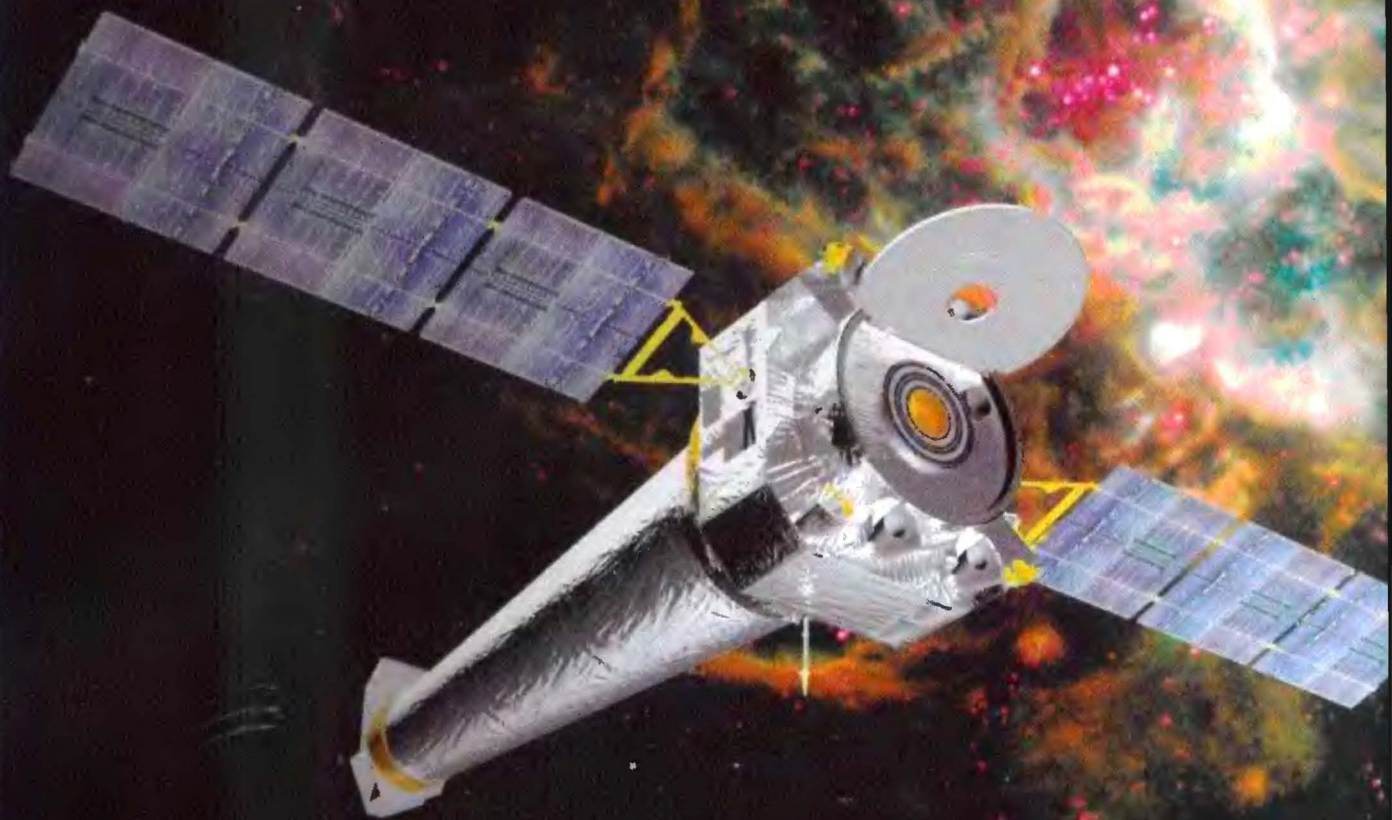


# УДИВИТЕЛЬНАЯ ИСТОРИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР

По словам известных астрофизиков Игоря Новикова и Валерия Фролова, это, возможно, наиболее фантастическая из всех концепций, созданных человеческим разумом





Научное мышление подчас конструирует объекты со столь парадоксальными свойствами, что даже самые проникательные ученые поначалу отказывают им в признании. Самый наглядный пример в истории новейшей физики – многолетнее отсутствие интереса к черным дырам, экстремальным состояниям гравитационного поля, предсказанным почти 90 лет



назад. Долгое время их считали чисто теоретической абстракцией, и лишь в 1960–1970-е годы уверовали в их реальность. Однако основное уравнение теории черных дыр было выведено не свыше двухсот лет назад.

