

Панкадж Джоши

ГОЛЫЕ сингулярности

Причиняющее беспокойство порождение
черной дыры — голая сингулярность.
Долгое время физики полагали,
что данное явление не может
существовать в природе.
Так ли это?

Современная наука знакомит нас с множеством удивительных явлений, среди которых судьба гнущей массивной звезды заслуживает особого внимания. Исчерпав горючее, поддерживавшее ее миллионы лет, наша «героиня» больше не в состоянии сохранять равновесие и под действием собственного веса стремительно сжимается в точку, коллапсирует. Рядовые звезды, подобные нашему Солнцу, тоже сжимаются, но всего лишь до некоторого устойчивого состояния, размер которого меньше исходного. Если звезда достаточно массивна, то ее гравитация доминирует над всеми остальными силами, способными предотвратить коллапс. Если же ее диаметр составляет миллионы

километров, то она съезживается до размеров булавочного укола.

Многие физики и астрономы считают, что финальная стадия коллапса есть черная дыра — объект, обладающий такой сильной гравитацией, что ничто не может вырваться из его ближайшего окружения. Черная дыра состоит из двух частей. В ее центре расположена сингулярность, область бесконечно малых размеров, в которой все вещество звезды разрушается. Эту сингулярность окружает область пространства-времени, из которой невозможно выбраться; ее граница — горизонт событий. Нечто, раз проникнувшее за горизонт собы-

тий, навсегда теряет надежду вернуться. От падающего в черную дыру объекта не сможет уйти ни один луч света, и поэтому внешний наблюдатель никогда больше не увидит этого объекта.

Насколько правдоподобна такая картина? Согласно известным законам физики, сингулярность действительно формируется, однако вопрос о наличии горизонта событий черной дыры до сих пор остается открытым. Большинство физиков проводят свои расчеты, предполагая, что горизонт событий должен сформироваться только потому, что он есть своего рода очень привлекательный... «научный фиговый лист». Дело в том, что исследователи до сих пор не разгадали, что же в точности происходит в сингулярности: материя разрушается, но что же случается с ней потом? Скрывающий сингулярность горизонт событий скрывает и брешь в наших знаниях. В сингулярности могут происходить всевозможные неизвестные науке процессы, которые никак не повлияют на внешний мир. Вычерчивая орбиты планет и звезд, астрономы могут спокойно игнорировать вноси-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Если исходить из здравого смысла, то большая звезда неизбежно коллапсирует в черную дыру. Однако, согласно некоторым теоретическим моделям, вместо этого она может превратиться в так называемую голую сингулярность. Выяснение того, что же происходит в действительности, — одна из наиболее важных нерешенных задач астрофизики.
- Открытие обнаженных сингулярностей могло бы изменить стратегию поиска Единой теории всех физических взаимодействий, и не только благодаря возможности проведения прямых наблюдательных тестов такой теории.

мые сингулярностями неопределенности и уверенно использовать законы классической физики. Что бы ни происходило в черной дыре — все это происходит только внутри нее.

Однако все большее число исследований обращают эту рабочую гипотезу в вопрос. Физики-теоретики выявили разнообразное количество сценариев коллапса звезд, при которых горизонт событий вообще не образуется, и сингулярность, таким образом, становится выставленной на всеобщее обозрение. Ученые называют такую сингулярность голой (или «обнаженной»). Вещество и излучение могут как попадать внутрь, так и уходить из нее. Несмотря на то что путешествие к сингулярности внутри черной дыры возможно только в одну сторону, вы, в принципе, можете подобраться к обнаженной сингулярности так близко, как захотели бы, а потом смогли бы вернуться и рассказать об этом.

Если бы существовала голая сингулярность, то последствия оказались бы столь внушительными, что были бы способны оказать существенное влияние на современную астрофизику и фундаментальную физику. Отсутствие горизонта событий могло бы означать, что загадочные процессы, происходящие вблизи сингулярностей, вторглись во внешний мир. Голые сингулярности могли стать причиной необъяснимых событий сверхвысоких энергий, наблюдаемых астрономами, а также послужить лабораторией для исследования тончайшей структуры пространства-времени.

Космическая цензура

Считалось, что горизонт событий — наиболее «понятный» ученым элемент черной дыры, сингулярности же действительно загадочны и принадлежат к области пространства-времени, в которых гравитационные силы становятся бесконечно большими, нарушая, таким образом, известные физические законы. Согласно современному пониманию гравитации, основанной на общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна, сингулярности неизбежно образуются в процессе

коллапса гигантской звезды. ОТО не принимает во внимание квантовые эффекты, которые становятся важными для микроскопических объектов. Но можно предположить, что возникающие квантовые эффекты предотвращают обращение гравитации действительно в бесконечность. Физики до сих пор бьются над проблемой развития квантовой гравитации, необходимой для объяснения физических процессов, происходящих в сингулярностях.

