

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.84(023)

«ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ» *)**Р. Пенроуз**

Когда массивная звезда коллапсирует до достаточно малых размеров, световые лучи уже не могут выйти за ее пределы. Вращающиеся «черные дыры» могут объяснить излучение гравитационных волн из центра галактики.

Примерно за пять миллиардов лет Солнце истратит в термоядерных реакциях настолько значительное количество водорода, что оно превратится в звезду того типа, который принято называть красным гигантом. Существующая теория предсказывает, что размеры Солнца увеличатся, причем так, что его диаметр станет равным двумстам пятидесяти современным диаметрам ($14 \cdot 10^5$ км). В этом процессе должны быть поглощены Меркурий, Венера и, возможно, даже Земля. Вещество Солнца будет иметь тогда плотность, равную одной десятой доли плотности воздуха. (В настоящее время средняя плотность Солнца составляет одну пятую часть плотности Земли).

По мере того как Солнце расходует имеющееся ядерное топливо все больше и больше (речь идет не только о водороде, но и о гелии и более тяжелых элементах), оно, разбухнув, перестает расширяться и переходит к сжатию, а его диаметр проходит через современное значение диаметра к диаметру, равному примерно одной сотой части современного. Грубо говоря, по своим размерам оно сравняется с Землей. Таким образом, оно превратится в белый карлик, и его сжатие приостановится. Электроны, входящие в состав его атомов, будут уже упакованы столь плотно, что вступит в игру один из законов квантовой механики, обеспечивающий появление достаточно мощного эффективного давления, предотвращающего дальнейшее сжатие. Закон квантовой механики, о котором идет речь, — это принцип исключения Паули, согласно которому два электрона не могут занимать одно и то же энергетическое состояние. К этому моменту плотность вещества Солнца станет чудовищной; мяч для пинг-понга, наполненный таким веществом, будет обладать массой, равной массе нескольких слонов. Все, что останется Солнцу — это постепенно охлаждаться до своего конечного «мертвого» состояния — «черного карлика».

*) Roger Penrose, Black Holes, Scientific American 226 (5), 38 (1972). Перевод В. А. Угарова.

Роджер Пенроуз является профессором математики в Бёркбек-колледже Лондонского университета, Великобритания.

На Земле не найдешь вещества, хотя бы отдаленно напоминающего по своей плотности плотность белого карлика. Тем не менее на небе обнаруживается большое количество белых карликов (и красных гигантов). Каждый из них представляет собой некоторую стадию эволюции нормальной звезды, такой, как Солнце. Более того, теория звездной эволюции прекрасно объясняет результаты астрономических наблюдений. Однако вовсе не все звезды следуют этой «нормальной» эволюционной последовательности. Когда Чандрасекхар в 1931 г. исследовал теоретически звездную массу, выше которой белый карлик уже не может оказывать противодействие дальнейшему гравитационному сжатию. Сила гравитации, направленная к центру звезды, будет даже превышать противодействующее ей давление, возникающее как следствие принципа Паули для электронов. Предельная масса, после которой начинается неотвратимое сжатие, не очень превышает массу Солнца; первоначальный результат, полученный Чандрасекхаром, дал для этой величины значение, равное 1,4 массы Солнца. Последующие вычисления дали еще меньшие значения. У многих известных звезд масса превышает полторы солнечной массы. Какая же судьба их ожидает?

Допустим, что масса какой-то звезды вдвое превышает массу Солнца. Подобно Солнцу, она будет расширяться до грандиозных размеров после того, как растратит большую часть своего исходного водородного топлива. Затем она начнет сжиматься. Такая звезда уже не имеет устойчивого положения равновесия, которое остановило бы ее в состоянии белого карлика. Поэтому вся звезда или основная ее часть будет коллапсировать, проходя размеры белого карлика. Благодаря чрезвычайно высоким температурам и плотностям, возникающим в этом процессе, звезда оказывается вовлеченной в процессы, которые ведут к катастрофическим взрывам. Такие взрывающиеся звезды, называемые Сверхновыми (последняя из них была описана Кеплером в 1604 г.), наблюдались как в нашей Галактике, так и в других галактиках. Сверхновая звезда в течение нескольких дней светит ярче, чем вся галактика. Возможно, около 90 % массы звезды при этом выбрасывается. Остается лишь сколлапсировавшееся ядро звезды в центре быстро расширяющегося облака газа (Крабовидная туманность как раз и представляет собой такое облако). Это ядро слишком мало и слишком сжато, чтобы образовать белый карлик; оно достигает равновесия только в виде нейтронной звезды.

Даже по сравнению с белым карликом нейтронная звезда чрезвычайно мала. Переход от белого карлика к нейтронной звезде еще более резок, чем переход от сотни к единице, от Солнца до белого карлика, и, возможно, даже более резок, чем переход от красных гигантов к Солнцу, приблизительно описываемый числами от 250 до 1. Радиус нейтронной звезды может составлять всего лишь около 10 км, что составляет около одной семисотой части радиуса белого карлика. Плотность вещества в нейтронной звезде может в 100 млн. раз превышать колоссальную плотность белого карлика. Мяч для пинг-понга, наполненный веществом нейтронной звезды, обладал бы массой большого астероида, например, такого, как Юнона (небольшая планета, имеющая 118 миль в поперечнике). Плотность нейтронной звезды вполне сопоставима с плотностью вещества, образующего нейтрон или протон; можно рассматривать нейтронную звезду как гигантское атомное ядро с тем единственным, но существенным отличием, что нейтронная звезда сдерживается скорее гравитационными силами, чем ядерными. Большинство электронов нейтронной звезды придано протонам, так что протоны стали нейтронами.

Теперь уже принцип исключения Паули распространяется на протоны и вызывает проявление эффективной силы, предотвращающей дальнейший коллапс.