### Озарение Джона Мичелла

Имя Джона Мичелла, физика, астронома и геолога, профессора Кембриджского университета и пастора англиканской церкви, совершенно незаслуженно затерялось среди звезд английской науки XVIII века. Мичелл заложил основы сейсмологии – науки о землетрясениях, выполнил превосходное исследование магнетизма и задолго до Кулона изобрел кругильные весы, которые использовал для гравиметрических измерений. В 1783 году он попытался объединить два великих творения Ньютона – механику и оптику. Ньютон считал свет потоком мельчайших частиц. Мичелл предположил, что световые корпускулы, как и обычная материя, подчиняются законам механики. Следствие из этой гипотезы оказалось весьма нетривиальным – небесные тела могут превратиться в ловушки для света.

Как рассуждал Мичелл? Пушечное ядро, выстреленное с поверхности планеты, полностью преодолит ее притяжение, лишь если его начальная ско-

#### СКВОЗЬ ВСЕЛЕННУЮ

Орбитальная рентгеновская обсерватория *Chandra* (“Чандра”, названа в честь нобелевского лауреата – астрофизика индийского происхождения Субраманьяна Чандрасекара), запущенная 23 июля 1999 года, – один из самых любимых инструментов астрофизиков и космологов. “Чандра” позволяет обнаруживать рентгеновские источники, многие из которых, вполне возможно, являются черными дырами, с расстояния в 10 млрд. световых лет





рость превысит значение, называемое теперь второй космической скоростью и скоростью убегания. Если гравитация планеты столь сильна, что скорость убегания превышает скорость света, выпущенные в зенит световые корпускулы не смогут уйти в бесконечность. Это же произойдет и с отраженным светом. Следовательно, для очень удаленного наблюдателя планета окажется невидимой. Мичелл вычислил критическое значение радиуса такой планеты  $R_{кр}$  в зависимости от ее массы  $M$ , приведенной к массе нашего Солнца  $M_{\odot}$ :  $R_{кр} = 3 \text{ км} \cdot M/M_{\odot}$ .

Джон Мичелл верил своим формулам и предполагал, что глубины космо-

третье издание вышло в свет в 1808-м, когда большинство физиков уже считали свет колебаниями эфира. Существование "невидимых" звезд противоречило волновой теории света, и Лаплас счел за лучшее о них не упоминать. В последующие времена эту идею считали курьезом, достойным изложения лишь в трудах по истории физики.

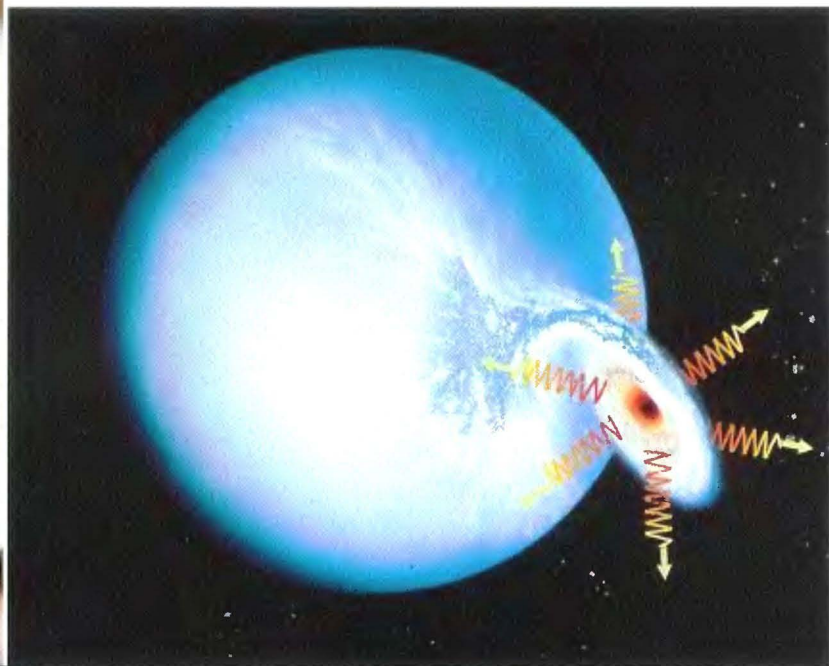
### Модель Шварцшильда

В ноябре 1915 года Альберт Эйнштейн опубликовал теорию гравитации, которую он назвал общей теорией относительности (ОТО). Эта работа сразу же нашла благодарного читателя в лице его коллеги по Берлинской академии