Для сравнения: то, что происходит в области пространства-времени вокруг сингулярности, кажется довольно ясным. Радиус горизонта событий звезд составляет несколько километров, что гораздо больше, чем масштабы квантовых эффектов. Не вводя новых законов природы, можно сказать, что горизонты событий управляются только законами ОТО, которая основывается на уже известных принципах и прошла 90-летнюю проверку наблюдениями.

Вообще говоря, приложение теории к коллапсу звезд — довольно трудоемкая задача. Уравнения гравитации Эйнштейна известны своей сложностью, и их решение требует упрощающих допущений. Американские физики Дж. Роберт Оппенгеймер (J. Robert Oppenheimer) и Хартланд Снайдер (Hartland S. Snyder), а также, независимо от них, индийский физик Б. Датт (B. Datt) предприняли первую попытку их решения в конце 30-х гг. прошлого века. Для упрощения уравнений они рассматривали только в точности сферически-симметричные звезды, состоящие из однородного газа с пренебрежимо малым давлением. Ученые выяснили, что если коллапсирует такая идеализированная звезда, то гравитация на ее поверхности растет и в конце концов становится достаточно сильной для того, чтобы пленить все вещество и излучение, формируя таким образом горизонт событий. Звезда становится невидимой для внешнего наблюдателя, и как только она сколлапсирует, все траектории, находящиеся в области под горизонтом событий, будут вести в сингулярность.

Процесс эволюции реальных звезд, конечно, гораздо сложнее. Их плотность неоднородна, газ внутри них обладает давлением, и поэтому они могут принимать несколько иные формы. Возникает вопрос: каждая ли достаточно массивная звезда превращается в черную дыру? В 1969 г. физик Оксфордского университета Роджер Пенроуз (Roger Penrose) предположил, что ответ на этот вопрос будет положительным. Согласно его гипотезе, формирование сингулярности во время гравитационного коллапса звезды неизбежно влечет за собой формирование и горизонта событий. Природа как будто запрещает нам видеть сингулярность, укрывая ее горизонтом событий. Таким образом, идея Пенроуза была названа «гипотезой космической цензуры», которая, тем не менее, стала фундаментом современных исследований черных дыр. Физики рассчитывали доказать эту гипотезу так же математически строго, как это было сделано при доказательстве неизбежности возникновения сингулярности.

Сингулярность как она есть

Однако надеждам специалистов не суждено было сбыться. Вместо того чтобы прийти к прямому дока-

ОДЕТАЯ ИЛИ РАЗДЕТАЯ?

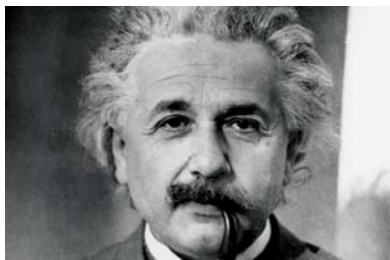
Черные дыры и голые сингулярности — два возможных финальных состояния процесса коллапса гравитирующей массивной звезды. Сердцевину каждого из них составляет сингулярность — клубок материи такой высокой плотности, что становятся необходимыми новые законы физики для его описания. Все, что попадает в сингулярность, разрушается.

В черной дыре сингулярность «одетая» — она окружена виртуальной граничной поверхностью, называемой горизонтом событий, которая скрывает ее от внешнего наблюдателя. Все, что проникает под эту поверхность, никогда не может вернуться назад.

Обнаженная сингулярность не окружена такой граничной поверхностью. Она видима внешнему наблюдателю, и объекты, движущиеся по направлению к ней, могут, в принципе, развернуться вплоть до достижения самой сингулярности

ОТЦЫ-ОСНОВАТЕЛИ

Непрекращающиеся споры о том, может ли формироваться обнаженная сингулярность, — часть длинной истории о черных дырах



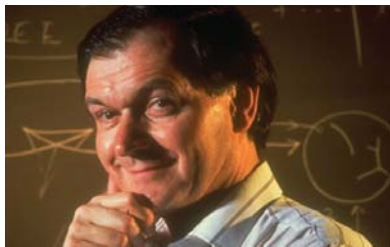
Общая теория относительности (ОТО) предсказывает черные дыры, но Эйнштейн сомневался, могут ли они существовать в действительности.