Такая картина нейтронной звезды была теоретически предсказана Волковым, Оппенгеймером и Сербером в 1938—1939 гг. Многие-многие годы астрономы вообще сомневались в том, существуют ли нейтронные звезды. С 1967 г. ситуация в области астрономических наблюдений резко переменилась. Как раз в этом году были обнаружены первые пульсары. С этого момента бурно развивается теория пульсаров, и теперь уже надежно известно, что радио- и оптические импульсы, испускаемые пульсарами, черпают свою энергию и необыкновенно строгую периодичность от вращающейся нейтронной звезды. По крайней мере два пульсара расположены внутри остатков Сверхновой (один из них находится в Крабовидной туманности); это обстоятельство дает еще одно подтверждение предположению о том, что пульсары представляют собой нейтронные звезды.

В точности так же, как и в случае белых карликов, существует максимальная возможная масса, выше которой нейтронная звезда уже не в состоянии противостоять дальнейшему гравитационному сжатию. Пока есть некоторая неопределенность относительно точного значения этого верхнего предела массы. Значение, приведенное в оригинальной работе Волкова и Оппенгеймера, было около 0,7 солнечных масс. Более поздние расчеты подняли это значение вплоть до трех солнечных масс. Эти более высокие значения возникли при учете существования тяжелых субатомных частиц, называемых гиперонами, наряду с ранее известными протонами и нейтронами. Во всяком случае, предельное значение не может превышать несколько солнечных масс, а известно немало звезд, чья масса раз в пятьдесят превышает массу Солнца. Что в конце концов ждет их? Просто невероятно, чтобы такие звезды — в процессе ли последнего коллапса или на каких-то ранних стадиях — всегда сбрасывали столь большое количество своего вещества, чтобы оставшаяся масса оказывалась ниже того необходимого предела, обеспечивающего возникновение устойчивого белого карлика или нейтронной звезды. Какие другие формы конденсированного вещества могут еще существовать при плотностях даже более высоких, чем те фантастические значения плотности, которые существуют в нейтронных звездах?

Теория показывает, что, хотя более высокие плотности могут быть достигнуты, в дальнейшем не существует устойчивого положения равновесия. Гравитационные эффекты становятся настолько доминирующими, что подавляют любые другие действия. Ньютоновская теория тяготения делается уже непригодной; для рассмотрения этого случая мы и должны обратиться к общей теории относительности Эйнштейна. Но из этой теории вытекают такие вещи, по сравнению с которыми нейтронная звезда кажется просто пустячком. Новая картина, впервые развитая Оппенгеймером и Снайдером, получила уже особое наименование — «черная дыра».

«Черная дыра» представляет собой область пространства, в которую упала звезда (либо упала группа звезд или иных тел) и из которой не могут выйти ни свет, ни вещество и никакой сигнал вообще. Какое еще сжатие должно произойти с нейтронной звездой, чтобы она сократилась до размеров «черной дыры»? Рассмотрим объект, обладающий одной солнечной массой. Мы уже говорили о том, что диаметр Солнца больше диаметра нейтронной звезды примерно в 70 тыс. раз, а диаметр красного гиганта примерно в 20 млн. раз. Имея в виду столь существенные различия в раз-

мерах звездных объектов, довольно удивительно, что нейтронная звезда должна сжаться приблизительно всего лишь на одну треть своего диаметра, чтобы стать «черной дырой». Возможны также «черные дыры» большего размера, но они возникают уже в результате коллапса звезды или группы тел, если их конечная полная масса будет превышать массу Солнца. Линейные размеры «черной дыры» пропорциональны ее массе.

Общая теория относительности играет существенную роль в теории нейтронных звезд, даже до того как достигаются экстремальные условия, при которых возникают «черные дыры». Физические теории отлично справляются с описанием звезд, чрезвычайно различных по своим размерам и плотности. С этой точки зрения нет особых оснований сомневаться в законности небольшой экстраполяции теории в область существования «черных дыр». Однако такое предположение отнюдь не безупречно. Протя часть физической теории, на которую непосредственно опирается описание «черных дыр», а именно общую теорию относительности, нельзя сказать, что она играет незаменимую роль для наблюдательной астрономии. Вполне серьезно можно обсуждать возможность того, что общая теория относительности окажется неправильной. Проверка общей теории относительности наблюдениями и прямыми экспериментами была успешно осуществлена лишь в считанных случаях. Хотя никаких противоречий между теорией и наблюдениями до сих пор не обнаружено, все эти наблюдения не дали решающих доказательств в пользу общей теории относительности. Безусловно, место для альтернативных теорий гравитации пока существует.

И все же при этом следует сказать, что общая теория относительности — это отличная теория; почти наверняка можно сказать, что это наилучшая теория тяготения, которой мы обладаем. Более того, теория Бранса — Дикке — Иордана (скалярно-тензорная теория), которую следует рассматривать как наиболее серьезный конкурент общей теории относительности, приводит к той же самой картине «черных дыр», какая следует из теории Эйнштейна. Даже в ньютоновской теории тяготения можно обнаружить нечто похожее на «черную дыру». Уже в 1798 г. Лаплас предсказал из ньютоновской механики, что достаточно массивное тело, масса которого заключена в не слишком большом объеме, становится невидимым, потому что критическая скорость, необходимая малому телу на поверхности рассматриваемого большого тела, чтобы покинуть это тело, превышает скорость света. Следовательно, фотон, или световая частица, испускаемая с поверхности в радиальном направлении, упадет обратно на поверхность и не уйдет от тела, так что наблюдать ее вдали от тела просто невозможно. Слов нет, такое описание довольно сомнительно, но оно все же указывает, что с ситуацией, похожей на образование «черной дыры», мы сталкиваемся уже в теории тяготения Ньютона. Сделав все эти оговорки, в дальнейшем я ограничусь изложением всех вопросов, оставаясь полностью в рамках общей теории относительности.

Для начала рассмотрим, как представляют себе сейчас «черную дыру». «Черная дыра» характеризуется сферической поверхностью, радиус которой пропорционален массе «черной дыры». Эта поверхность называется «абсолютным горизонтом событий»; основным свойством этой поверхности является то, что любые сигналы, испущенные внутри нее, не могут выйти за ее пределы; в то же время сигналы, испущенные в любой точке снаружи от этой поверхности, уходят куда угодно. Размеры этой сферы для любой массы, т. е. радиус горизонта событий, подсчитывается следующим образом: удвоенное произведение массы на гравитационную

постоянную нужно разделить на квадрат скорости света,
 $2mG/c^2$.

