тяготение. (Гравитация.) Явление притяжения друг друга материальными телами.

Увлечение инерциальных систем. Явление, состоящее в том, что пространство-время вокруг вращающегося тела вовлекается в его вращение (эффект Лензе-Тирринга).

Уравнения геодезической. Система уравнений, решения которых описывают кратчайшие пути (т.е. геодезические) между событиями в искривленном пространстве-времени.

Уравнения гравитационного поля. В общей теории относительности они называются также **уравнениями Эйнштейна**. Система уравнений, определяющая гравитационное поле (или кривизну пространства-времени) по распределению и движению материи.

Уравнения электромагнитного поля. Система четырех уравнений, описывающих источники и поведение электрического и магнитного полей.

Ускорение. Темп изменения скорости.

Фиолетовое смещение. Уменьшение длины волны электромагнитного излучения вследствие приближения источника к наблюдателю.

Фиолетовый слой. Область вблизи горизонта событий, где скапливается свет с сильным фиолетовым смещением.

Фотон. Квант - элементарная частица электромагнитного излучения (света).

Фотонная орбита. Круговая орбита луча света вокруг шварцшильдовской черной дыры.

Фотонная сфера. Сфера, образованная круговыми орбитами света вокруг шварцшильдовской черной дыры.

Частная теория относительности. (Специальная теория относительности.) Ковариантная формулировка механики и электродинамики в плоском пространстве-времени.

Черная дыра. Сильно искривленная область пространства-времени, включающая сингулярность, окруженную горизонтом событий.

Черная дыра Райснера-Нордстрема. Черная дыра, обладающая массой и электрическим зарядом; невращающаяся заряженная черная дыра.

Чернодырная бомба. Фантастическое взрывающееся устройство, работающее на принципе сверхизлучательного рассеяния света, запертого около керровской черной дыры.

Шварцшильдовская черная дыра. Черная дыра, обладающая только массой; не возвращающаяся электрически нейтральная черная дыра.

Шварцшильдовский радиус. Радиус горизонта событий, окружающего шварцшильдовскую черную дыру.

Эволюция звезд. Изменения, которые претерпевают размеры, светимость, структура и другие свойства звезд с течением времени.

Электромагнитное излучение. Излучение, состоящее из переменных электрического и магнитного полей и распространяющееся со скоростью света. Сюда входят радиоволны, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.

Электромагнитное поле. Область пространства, содержащая электрическое и магнитное поля.

Электрон. Отрицательно заряженная субатомная частица, обычно движущаяся в атоме вокруг ядра.

Эллипс. Коническое сечение; получается как замкнутая линия пересечения конуса плоскостью.

Эллиптическая галактика. Галактика, имеющая эллиптическую форму и совсем не обладающая спиральной структурой.

Эпицикл. Малый круг в орбите тела согласно геоцентрической системе Птолемея.

Эргосфера. Область, окружающая керровскую черную дыру и расположенная между пределом статичности и внешним горизонтом событий, где находиться в состоянии покоя невозможно.

"Эфир". Гипотетическая субстанция, постулировавшаяся физиками в XIX в., в которой должны были бы распространяться электромагнитные волны.

Эффект Лензе-Тирринга. Явление, состоящее в "увлечении" пространства-времени вращающимся телом: увлечение инерциальных систем.

Эффект Мессбауэра. Явление, известное в ядерной физике, благодаря которому ядра радиоактивных изотопов могут использоваться как чрезвычайно точные часы.

Эффект сокращения масштабов Лоренца-Фитцджералда. Явление, состоящее в том, что, с точки зрения неподвижного наблюдателя, измеряемые им расстояния параллельно направлению движения подвижного наблюдателя в системе этого последнего оказываются укороченными.

Ядро (атомное). Самая тяжелая часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, вокруг которой обращаются электроны.

Ядро (галактики). Концентрация звезд и, возможно, газа вблизи центра галактики.