Дж. Роберт Оппенгеймер (J. Robert Oppenheimer) (позже возглавивший Манхэттенский проект) и другие ученые показали, что черные дыры могут формироваться



Стивен Хокинг (Stephen Hawking) и Роджер Пенроуз (Roger Penrose) (ниже) доказали, что образование сингулярности неизбежно



Пенроуз утверждал, что сингулярности должны быть скрыты горизонтом событий. Некоторые ученые придерживались иной точки зрения

зательству гипотезы космической цензуры при любых физических условиях, ученые оказались вынуждены рассматривать различные случаи коллапса, один за другим, постепенно украшая теоретические модели деталями, в которых нуждались начальные исследования в этой области. В 1973 г. немецкий физик Ганс Юрген Зейферт (Hans Jurgen Seifert) и его коллеги ввели в рассмотрение неоднородность распределения вещества в звезде. Интригующий результат: слои проникающего в черную дыру вещества могли бы сталкиваться, порождая не скрытые горизонтом мгновенные сингулярности. Но сингулярности могут быть разных типов, и те, о которых идет речь, оказались бы «мягкими». Другими словами, несмотря на то что плотность в некоторой области была бы бесконечной, гравитация оставалась бы конечной, и, таким образом, сингулярность не сжала бы вещество и попадающие в нее объекты до размеров булавочного укола. В такой сингулярности сохранились бы законы ОТО, и вещество продолжало бы двигаться дальше до своей встречи с истинной, центральной сингулярностью.

В 1979 г. Дуглас Ирдли (Douglas M. Eardley) из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре и Ларри Смарт (Larry Smarr) из Иллинойского университета сделали следующий шаг, осуществив численное моделирование эволюции звезды, обладающей законом изменения плотности, повышенной в центре и медленно убывающей к периферии. Точно такие же, но уже более точные результаты были получены в 1984 г. Деметриосом Кристоделу (Demetrios Christodoulou) из Швейцарского федерального технологического института в Цюрихе. Согласно этим двум исследованиям, звезда сжимается до нулевого размера с образованием голой сингулярности. Однако обе модели все еще не учитывали давление. Ричард Ньюман (Richard P.A.C. Newman) из Йоркского университета Великобритании показал, что образуемая таким образом сингулярность снова оказывается гравитационно слабой.

Воодушевленные полученными результатами, многие исследователи, включая автора этой статьи, занялись формулировкой строгой теоремы, гласящей, что голые сингулярности всегда гравитационно слабые. Но ничего не получилось. Причина вскоре выяснилась: оказалось, что в некоторых случаях неоднородного коллапса обнаженные сингулярности бывают сильными, т.е. истинными сингулярностями, в которых полностью разрушается вещество, и которые, тем не менее, остаются видимыми для внешнего наблюдателя. Общий анализ коллапса звезды (хотя по прежнему без учета давления газа), проведенный в 1993 г. Индрешем Двиведи (Indresh Dwivedi) из Университета Агры и автором этой статьи, подтвердили и прояснили эти положения.

В начале 90-х гг. прошлого века было учтено и давление газа. Амос Ори (Amos Ori) из Израильского технологического института (Техниона) и Цви Пиран (Tsvi Piran) из Израильского университета в Иерусалиме провели численное моделирование, а группа автора статьи получила точные аналитические решения соответствующих уравнений. Результат такой: звезды с реалистичным соотношением плотности и давления при коллапсе могли бы порождать голые сингулярности. Примерно в то же время научные группы, возглавляемые Джулио Мали (Giulio Magli) из Миланского политехнического университета и Кен-ичи Накао (Ken-ichi Nakao) из Университета Осаки рассмотрели модель коллапса звезды, обладающей давлением, которое обусловлено вращающимися частицами. Ученые показали, что для широкого класса допустимых в такой модели параметров финалом коллапса также становится обнаженная сингулярность.

Во всех проведенных исследованиях коллапсирующее тело полагалось сферически-симметричным, что представляет собой хорошее приближение, поскольку реальные звезды довольно близки к такой форме. Кроме того, строго сферически-симметричные звезды обладают бо-

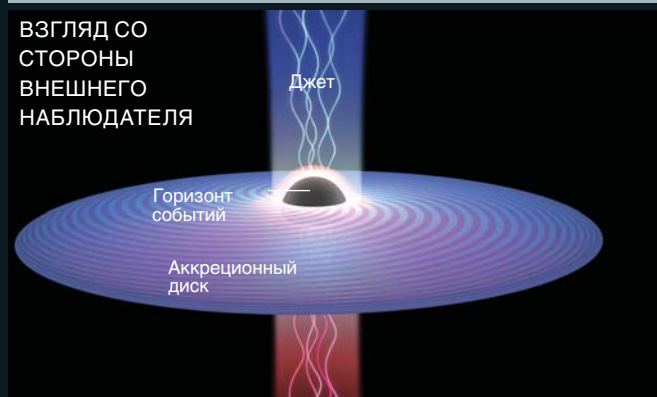
ДВА КОСМИЧЕСКИХ ЧУДОВИЩА

В сущности, обнаженная сингулярность — это черная дыра без своей «черной» части: она может как всасывать в себя материю и излучение, так и исторгать их из себя. Таким образом, голая сингулярность может выглядеть по-разному и по-разному влиять на окружающее пространство