Выполнив вычисления по этой формуле для Солнца, мы получим, что оно должно сколлапсировать до сферы радиуса около 3 км; абсолютный горизонт событий как раз и будет поверхностью этой сферы.

Тело, в результате коллапса которого возникает «черная дыра», будет продолжать свое сжатие и за горизонт событий. Гравитационное поле

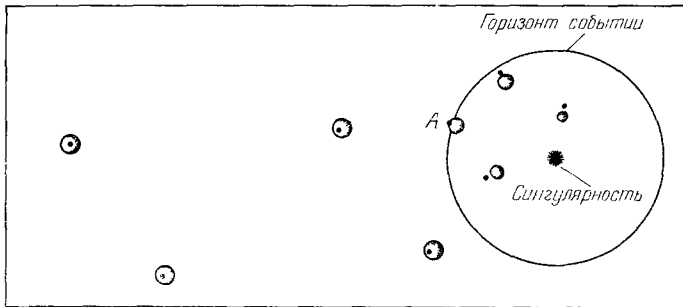


Рис. 1. Горизонт событий представляет собой границу «черной дыры».

Сигналы не могут выйти из-под горизонта событий, но могут распространяться по направлению к центру. В пространственном изображении световой сигнал, возбуждаемый в любой точке, в последующий момент изображается сферической поверхностью (маленькие кружки), называемой волновым фронтом. На больших расстояниях от «черной дыры» точка, изображающая источник, лежит в центре этой поверхности. На малых расстояниях от «черной дыры» сферическая поверхность смещается из-за сильного гравитационного притяжения «черной дыры». Сферический волновой фронт источника, расположенного точно на горизонте событий, внутренним образом касается горизонта событий, так что свет никогда не уходит из «черной дыры».

под горизонтом событий становится настолько сильным, что даже свет безоговорочно увлекается внутрь сферы, независимо от того, в каком направлении он испущен. Снаружи от горизонта событий свет свободно уходит от «черной дыры», если он испущен в нужном направлении. Но чем ближе точка, в которой испускается свет, к горизонту событий, тем больше волновой фронт испущенного сигнала смещается назад по направлению к центру «черной дыры». Можно интуитивно рассматривать это смещение как результат гравитационного притяжения, действующего на свет. Дело обстоит так, как если бы свету было легче распространяться в направлении гравитационного центра «черной дыры», чем в противоположном направлении.

Под горизонтом событий силы, действующие по направлению внутрь, становятся настолько мощными, что любое движение наружу становится вообще невозможным. На самом горизонте событий свет может служить отметкой времени, навсегда застыв на том же самом расстоянии от центра «черной дыры» (рис. 1).

Такое поведение характерно не только для света, но также и для любого сигнала или материального тела. Скорость света все еще остается предельной скоростью даже под горизонтом событий. Специальная теория относительности остается локально справедливой, хотя это вовсе не очевидно из приведенных рассуждений. Локальные системы отсчета, с помощью которых обычно рассматривается специальная теория относительности, сами быстро падают по направлению к гравитационному центру.

Пространственно-временное описание всей картины куда более полно, чем чисто пространственное описание, которым мы пользовались до сих пор. Пространственно-временное описание заставляет нас вместо одной

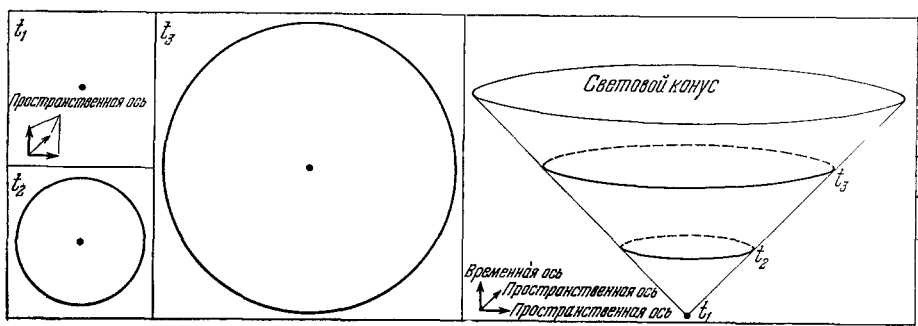


Рис. 2. Чисто пространственное изображение истории световой вспышки, произведенной в точке, представляет собой последовательные мгновенные фотографии сферической световой волны, распространяющейся в пространстве.

В левой части рисунка изображены последовательные положения сферы в моменты t_1 , t_2 , t_3 и т. д. Пространственно-временное изображение того же самого явления дается в виде конуса с вершиной в точке, где был испущен свет. Для того чтобы изобразить световой конус, одну из пространственных осей приходится опускать. Пространственные оси направлены по горизонтали, временная ось направлена по вертикали, причем направление течения времени выбрано снизу вверх. Круги, которые в проекции изображены в виде эллипсов, пересекают световой конус в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 , в которые сделаны мгновенные фотографии на пространственном изображении. Пространственно-временной световой конус изображает на одном чертеже всю историю распространяющегося светового сигнала, избавляя от необходимости производить многочисленные мгновенные фотографии изменяющейся ситуации.