Из вычислений Шварцшильда следует, что тяготение звезды не слишком искажает ньютоновскую структуру пространства и времени лишь в том случае, если ее радиус намного больше той самой величины, которую вычислил Джон Мичелл! Этот параметр сначала называли радиусом Шварцшильда, а сейчас именуют гравитационным радиусом. Согласно ОТО, тяготение не влияет на скорость света, но уменьшает частоту световых колебаний в той же пропорции, в которой замедляет время. Если радиус звезды в 4 раза превосходит гравитационный радиус, то поток времени на ее поверхности замедляется на 15%, а простран-



Многие ученые были уверены, что черных дыр в природе нет. Альберт Эйнштейн считал, что обосновал это математически



**УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ** До 1970-х считалось, что черные дыры могут излучать только в случае отсасывания атмосферы соседней звезды (газ при этом сильно нагревается и начинает излучать в рентгеновском диапазоне). Однако в середине 1970-х выдающийся физик-теоретик Стивен Хокинг доказал, что черные дыры излучают так же, как обычное черное тело (правда, нагретое до очень малой температуры)

са скрывают множество звезд, которые с Земли нельзя разглядеть ни в один телескоп. Позже к такому же выводу пришел великий французский математик, астроном и физик Пьер Симон Лаплас, включивший его и в первое (1796), и во второе (1799) издания своего "Изложения системы мира". А вот

наук Карла Шварцшильда. Именно Шварцшильд первым в мире применил ОТО для решения конкретной астрофизической задачи, расчета метрики пространства-времени вне и внутри невращающегося сферического тела (для конкретности будем называть его звездой).

во приобретает ощутимую кривизну. При двукратном превышении оно искривляется сильнее, а время замедляется свой бег уже на 41%. При достижении гравитационного радиуса время на поверхности звезды полностью останавливается (все частоты обнуляются, излучение замораживается, и звезда гаснет), но кривизна пространства все еще конечна. Вдали от светила геометрия по-прежнему остается евклидовой, да и время не меняет своей скорости.

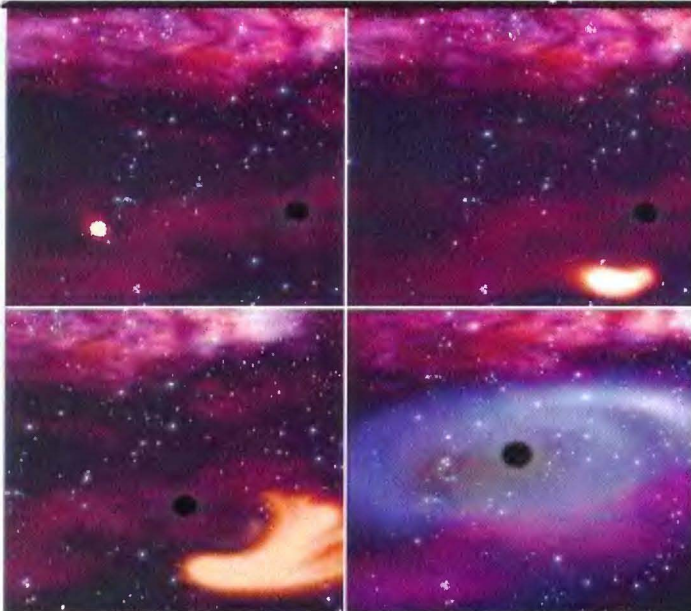


Несмотря на то, что значения гравитационного радиуса у Мичелла и Шварцшильда совпадают, сами модели не имеют ничего общего. У Мичелла пространство и время не изменяются, а свет замедляется. Звезда, размеры которой меньше ее гравитационного радиуса, продолжает светить, однако видна она только не слишком удаленному наблюдателю. У Шварцшильда же скорость света абсолютна, но структура пространства и времени зависит от тяготения. Провалившаяся под гравитационный радиус звезда исчезает для любого наблюдателя, где бы он ни находился (точнее, ее можно обнаружить по

В 1930-е годы молодой индийский астрофизик Чандрасекар доказал, что истратившая ядерное топливо звезда сбрасывает оболочку и превращается в медленно остывающий белый карлик лишь в том случае, если ее масса меньше 1,4 масс Солнца. Вскоре американец Фриц Цвикки догадался, что при взрывах сверхновых возникают чрезвычайно плотные тела из нейтронной материи; позднее к этому же выводу пришел и Лев Ландау. После работ Чандрасекара было очевидно, что подобную эволюцию могут претерпеть лишь звезды с массой больше 1,4 масс Солнца. Поэтому возник естественный вопрос – существует ли верхний предел