ЧЕРНАЯ ДЫРА



Ключевая характеристика черной дыры — это горизонт событий, поверхность, под которую может попадать вещество, но из-под которой оно никогда не может выйти наружу. Как правило, горизонт событий окружен вращающимся газовым диском



С точки зрения внешнего удаленного наблюдателя черная дыра напоминает черный как смоль шар. Сингулярность расположена внутри и не может наблюдаться. Трение во вращающемся вокруг черной дыры диске порождает интенсивное излучение. Одна часть вещества диска выбрасывается в виде джета, другая поглощается



Однородная звезда без учета давления газа сжимается (коллапсирует) в черную дыру. Гравитация звезды нарастает, все больше и больше искривляя траектории движущихся вблизи нее объектов (включая фотоны) и в конце концов замыкая их

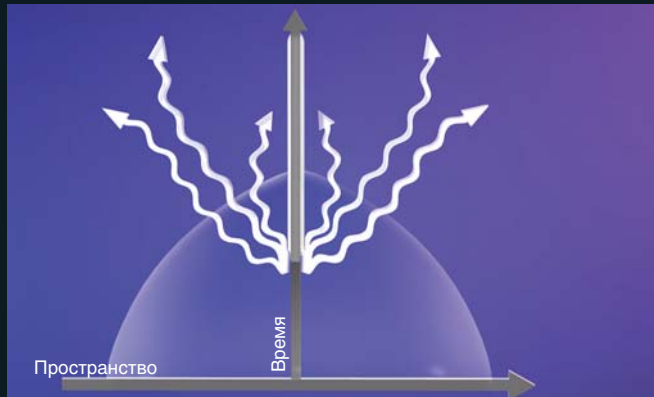
ОБНАЖЕННАЯ СИНГУЛЯРНОСТЬ



Голая сингулярность не имеет горизонта событий. Так же, как и черная дыра, она может поглощать вещество, но, в отличие от нее, может и выбрасывать вещество



Голая сингулярность выглядит как крошечная песчинка, которая, правда, обладает невообразимой плотностью. Падающее вещество может быть наблюдаемо до самого последнего момента своего движения по направлению к сингулярности. Сильная гравитация может породить мощные ударные волны



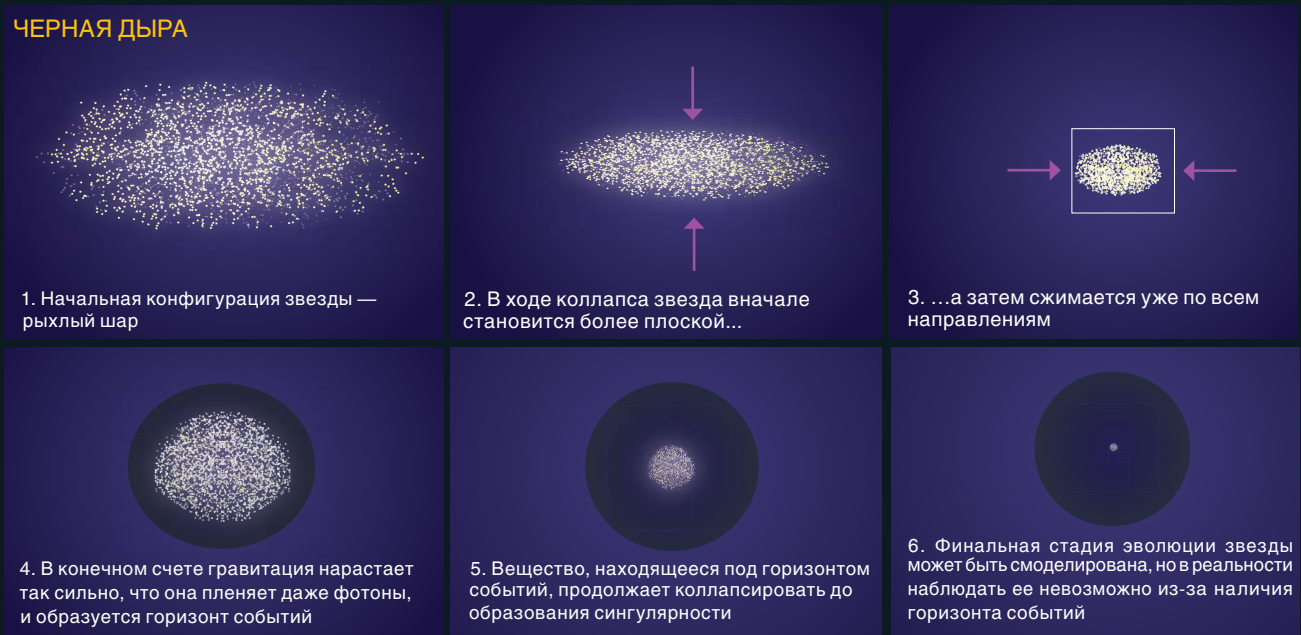
В случае, когда звезда неоднородна, ее гравитация может и не возрасти достаточно сильно для того, чтобы пленить фотоны. Звезда коллапсирует в сингулярность, но эту сингулярность можно наблюдать (пошаговое моделирование этого процесса врезка на стр. 30).