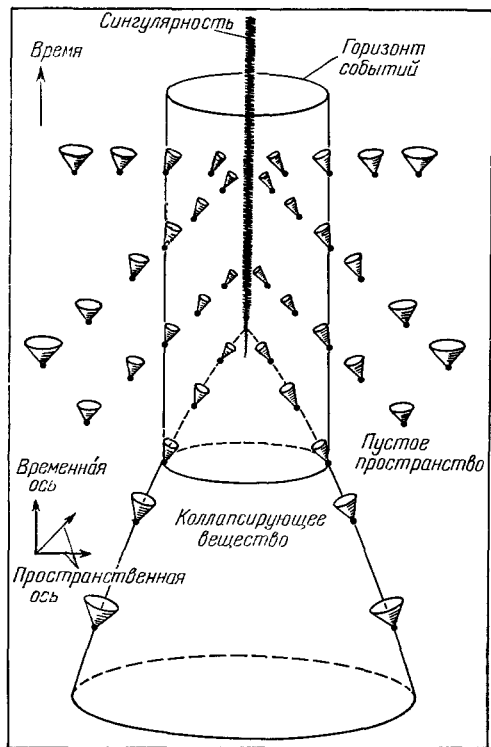


Рис. 3. Сферический гравитационный коллапс звезды может быть изображен на пространственно-временной диаграмме, на которой две из трех пространственных осей направлены горизонтально, а временная ось направлена по вертикали вверх.

Звезда коллапсирует до тех пор, пока ее гравитационное поле не становится настолько сильным, что свет не может ее покинуть, т. е. до образования горизонта событий. Вещество звезды коллапсирует вплоть до сингулярности нулевого объема и бесконечной плотности, когда уже современные законы физики утрачивают свою силу. Распространение световых сигналов из различных точек указано световыми конусами. Свет, испущенный из точек, близких к сильно притягивающей сингулярности, больше смещается в направлении к сингулярности, чем свет, испущенный в более удаленных точках. Хотя световые конусы изображены вблизи сингулярности скатыми, специальная теория относительности остается справедливой для локальных систем отсчета световых конусов, а скорость света по-прежнему является предельной скоростью. Сравнение пространственно-временного изображения поведения света вблизи горизонта событий с чисто пространственным изображением приведено на рис. 1. Пространственное изображение может быть получено как горизонтальное сечение изображенной пространственно-временной картины.

из пространственных координат ввести временную координату. Оно дает мгновенную картину того, что происходит в любой момент времени, избавляя нас от необходимости иметь многочисленные последовательные «мгновенные» фотографии развивающихся событий.

Пусть световая вспышка распространяется по всем направлениям из заданной точки в обычном пространстве. Волновым фронтом этой вспышки будет сфера с центром в излучающем источнике, распространяющаяся со скоростью света от источника. Чисто пространственное описание вспышки дается последовательностью сфер, причем каждая последующая сфера по размеру больше предыдущей; каждая из этих сфер определяет положение волнового фронта световой вспышки в данный момент времени. Пространственно-временным описанием световой вспышки будет уже конус, вершина которого представляет время и место, когда и где световая вспышка была испущена. Сам конус представляет историю световой вспышки (рис. 2).

На тех же самых основаниях история коллапса звезды вплоть до возникновения «черной дыры» может быть также изображена на пространственно-временной диаграмме (рис. 3). Положения световых конусов в различных точках в пространстве-времени показывают, как распространяются световые сигналы в гравитационном поле. В некоторых точках световые конусы нарисованы так, как будто они несколько опрокинуты; но это обстоятельство не будет замечено локальным наблюдателем. Такой наблюдатель описывается траекторией в пространстве-времени, которая ведет во внутреннюю часть светового конуса; его скорость никогда не сможет превысить скорость света, а это условие выполняется только внутри светового конуса. Взяв горизонтальное сечение пространственно-временной картины, мы получаем пространственное изображение происходящего.

Какова судьба тела, которое после коллапса превратилось в «черную дыру»? Предположив, что точная сферическая симметрия сохраняется вплоть до центра, получим весьма драматический ответ, даваемый общей теорией относительности. Согласно этой теории кривизна пространства-времени безгранично растет при приближении к центру. Вещество исходного тела стискивается до бесконечной плотности в центре «черной дыры» — это эффективно означает, что оно прекращает свое существование, — а также и пространство-время в вакууме вне тела приобретает бесконечную кривизну. Действие такой бесконечной кривизны на несчастного наблюдателя, у которого хватило бы ума последовать вместе с телом за горизонт событий, было бы катастрофическим. Наблюдатель ощутил бы приливные силы, бегущие по его телу, которые быстро нарастали бы и стали бесконечными за тот ограниченный промежуток времени, который отпущен наблюдателю для жизни.

Гравитационный приливный эффект — наиболее непосредственное физическое проявление пространственно-временной кривизны. Эйнштейн показал, что гравитационные силы, действующие на тело, могут быть в любой точке пространства исключены просто за счет выбора свободно падающей системы отсчета. Ему принадлежит знаменитый пример с лифтом, у которого обрываются тросы, и он падает на землю. Все пассажиры в лифте падают столь же быстро, как и сам лифт. Каждый из пассажиров не будет поэтому ощущать ускорения силы тяжести и будет парить, не ощущая силы тяжести внутри лифта. Такое исчезновение силы тяжести за счет свободного падения — сейчас уже всем хорошо знакомая особенность космических путешествий. Что касается приливного эффекта, то его нельзя уничтожить подобным способом, и приливный эффект поэтому

является подлинным проявлением гравитационного поля. Вообразим себе наблюдателя, свободно падающего в поле тяготения Земли. Допустим, что этот наблюдатель окружен сферой, состоящей из отдельных частиц, которые в начальный момент времени были относительно него неподвижны. Ньютоновское гравитационное поле Земли меняется обратно пропорционально квадрату расстояния между центром Земли и данной точкой;

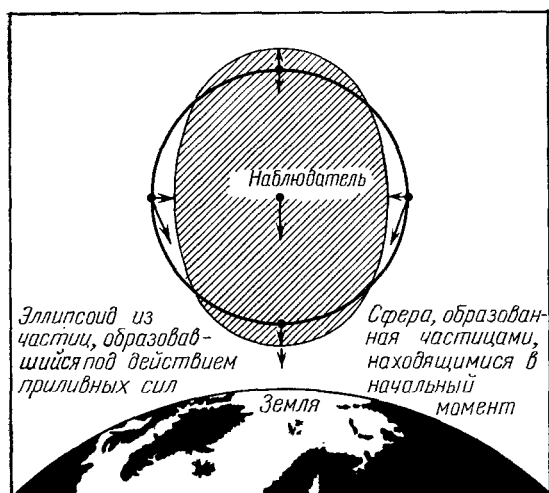


Рис. 4. Гравитационный приливный эффект является наиболее непосредственным проявлением кривизны пространства-времени.