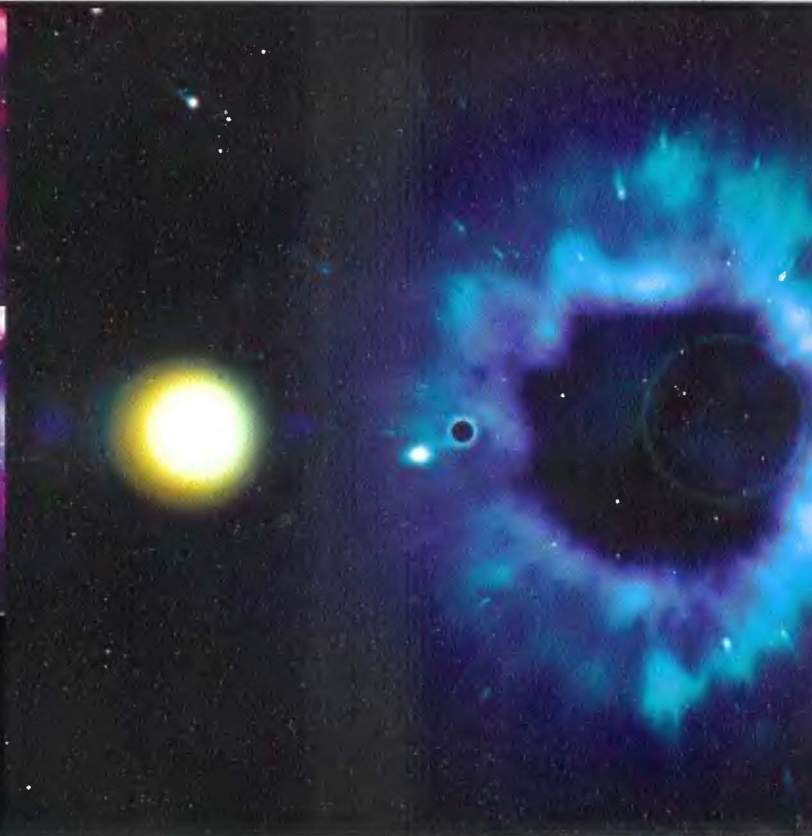
массы для сверхновых, которые оставляют после себя нейтронные звезды?

В конце 1930-х годов будущий отец американской атомной бомбы Роберт Оппенгеймер установил, что такой предел действительно имеется и не превышает нескольких солнечных масс. Дать более точную оценку тогда не было возможности; теперь известно, что массы нейтронных звезд обязаны находиться в интервале 1,5–3  $M_{\odot}$ . Но даже из приблизительных вычислений Оппенгеймера и его аспиранта Джорджа Волкова следовало, что самые массивные потомки сверхновых не становятся нейтронными звездами, а переходят в какое-то другое со-



#### НЕ ПОДХОДИТЕ БЛИЗКО

Если звезда подойдет слишком быстро к черной дыре, как это случилось в центре галактики RX J1242-11, она будет “растянута” приливными гравитационными силами, а затем буквально разорвана. Большая часть вещества звезды сможет “убежать”, но некоторая часть будет захвачена, образуя вокруг дыры вращающийся диск. Рентгеновское излучение испускается веществом диска за счет разогревания газа при падении в черную дыру



гравитационным эффектам, но отнюдь не по излучению).

#### От неверия к утверждению

Шварцшильд и его современники полагали, что столь странные космические объекты в природе не существуют. Сам Эйнштейн не только придерживался этой точки зрения, но и ошибочно считал, что ему удалось обосновать свое мнение математически.

#### МАКСИМОН

родился 40 лет назад – как термин и как физическая идея. В 1965 году академик М.А. Марков предположил, что существует верхняя граница массы элементарных частиц. Он предложил считать этим предельным значением величину размерности массы, которую можно скомбинировать из трех фундаментальных физических констант – постоянной Планка  $h$ , скорости света  $c$  и гравитационной постоянной  $G$ . Это планковская масса, те самые 22 микрограмма. Из тех же констант можно сконструировать величину с размерностью длины (выйдет длина Планка-Уилера,  $10^{33}$  см) и с размерностью времени ( $10^{43}$  с). Согласно гипотезе Маркова, испарение черной дыры приводит к образованию “сухого остатка” – максимона. Марков назвал такие структуры элементарными черными дырами. Насколько эта теория отвечает реальности – вопрос открытый. Во всяком случае, аналоги марковских максимонов возрождены в некоторых моделях черных дыр, выполненных на базе теории суперструн.