ДВА ПУТИ РАЗДАВЛИВАНИЯ ЗВЕЗДЫ

Компьютерное моделирование выявляет условия, при которых звезда коллапсирует в черную дыру или в обнаженную сингулярность. Показанные результаты моделирования полагают

звезду роем частиц, гравитация которых настолько мощна, что остальные силы, действующие в этой системе (например, давление газа), пренебрежимо малы

ЧЕРНАЯ ДЫРА



более благоприятными условиями для формирования горизонта частиц, чем звезды, отклоняющиеся от этой конфигурации. Следовательно, если гипотеза космической цензуры нарушается уже для сферически-симметричных звезд, то утверждение ее всеобщности выглядит еще более сомнительным. Ученые продолжали исследовать несферический коллапс. В 1991 г. Стюарт Шапиро (Stuart L. Shapiro) из Иллинойского университета и Саул Тюкольский (Saul A. Teukolsky) из Корнуэльского университета представили расчеты, согласно которым несферические звезды коллапсировали бы с образованием обнаженных сингулярностей. Несколько лет спустя Анджей Кроляк (Andrzej Krolak) из Польской академии наук совместно с автором этой статьи также изучали несферический коллапс и также обнаружили обнаженные сингулярности. Напомним, что оба указанных исследования не учитывали давление газа.

Некоторые скептики высказывали сомнение, действительно ли такие ситуации являются общими. Вызовет ли небольшое изменение начальной конфигурации звезды внезапное появление горизонта событий, скрывающего сингулярность? Если

да, то тогда обнаженная сингулярность могла бы оказаться всего лишь побочным следствием используемых при расчетах приближений, а не физической реальности. Некоторые экзотические сценарии с необычными формами материи действительно чувствительны к расчетам, но, согласно результатам автора этой статьи, голые сингулярности преимущественно устойчивы относительно малых возмущений начальных условий в звезде, что скорее указывает на их общность, чем надуманность.

Как победить цензуру

Нижеприведенные контрпримеры к гипотезе Пенроуза показывают, что космическая цензура не представляет собой всеобщий принцип. Физики не могут утверждать, что «коллапс любой массивной звезды приводит к созданию только черной дыры» или «любой физически реалистичный коллапс завершается ее появлением». Одни сценарии приводят к рождению черной дыры, а другие — к появлению обнаженной сингулярности. В некоторых моделях сингулярность видима только некоторое время, а затем сформировавшийся горизонт событий скрывает ее; в других же такая сингулярность

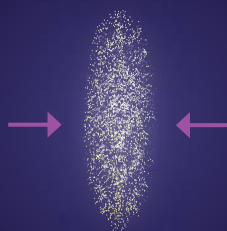
остается видимой всегда. Обычно голая сингулярность развивается в геометрическом центре коллапса, но это не всегда соответствует действительности, однако даже если это происходит, то сингулярность может распространяться в другие области. «Нагота» бывает разных видов: горизонт событий может скрыть сингулярность от настойчивого наблюдателя. В то же время если он при достаточно близком рассмотрении проникнет внутрь горизонта событий, то увидит сингулярность до того, как будет ею уничтожен. Обилие возможных вариантов просто сбивает с толку.

Автор этой статьи с коллегами выделили характерные особенности различных сценариев, приводящие или не приводящие к образованию горизонта событий. Особое внимание исследователи уделили роли неоднородностей и давлению газа. Согласно ОТО, гравитация есть сложный феномен — так, разные слои вещества подвергаются характерным смещениям. Если плотность коллапсирующей звезды велика настолько, что звезда не дает свету уйти, и к тому же неоднородна, то благодаря другим эффектам свет все-таки сможет вырваться. Сдвиг

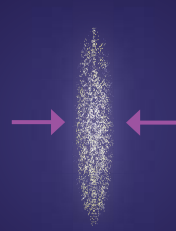
ГОЛАЯ СИНГУЛЯРНОСТЬ



1. Начальная конфигурация звезды напоминает мяч в американском футболе



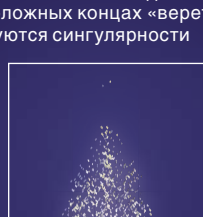
2. Звезда коллапсирует симметрично относительно своей оси



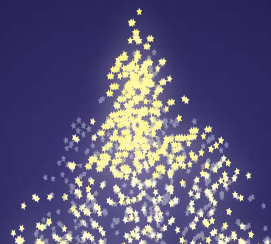
3. Звезда становится похожей на веретено



4. Хотя гравитация нарастает, она никогда не становится достаточно сильной для того, чтобы пленить фотоны и сформировать горизонт событий



5. Наибольшая плотность достигается на противоположных концах «веретена», где и формируются сингулярности



6. Никогда не появляется горизонта событий, скрывающего сингулярности, и они остаются видимыми внешним наблюдателям

вещества вблизи сингулярности может, например, вызвать мощную ударную волну, выбрасывающую вещество и излучение, т.е., по сути, привести к гравитационной буре, нарушающей процесс формирования горизонта событий.