Если наблюдатель свободно падает в гравитационном поле Земли, он не чувствует никакой силы. Если частицы вокруг него образуют сферу (сплошная линия), причем эти частицы в начальный момент покоятся относительно него, он может обнаружить неоднородность ньютоновского гравитационного поля вокруг него по деформации сферы, превратившейся в эллипсоид (заштрихован). Приливный эффект — это истинное проявление гравитационного поля; от этого эффекта нельзя избавиться путем изменения системы отсчета наблюдателя.

в масштабах лаборатории. Величина пространственно-временной кривизны может быть выражена через радиус кривизны. Чем меньше кривизна пространства-времени, тем больше соответствующий радиус кривизны; в точности так же, как в трехмерном пространстве сфера тем меньше искривлена, чем больше ее радиус, который является в этом случае радиусом кривизны. Радиус кривизны пространства-времени на поверхности Земли равен примерно расстоянию от Земли до Солнца (этот результат является чистейшим совпадением; Солнце не имеет никакого отношения к этому частному приливному эффекту). Таким образом, Земля не искривляет существенно пространство-время по сравнению с размерами лабораторий. Приливный эффект на поверхности Солнца даже еще меньше из-за меньшей средней плотности Солнца. Фактически радиус кривизны пространства-времени на солнечной поверхности равен примерно удвоенному расстоянию от Земли до Солнца. Следовательно, Солнце искривляет пространство-время на своей поверхности в меньшей степени, чем это делает Земля на своей.

На поверхности белого карлика значение кривизны пространства-времени уже значительно больше; там радиус кривизны примерно такого же порядка, что и радиус Солнца, — примерно около 700 000 км.

оно сильнее притягивает объекты, расположенные ближе к поверхности Земли, чем те, которые значительно удалены. Такая неоднородность гравитационного поля Земли приливным образом превратит сферу, образованную частицами, в эллипсоид (рис. 4). Приливы и отливы земного океана являются примерами этого эффекта; в этом случае Земля ощущает приливные силы от Луны.

Приливные эффекты, наблюдаемые в Солнечной системе, довольно слабы; наибольший из них, фактически наблюдаемый на поверхности Земли, обязан, в первую очередь, гравитационному полю Земли. Такие приливные явления и вовсе неощутимы в лабораторных масштабах. Говоря о том же другими словами, можно сказать, что кривизна четырехмерного пространства-времени на земной поверхности незначительна

Приливный эффект вблизи белого карлика будет весьма ощутим для космонавта, оказавшегося на орбите вблизи такой звезды. Голова космонавта и его ноги будут ощущать силы, действующие в различных направлениях, равные примерно одной пятой полной силы, которую он ощущал бы, стоя на Земле. На поверхности же нейтронной звезды приливные эффекты по нашим обычным представлениям будут просто чудовищными. Здесь уже радиус кривизны пространства-времени составит всего лишь около 50 км. Очевидно, конечно, что никакой космонавт не сможет вынести пребывание на орбите, близко опоясывающей нейтронную звезду; даже если бы ему удалось сложиться в крохотный шарик, гравитационное ускорение в различных частях его тела отличалось бы в миллионы раз от гравитационного ускорения на поверхности Земли.

В принципе можно сконструировать приборы, способные противостоять таким приливным силам. Они должны быть очень маленькими, чтобы уменьшить действие сил, поскольку приливные силы пропорциональны размеру объекта, на который они действуют. Представим себе теперь, что такой прибор падает в «черную дыру» с массой, равной одной солнечной массе. В тот момент, когда он пересекает горизонт событий, он испытывает действие приливных сил, в тридцать раз больших, чем приливные силы, действующие на поверхности нейтронной звезды. Тем не менее, прибор может сохраниться в целости, поскольку силы, действующие на его составные части, все еще не велики. Но приливные силы будут быстро возрастать по мере приближения прибора к центру «черной дыры», последовательно разрывая на части материал, из которого сделан прибор: молекулы, образующие этот материал, атомы, из которых были образованы молекулы, затем ядра атомов и, наконец, даже элементарные частицы, которые незадолго до этого были строительными кирпичиками в ядрах. Но и этого мало. Весь процесс продлится не более нескольких миллисекунд. То, что мы рассказали, — это модель возникновения Вселенной, действующая в обратном направлении в значительно меньших масштабах. Начальный «большой взрыв» в космологических моделях как раз и есть то, что называется пространственно-временной сингулярностью: кривизна пространства-времени становится бесконечной. Ситуация внутри «черной дыры» также ведет к такой же сингулярности, но уже обращенной во времени.

Конечно, здесь возникает немало вопросов, связанных с тем, насколько эта картина дает реалистическое описание того, что на самом деле происходит в природе, независимо от любых сомнений, связанных со справедливостью общей теории относительности. В первую очередь нужно ответить на вопрос: уверены ли мы в том, что достаточно знаем о поведении вещества при чрезвычайном уплотнении, необходимом для возникновения «черных дыр», для того чтобы эти предсказания стали убедительными? Какую роль играет предположение о точной сферической симметрии во всем этом подходе? До какой степени представление о «черных дырах» соответствует астрономическим наблюдениям? Давайте рассмотрим эти вопросы по порядку.

Вопрос, касающийся чрезвычайно высоких плотностей — плотностей, превышающих даже плотность ядерного вещества, — возникающих при образовании «черной дыры», на самом деле не столь серьезен, как это представляется с первого взгляда. Можно услышать, что современная физическая наука не адекватна для таких плотностей (возможно даже, что это и так); но этот аргумент может бросить тень лишь на наименее массивные из коллапсирующих тел. Плотность любого тела пропорциональна его массе, деленной на куб радиуса; радиус «черной дыры» про-

порционален ее массе. Из этих двух фактов вытекает, что плотность, при которой происходит формирование «черной дыры», обратно пропорциональна квадрату ее массы.