## ТАМ, ЗА ГОРИЗОНТОМ

Черная дыра – это не вещество и не излучение. С некоторой долей образности можно сказать, что это самоподдерживающееся гравитационное поле, сконцентрированное в сильно искривленной области пространства-времени. Ее внешняя граница задается замкнутой поверхностью, горизонтом событий. Если звезда перед коллапсом не вращалась, эта поверхность оказывается правильной сферой, радиус которой совпадает с радиусом Шварцшильда.

Физический смысл горизонта очень нагляден. Световой сигнал, посланный с его внешней окрестности, может уйти на бесконечно далекую дистанцию. А вот сигналы, отправленные из внутренней области, не только не пересекут горизонта, но и неизбежно “провалятся” в сингулярность. Горизонт – это пространственная граница между событиями, которые могут стать известны земным (и любым иным) астрономам, и событиями, информация о которых ни при каком раскладе не выйдет наружу.

Как и положено “по Шварцшильду”, вдали от горизонта притяжение дыры обратно пропорционально квадрату расстояния, поэтому для удаленного наблюдателя она проявляет себя как обычное тяжелое тело. Кроме массы дыры наследует момент инерции коллапсировавшей звезды и ее электрический заряд. А все остальные характеристики звезды-предшественницы (структура, состав, спектральный класс и т.п.) уходят в небытие.

Отправим к дыре зонд с радиостанцией, подающей сигнал раз в секунду по бортовому времени. Для удаленного наблюдателя по мере приближения зонда к горизонту интервалы времени между сигналами будут увеличиваться – в принципе, неограниченно. Как только корабль пересечет невидимый горизонт, он полностью замолчит для “наддырного” мира. Однако это исчезновение не окажется бесследным, поскольку зонд отдаст дыре свою массу, заряд и вращательный момент.

стояние. В 1939 году Роберт Оппенгеймер и Хартланд Снайдер на идеализированной модели доказали, что массивная коллапсирующая звезда стягивается к своему гравитационному радиусу. Из их формул фактически следует, что звезда на этом не останавливается, однако соавторы воздержались от столь радикального вывода.

Окончательный ответ был найден во второй половине XX века усилиями целой плеяды блестящих физиков-теоретиков, в том числе и советских. Оказалось, что подобный коллапс *всегда* сжимает звезду “до упора”, полностью разрушая ее вещество. В результате

поскольку выражение *trou noir* наводило на сомнительные ассоциации).

## Чернодырное излучение

Все предыдущие модели были построены исключительно на основе ОТО. Однако наш мир управляется законами квантовой механики, которые не обходят вниманием и черные дыры. Эти законы не позволяют считать центральную сингулярность математической точкой. В квантовом контексте ее поперечник задается длиной Планка-Уилера, приблизительно равной  $10^{-33}$  сантиметра. В этой области

По данным звездной статистики, в нашей Галактике существует около десяти миллионов дыр звездного происхождения

### БЛИЖАЙШЕЕ СОСЕДСТВО

В нашем ближайшем окружении есть несколько кандидатов на роль черных дыр: например, шаровые скопления M15, G1. Впрочем, не исключено, что черные дыры находятся в центре туманности Андромеды, и даже в центре нашей Галактики – Млечного Пути



ТУМАННОСТЬ АНДРОМЕДЫ  
(2,2 МЛН. СВЕТОВЫХ ЛЕТ  
ОТ МЛЧНОГО ПУТИ)



возникает сингулярность, “суперконцентрат” гравитационного поля, замкнутый в бесконечно малом объеме. (У неподвижной дыры это точка, у вращающейся – кольцо.) Кривизна пространства-времени и, следовательно, сила тяготения вблизи сингулярности стремятся к бесконечности. В конце 1967-го американец Джон Арчибалд Уилер первым назвал такой финал звездного коллапса черной дырой. Новый термин полюбился физикам и привел в восторг журналистов, которые разнесли его по всему миру (хотя французам он сначала не понравился,

обычное пространство перестает существовать. Принято считать, что центр дыры нафарширован разнообразными топологическими структурами, которые появляются и погибают в соответствии с квантовыми вероятностными закономерностями. Свойства подобного пузырящегося квазипространства, которое Уилер назвал квантовой пеной, еще мало изучены.