Приступим к более детальному рассмотрению. Возьмем однородную звезду, пренебрегая давлением газа (давление изменяет детали процесса, но не влияет на его общее протекание). По мере течения коллапса напряженность гравитационного поля нарастает и сильно искривляет траектории движущихся объектов. Траектории фотонов также видоизменяются, и наступает такой момент, когда искривление настолько сильно, что свет больше не может уходить от коллапсирующей звезды. Область, в которой свет оказывается плененным, увеличивается, достигая стабильного размера, пропорционального массе звезды. Между тем за счет того, что плотность звезды однородна по пространственным координатам и меняется только во времени, звезда как целое одновременно разрушается в сингулярности. Пленение света происходит до этого момента, и, таким образом, сингулярность остается скрытой.

Теперь рассмотрим ту же самую ситуацию, предположив, что плотность падает с ростом расстояния от центра звезды. Можно сказать, что звезда в этом случае обладает структурой луковицы с concentрическими слоями вещества. Гравитационное поле действует на каждый из них и находится в зависимости от средней плотности материи внутри слоя. Из-за того, что наиболее плотные внутренние слои подвержены более сильной гравитации, они коллапсируют быстрее, чем внешние. Вся звезда не коллапсирует в сингулярность одновременно. Более глубокие слои коллапсируют быстрее, а затем один за другим — внешние.

Результатирующее запаздывание может отсрочить формирование горизонта событий. Если последний сформируется где угодно, то это произойдет в плотных внутренних слоях. Но если падение плотности с расстоянием происходит слишком быстро, то эти слои могут не набрать достаточной массы для пленения фотонов. Сформировавшаяся сингулярность будет голой. Таким образом, существует некий порог: если степень неоднородности мала и ниже некоторой критической, то черная дыра формируется; при наличии же

достаточных неоднородностей возникает голая сингулярность.

В других сценариях основной параметр — скорость коллапса. Данный эффект особенно нагляден в моделях, где звездный газ полностью переходит в излучение, и звезда становится гигантским огненным шаром — сценарий, впервые предложенный в 1940 г. индийским физиком П.С. Вайдья (P.C. Vaidya) в контексте моделирования излучающих звезд. В предложенной модели также существует порог: медленно коллапсирующие огненные шары становятся черными дырами, но при достаточно быстром коллапсе свет не оказывается плененным гравитацией, и рождается голая сингулярность.

Зыбкость

Возможность существования голых сингулярностей порождает много концептуальных проблем в научных исследованиях. Согласно общей договоренности, такие сингулярности сделали бы природу непредсказуемой в своей основе. Поскольку в сингулярности ОТО нарушается, данная теория не может предсказать, как поведут себя эти сингулярности. Джон Ирман (John Earman) из

МОЖНО ЛИ ВЗЛОМАТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ?

Кроме как в процессе коллапса звезды, обнаженную сингулярность можно создать и другим способом: разрушить уже существующую черную дыру. Хотя это и выглядит невозможным, согласно уравнениям общей теории относительности (ОТО), горизонт событий может существовать только если черная дыра вращается не слишком быстро и ее электрический заряд не слишком велик. Большинство физиков полагают, что черная дыра препятствует возникновению скорости и заряда больших, чем определенные величины. Но некоторые считают, что черная дыра неизбежно погибнет, в результате чего горизонт событий рассеется, обнажив сингулярность.

Разогнать черную дыру нетрудно. Вещество попадает в нее, обладая угловым моментом вращения,

который заставляет черную дыру вращаться быстрее, как дверь-вертушку. Наравнение заряда сложнее, поскольку заряженная черная дыра отталкивает частицы заряда того же знака и притягивает частицы противоположного знака, таким образом становясь нейтральной. Но массовое падение вещества в черную дыру может нарушить наметившуюся тенденцию.

Фундаментальная характеристика черной дыры — ее способность поглощать в больших количествах окружающее вещество, за счет которого она растет, — могла бы стать причиной ее собственного разрушения. Исследователи продолжают дискуссии о том, сохранит ли себя черная дыра или разрушится, обнажив свою внутреннюю сингулярность

Питсбургского университета как-то сказал, что из такой сингулярности могут появиться и болотная тина, и пропавшие носки; они точно магические области, в которых наука бессильна.