«Черная дыра» с массой от 10^4 до 10^8 солнечных масс представляется возможным кандидатом на помещение в центр галактики. Коллапсирующая масса, равная 10^8 солнечных масс, достигнет состояния «черной дыры», когда ее средняя плотность будет, грубо говоря, равна плотности воды. Приливные эффекты на горизонте событий также обратно пропорциональны квадрату массы «черной дыры». Следовательно, для тела с массой 10^8 солнечных масс такие приливные эффекты будут даже меньше, чем на земной поверхности. Космонавт может пересечь горизонт событий, даже не заметив приливных сил, действующих на него. Он вообще не заметит ничего особенного, пересекая горизонт событий. (В любом случае точное положение горизонта событий не может быть обнаружено локальными измерениями.) Космонавт будет иметь в своем распоряжении несколько минут, чтобы наслаждаться ощущением жизни внутри «черной дыры», прежде чем приливные эффекты не возрастут до бесконечности. В «черной дыре» с массой в 10^9 солнечных масс космонавт будет иметь в запасе даже целый день. Что же касается больших приливных эффектов и непомерных плотностей, с которыми мы сталкиваемся внутри «черной дыры», то эти вопросы требуют привлечения некоторых более тонких аспектов общей теории относительности, к которым я еще вернусь.

Вопрос относительно той роли, которую играет предположение о сферической симметрии, куда более серьезен. Если не предполагать строгую сферическую симметрию, то у нас нет точных решений соответствующих уравнений; но именно на этих решениях были основаны все предыдущие рассуждения. Кроме того, если даже допустить, что в начальный момент отклонения от сферической симметрии были незначительными, у нас есть все основания ожидать, что вблизи центральной точки они колоссально возрастут. Не могут ли различные части коллапсирующего тела беспрепятственно проскочить мимо друг друга? Может быть, они способны появиться вновь после близкого контакта друг с другом как ни в чем не бывало. Но если даже этого и нет, можем ли мы сказать что-то о конечной конфигурации гравитационного поля, появившегося в результате коллапса? Нам очень повезло, поскольку из некоторых общих теорем, доказанных в самое последнее время, следует полная картина асимметричного коллапса.

Рассматривая картину более подробно, допустим, что массивная звезда или группа тел коллапсируют и что отклонения от сферической симметрии в начальный момент относительно малы. Мы можем установить, что точка, после которой уже возврата наружу нет, пройдена, если выполнен некоторый критерий. Этот критерий может быть представлен в различных формах, но мы воспользуемся самой простой его формой. Допустим, что в некоторой точке пространства-времени произведена световая вспышка. Если это событие изобразить на пространственно-временной диаграмме, вспышка света со временем представит собой световой конус, исходящий из точки. Световые лучи будут выходить из этой точки, расходясь по всем направлениям. Когда лучи проходят через вещество или гравитационное поле, вещество или поле оказывают фокусирующее действие на лучи. Если на пути лучей оказывается заметное количество вещества или достаточное сильное гравитационное поле, степень расхождения световых лучей может быть уменьшена настолько, что фактический пучок света меняет свой характер, т. е. оказывается сходящимся. Необходимый критерий для точки пространства-времени, за которой возврата не существует, состоит в том, что любой световой луч, испущенный из этой точки,

пересекающий достаточное количество вещества или сильное гравитационное поле, при своем движении по световому конусу становится сходящимся. Несложно показать из простых оценок порядков величин, что для достаточно большого собрания масс этот критерий фактически уже выполнен задолго до того, как плотности или кривизна становятся чрезвычайно большими, независимо от того, какие предположения о симметрии задачи были сделаны.

Но как только этот критерий удовлетворен, можно сказать уже многое. Прежде всего, согласно строгой теореме общей теории относительности, доказанной Хоукингом и автором настоящей статьи, где-то обязательно должна быть пространственно-временная сингулярность. Сингулярность — это просто область пространства-времени, где отказывает физическая теория. В нашем случае сингулярность — это область пространства-времени, где мы должны считать бесконечно большими гравитационные приливные силы, деформирующие и стискивающие вещество и фотоны, так что последние прекращают свое существование. Физике не повезло с теорией, которая предсказывала бы эволюцию истинного сингулярного физического состояния вещества. В прошлом, когда в физической теории появлялась сингулярность, это просто свидетельствовало о том, что теория в той форме, в какой она существовала, оказывалась несостоятельной и что следовало просто искать другую теорию. В случае «черных дыр» мы снова сталкиваемся с подобной ситуацией, но она оказывается значительно серьезнее, чем это было раньше. Здесь уже сингулярность относится к самой структуре пространства-времени.

Существуют две различные возможности на данной стадии. Может случиться, что возникающая сингулярность такова, что сигналы могут выходить из нее и наблюдаться на значительных расстояниях. Это наиболее тревожная из двух возможностей и вместе с тем более сомнительная. Такая сингулярность называется обнаженной (голой) сингулярностью. Возможность существования обнаженной сингулярности тревожит потому, что физические эффекты почти бесконечной пространственно-временной кривизны совершенно неизвестны. Если эти эффекты способны оказывать влияние на внешний мир, то в физическую теорию вводится существенная неопределенность.

С другой стороны, возможно, что сингулярность, возникающая в результате гравитационного коллапса, всегда скрыта от внешнего наблюдателя, как это имеет место в сферически-симметричном случае. В этом случае не возникает никакой существенной неопределенности. Предположение о том, что в результате гравитационного коллапса допустима только эта менее тревожная возможность, и составляет содержание гипотезы космической «цензуры». Эта гипотеза запрещает обнаженную сингулярность. Возможно, что в пользу этой гипотезы имеются слабые теоретические доводы, но при современном положении дел ничего определенного сказать все-таки нельзя. Сам я склонен поверить в эту гипотезу в тех случаях, когда на начальной стадии отклонения от сферической симметрии были невелики. В более сложных ситуациях вопрос просто открыт. Не исключено, что сейчас даже имеются данные наблюдений, противоречащие гипотезе космической «цензуры».

Если предположить, что гипотеза космической «цензуры» справедлива, из нее можно вывести немало следствий. Поскольку удовлетворяется критерий фокусировки, гипотеза космической «цензуры» подразумевает наличие абсолютного горизонта событий. Этот горизонт будет иметь вполне определенную площадь поперечного сечения, которая имеет

тенденцию расти вместе с течением времени и никогда не уменьшается. Таким образом, «черные дыры» всегда увеличиваются и никогда не сжимаются. Представляется разумным предположение о том, что если «черная дыра» не подвергается возмущениям, то она приходит в стационарное состояние. Можно было бы подумать, что стационарные состояния «черных дыр» могут быть чрезвычайно сложными из-за большого числа возможных конфигураций вещества, которое должно коллапсировать до размера «черной дыры». Недавняя работа Израэля, Картера и Хоукинга обнаружила, что это совсем не так. Существует очень ограниченный класс стационарных конфигураций для «черных дыр». Эти конфигурации однозначным образом определяются массой, спином и зарядом «черной дыры». Эйнштейновские уравнения общей теории относительности было точно решены для этих конфигураций Керром и Ньюменом. Причина, по которой все асимметрии, характерные для коллапсирующего тела, не проявляются в конечном состоянии «черной дыры», состоит в том, что в процессе формирования «черной дыры» тело, из которого образуется эта «дыра», оказывает весьма слабое влияние на свое собственное последующее поведение. «Черная дыра» — это наилучшая возможность для самосогласованного гравитационного поля, управляемого внутренней динамикой общей теории относительности. Законы этой динамики позволяют ликвидировать асимметрию гравитационного поля в «черной дыре» за счет излучения гравитационных волн.

Мы говорили о том, что материальный объект, однажды захваченный «черной дырой», уже не может выйти из нее. Вместе с тем, существуют некоторые случаи, благодаря которым некоторая доля энергии «черных дыр» может быть передана наружу. Один из таких случаев подразумевает слияние двух «черных дыр». Такой процесс сопровождается мощным излучением гравитационных волн, полная энергия которых составляет заметную долю исходной энергии покоя сливающихся «черных дыр». Другой механизм получения энергии от «черной дыры» состоит в том, что частица попадает в область, близкую к горизонту событий вращающейся «черной дыры». Исходная частица делится на две, причем так, что одна из образовавшихся частиц падает в «дыру», а другая удаляется на бесконечность, обладая уже большей массой-энергией, чем та, которой обладала исходная частица. Таким способом, вращательная энергия «черной дыры» сообщается частице, движущейся вне «черной дыры» (рис. 5).

Займемся теперь тем, что происходит внутри «черной дыры», и существованием пространственно-временной сингулярности. Поскольку само понятие «сингулярность» означает область, где утрачивают силу физические теории, мы сталкиваемся с курьезным положением дел: общая теория относительности сама указывает область собственной неприменимости. Может быть, нам не следует слишком удивляться, поскольку мы рассматриваем общую теорию относительности пригодной только в рамках классической теории. Следует ожидать, что по мере того, как пространственно-временная кривизна становится достаточно большой, все большую и большую роль должны играть квантовые эффекты. Когда радиус кривизны пространства-времени уменьшается до размеров, скажем, 10^{-13} см (грубо говоря, это радиус элементарной частицы), тогда современная теория элементарных частиц, как это думают в настоящее время, должна уже утратить свое значение. Если же радиус кривизны пространства-времени становится еще меньше, например доходит до 10^{-33} см, нам следует уже использовать квантовую механику применительно к самому пространству-времени. Сейчас нет никаких разумных способов это сделать.

И, наконец, заключительный вопрос: что можно сказать о возможности наблюдения «черных дыр»? За последний год или, во всяком случае, за последнее время было выдвинуто много предложений и их опровержений в связи с этим вопросом. По-видимому, сегодня можно привести уже некоторые надежные выводы. Центральный пункт всех споров — это системы двойных звезд, один из компонентов которых представляет собой (по предположению) «черную дыру», а также системы, состоящие из многих звезд, такие, например, как шаровые скопления. Наличие «черной дыры» может быть установлено по ее гравитационному влиянию

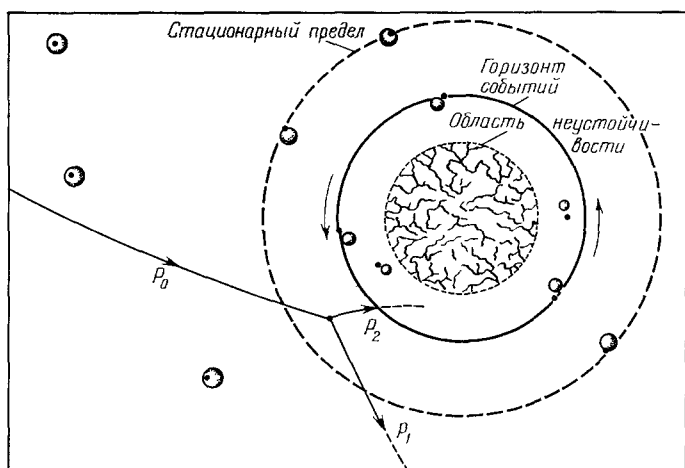


Рис. 5. Можно извлечь энергию из вращающейся «черной дыры» даже в тех условиях, когда никакой материальный объект, попавший за горизонт событий, не может выйти из-под этого горизонта (сплошная линия).

Если «черная дыра» вращается, то вращается и горизонт событий. Стационарный предел представляет собой сферическую поверхность (штриховая линия), основным свойством которой является следующее: скорость сигнала или тела на этой поверхности должна быть равна скорости света, чтобы наблюдатель на бесконечности видел сигнал или тело «стоящим все время на одном и том же месте». Если частица P_0 падает из бесконечности внутрь поверхности стационарного предела, то она может разделиться на две части, причем так, что одна из ее частей P_2 падает внутрь «черной дыры», а другой компонент P_1 снова уходит на бесконечность, обладая большей массой-энергией, чем исходная частица P_0 . Таким путем P_1 извлекает некоторую часть энергии вращения «черной дыры». Положение внутренней сингулярности неопределенно, поскольку кроме вращения имеются еще и некоторые возмущения, однако, вероятнее всего, она находится рядом или внутри центральной области неустойчивости.