Коль скоро сингулярности остаются скрытыми горизонтом, произвол их поведения обуздан, и ОТО хорошо описывает пространство-время, по крайней мере, вне горизонта событий. Но если сингулярности могут быть голыми, то их непредсказуемость уничтожит предсказуемость и всей остальной Вселенной. Например, когда физики применяют ОТО к расчету орбиты Земли вокруг Солнца, они, в сущности, должны сделать допущение возможности того, что где-то во Вселенной сингулярность может породить гравитационный импульс, способный изменить траекторию движения нашей планеты.

Пока такое опасение беспочвенно. Не связанная с нарушением гипоте-

зы космической цензуры непредсказуемость и так присутствует в ОТО, поскольку эта теория разрешает путешествия во времени, в ходе которых образуются временные петли с непредвиденными исходами. В ОТО даже обычная черная дыра может стать непредсказуемой. Так, если в незаряженную черную дыру попадет электрический заряд, то пространство-время вокруг нее изменится и перестанет быть предсказуемым. Похожая ситуация возникает, когда черная дыра вращается: пространство-время перестает быть четко разделенным на пространство и время, и ученые не могут установить, как черная дыра эволюционировала с момента своего рождения. Только простейшая из простейших черных дыр, не обладающая ни зарядом, ни моментом вращения, полностью предсказуема.

Потеря предсказуемости и другие проблемы с черными дырами в действительности происходят из-за по-

явления сингулярностей; не имеет значения, скрыты они или нет. Решение этих задач, возможно, лежит в сфере квантовой гравитации, которая идет дальше ОТО и предлагает полное объяснение сингулярностей. Может быть доказано, что в этой теории все сингулярности обладают большой, но конечной плотностью. Голая сингулярность может быть своего рода «квантовой звездой», сверхплотным телом, управляемым законами квантовой гравитации. То, что казалось случайным, теперь может найти логичное объяснение.

Другая возможность — существование сингулярности с бесконечной плотностью, что необходимо принять как данность и что не объясняется квантовой гравитацией. Нарушение ОТО в сингулярности может и не означать несостоятельности теории самой по себе, а просто указывать на наличие особой точки пространства-времени. Сингулярность отмечает границу, где заканчивается физический мир. Мы можем полагать ее неким событием, а не объектом; моментом, когда коллапсирующее вещество достигает особой точки, являя собой нечто подобное Большому взрыву, только идущее в противоположную сторону.

В этом случае становятся бессмысленными вопросы о том, что выходит из голой сингулярности, — ничего, поскольку сингулярность есть момент времени, а не объект. То, что мы видим, находясь на некотором расстоянии, это не сама сингулярность, а некий процесс, проходящий в экстремальных условиях состояния вещества вблизи «события сингулярности», таких как ударные волны, вызванные неоднородностями в сверхплотной среде, или гравитационно-квантовые эффекты в окрестности этого события.

В дополнение к непредсказуемости, второй довод с неприязнью встречен многими физиками. Предварительно предположив сохранение гипотезы космической цензуры, ученые в течение нескольких десятилетий занимались формулированием различных законов, которым должна подчиняться черная дыра,

ОБ АВТОРЕ

Панкадж Джоши (Pankaj S. Joshi) — профессор физики Института Тата фундаментальных исследований в Мумбаи. Основная область его интересов — гравитация и космология. В свободное от работы время он совершает длительные пешие прогулки на природе, слушая индийскую и западную классическую музыку. Джоши живет недалеко от тех мест, которые были атакованы террористами в ноябре 2008 г.; во время атак он был дома и работал над этой статьей.

и которые должны быть универсальными. Но законы не свободны от значительных парадоксов. Например, согласно некоторым из них, в черную дыру попадает и уничтожается информация, что, в свою очередь, противоречит базовым принципам квантовой механики. Этот парадокс и другие затруднения возникают из-за наличия горизонта событий. Если его нет, то нет и проблем. Например, если звезда смогла бы излучить большую часть своей массы на поздних стадиях коллапса, то никакой информации не было бы уничтожено и не осталось бы сингулярности. В этом случае не понадобилась бы квантовая теория для объяснения сингулярностей, ОТО было бы достаточно.

Лаборатория для квантовой гравитации

Задолго до того как голые сингулярности превратились в проблему, физики нашли в них много полезного. Если сингулярности, сформировавшиеся в процессе гравитационного коллапса массивной звезды, видны внешнему наблюдателю, то они могли бы послужить лабораториями, пригодными для изучения гравитационно-квантовых эффектов. Формирование квантовой гравитации — такой как теории суперструн или петлевой квантовой гравитации — продвигается медленно с точки зрения наличия исходных наблюдательных данных, без которых практически невозможно ограничить себя какой-то одной теорией из множества возможных. Физики ищут такие исходные данные в ранней Вселенной, когда условия были настолько экстремальны, что доминировали гравитационно-квантовые эффекты.

Большой взрыв был уникальным событием. Если бы сингулярности могли быть голыми, они дали бы возможность астрономам наблюдать нечто похожее всякий раз при коллапсе массивной звезды.

Для исследования того, как голые сингулярности могли бы дать понимание процессам, иначе никак не наблюдаемым, автор этой статьи с кол-

легами смоделировал сжатие звезды в обнаженную сингулярность с учетом эффектов, предсказываемых петлевой квантовой гравитацией. Согласно этой теории, пространство обладает атомарной структурой, которая проявляет себя, когда вещество становится достаточно плотным; в результате образуются силы отталкивания, упрещающие бесконечно большой рост плотности (см.: Боджовальд М. В погоне за скачущей Вселенной // ВМН, № 1, 2009). В предлагаемой модели такая сила отталкивания рассеивает вещество звезды и не дает образовываться сингулярности. Около четверти массы всей звезды выбрасывается в последнюю долю микросекунды. Сразу после этого удаленный наблюдатель смог бы увидеть внезапное падение интенсивности излучения коллапсирующей звезды — прямой результат гравитационно-квантовых эффектов.

Взрыв мог бы вызвать возбуждение гамма-лучей сверхвысоких энергий, космических лучей и других частиц, например нейтрино. Оборудование, задействованное в грядущих экспериментах, такие как Космическая обсерватория по изучению экстремальных процессов Вселенной, модуль МКС, чей ввод в эксплуатацию планируется в 2013 г., сможет обладать необходимой чувствитель-

ностью для регистрации подобного излучения. Поскольку детали этого процесса зависят от типа гравитационно-квантовой теории, наблюдения смогли бы помочь выявить наиболее реалистичные из них.

Как подтверждение, так и опровержение гипотезы космической цензуры, несомненно, оказало бы значительное влияние на науку, поскольку проблема голых сингулярностей сосредоточивает вокруг себя не один аспект современной физики. Из теоретических исследований следует, что космическая цензура не сохраняется в абсолютной форме, как это предполагалось ранее. Сингулярности скрыты горизонтом событий только при некоторых обстоятельствах. Остается вопрос: всегда ли эти условия выполняются в природе? Если да, то физики без сомнения полюбят то, что ранее вызывало у них опасения. ■

Перевод: О.С. Сажина

РАЗНОВИДНОСТИ ЗВЕЗДНОГО КОЛЛАПСА

Подобно людям, звезды обладают своим жизненным циклом. Они рождаются в гигантских облаках пыли и галактического вещества в глубинах пространства, развиваясь и сияя миллионы лет, а потом неизбежно приходят к фазе распада и умирания. Звезда светит за счет сжигания своего внутреннего топлива, которое на ранних стадиях состоит преимущественно из водорода, потом из гелия и позже из тяжелых элементов. Каждая звезда поддерживает баланс между гравитацией, сгоняющей вещество к центру, и противоположно направленными силами давления вещества. Этот баланс удерживает звезду в равновесии до того момента, когда внутреннее топливо превращается в железо, которое, исходя из терминов ядерной физики, инертно. Силы гравитации превалируют над давлением, и звезда начинает сжиматься.

Когда наше Солнце израсходует свое топливо, его ядро сожмется под воздействием собственных гравитационных сил и по размерам станет не более Земли. Начиная с этого момента его существование будет подде-

рживаться быстро движущимися электронами, создающими так называемое давление вырожденного электронного газа. Результирующий объект будет называться белым карликом. Звезды, обладающие в 3–5 раз большими массами, чем Солнце, закончат свою жизнь в другом состоянии, в виде нейтронной звезды, в которой гравитация так сильна, что электроны вдавливаются в ядра атомов. Поддерживаемая давлением уже не электронов, а нейтронов нейтронная звезда достигает 10 км в диаметре.

Более массивные звезды не могут стать ни белыми карликами, ни нейтронными звездами, поскольку их давления уже недостаточно для компенсации гравитации. Даже если другие виды давления начнут играть роль, гравитационный коллапс все равно станет необратимым. Гравитация будет единственной определяющей силой, следовательно, финальное состояние звезды будет описываться только гравитационной теорией Эйнштейна, согласно которой финальное состояние есть сингулярность. Возникает вопрос: видима она или нет?

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

■ Black Holes, Naked Singularities and Cosmic Censorship. Stuart L. Shapiro and Saul A. Teukolsky in American Scientist, Vol. 79, No. 4, pages 330–343; July/August 1991.

■ Black Holes and Time Warps. Kip S. Thorne. W.W. Norton, 1994.