на другие тела, изменяющему их движение. Если, таким образом, выявляется некоторый невидимый объект, масса которого оказывается слишком большой для белого (или черного) карлика или нейтронной звезды, то вероятность того, что мы имеем дело с «черной звездой», представляется весьма значительной.

Существует еще и другой аспект роли «черных дыр» в наблюдательной астрономии. Вполне уместно сопоставить этот случай со случаем нейтронных звезд. Много лет астрономы пытались обнаружить нейтронные звезды по некоторым их проявлениям, таким, например, как рентгеновское излучение, которое было предсказано как следствие их существования. Когда же нейтронные звезды были, наконец, открыты, они были найдены с помощью эффекта, который оказался совершенно неожиданным и даже не получил до сих пор удовлетворительного объяснения: испускания коротких, строго периодических импульсов электромагнитного излучения, характеризующего пульсары. Вполне возможно, что обнаружение «черных дыр» придет через некоторый побочный эффект, о котором мы сейчас даже не подозреваем. Сегодня в астрономии имеются

в изобилии различные непонятные явления, которые могут иметь отношение к «черным дырам». Известен феноменальный энергетический выход квазаров и радиогалактик, взрывы в центрах галактик, аномальные красные смещения в спектрах некоторых квазаров и галактик, расхождения в определениях массы галактик. Остаются неясными серьезные вопросы, касающиеся структуры спиральных рукавов нормальных галактик. И, наконец, кроме всего прочего, имеются наблюдения Вебера, указывающие на наличие гравитационных волн, идущих из центра нашей Галактики *). Если действительно такие волны непрерывно испускаются во всех направлениях от галактического центра, энергия, которую они уносят с собой, означает потерю массы в галактике, равную многим тысячам солнечных масс в год. Это число находится в вопиющем противоречии с данными других наблюдений.

Теория «черных дыр» отнюдь не привела к убедительному объяснению этого явления или каких-либо других явлений, упомянутых выше, но глава астрофизики, посвященная «черным дырам», только что началась. В случае волн, возможно, обнаруженных Вебером, лучшее, на что мы можем надеяться, это выявление некоторого механизма, посредством которого мощный пучок гравитационных волн распространяется в плоскости Галактики. Солнце расположено очень близко от плоскости Галактики. При таком характере пучка гравитационных волн может случиться, что детекторы Вебера улавливают подавляющую часть энергии, испускаемой из галактического центра. Если это правильно, все противоречивые результаты наблюдений могут быть согласованы. Были сделаны попытки объяснить такой направленный характер распространения гравитационных волн, предполагая существование больших, быстро вращающихся «черных дыр» в центре Галактики. Однако эти попытки оказались мало убедительными.

Может случиться, что предположение о существовании «черных дыр» не даст возможности объяснить что-либо существенное. Если наблюдения Вебера подтвердятся, мы скорее сохраним общую теорию относительности (за исключением тех областей, где кривизна пространства-времени

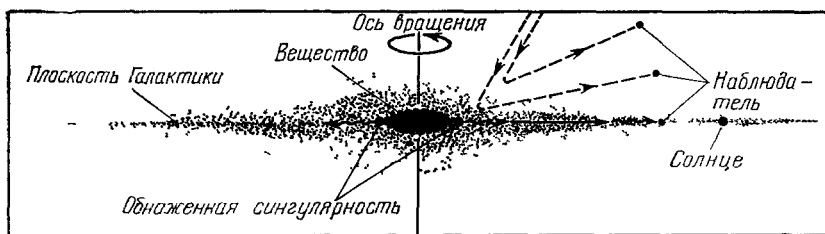


Рис. 6 Вращающаяся сингулярность могла бы объяснить мощное излучение гравитационных волн из центра Галактики.

Вычисления показывают, что некоторые типы обнаженной сингулярности могут наблюдаться только в одной плоскости. Линии зрения «отражаются» от нее, если они не находятся в этой плоскости. Если бы такая сингулярность была источником гравитационных волн, они шли бы в виде пучка, лежащего в одной плоскости. Если бы оказалось, что эта плоскость совпадает с плоскостью Галактики, то Земля и Солнце, также расположенные в плоскости Галактики, находились бы как раз на пути распространения гравитационных волн.

очень велика и где следует ожидать отказа классической теории вообще) и будем искать выход, применяя обнаженную сингулярность. Стоит отметить, что некоторые решения уравнений Эйнштейна, полученные Керром, соответствуют обнаженным сингулярностям и что Картер обнару-

*) Результаты Вебера требуют дальнейшей проверки. (Прим. перев.).

жил, что любой эффект, возникающий в обнаженной сингулярности, наблюдается в одной-единственной плоскости (рис. 6). Если это утверждение в какой-то степени относится к центру нашей Галактики, можно представить себе, что сингулярность может сразу объяснить как существование плоскости Галактики, так и наличие гравитационных волн, обнаруженных Вебером. Этим самым будут устранены противоречия между отдельными наблюдениями, но само по себе такое объяснение наблюдений Вебера является весьма радикальным. По сравнению с ним «черные дыры» могут рассматриваться как привычное «классическое» описание; именно поэтому они должны а priori рассматриваться как предпочтительное объяснение в любом случае. Увы, природа не всегда одобряет привычные описания, и меньше всего — в области астрономических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

Дж. Уилер, Б. Гаррисон, М. Вакано, К. Торн, Теория гравитации и гравитационный коллапс, М., «Мир», 1967.— S. Thorne, *Comm. Astrophys. and Space Phys.* 11 (5), 191 (1970).— R. Ruffini, J. A. Wheeler, *Phys. Today* 24 (1), 30 (1971).— Р. Пенроуз, Структура пространства-времени, М., «Мир», 1972.