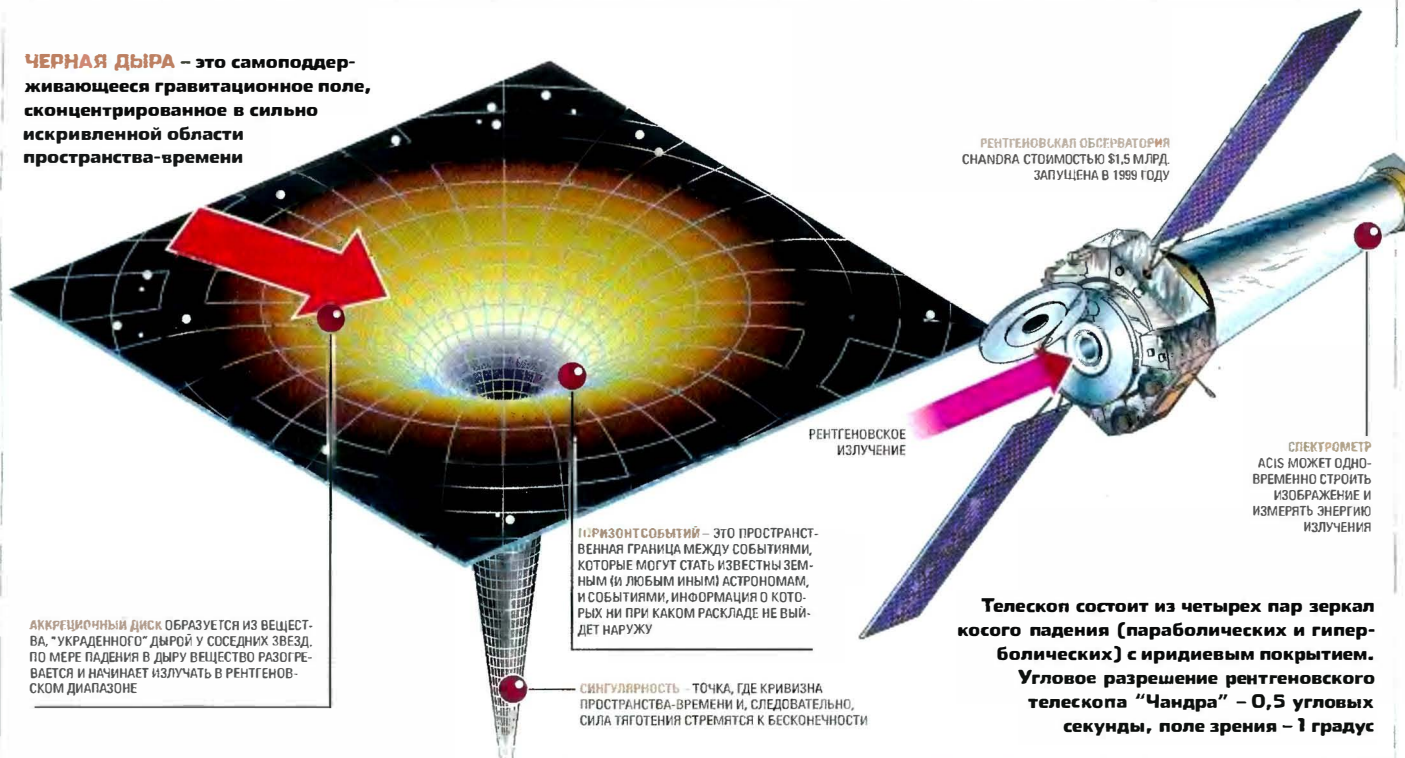
Наличие квантовой сингулярности имеет прямое отношение к судьбе материальных тел, падающих в глубь черной дыры. При приближении к центру дыры любой объект, изготовлен-



ный из ныне известных материалов, будет раздавлен и разорван приливными силами. Однако даже если будущие инженеры и технологи создадут какие-то сверхпрочные сплавы и композиты с невиданными ныне свойствами, они все равно обречены на исчезновение: ведь в зоне сингулярности нет ни привычного времени, ни привычного пространства.

Теперь рассмотрим в квантовомеханическую лупу горизонт дыры. Пустое пространство – физический вакуум – на самом деле отнюдь не пусто.

**ЧЕРНАЯ ДЫРА** – это самоподдерживающееся гравитационное поле, сконцентрированное в сильно искривленной области пространства-времени

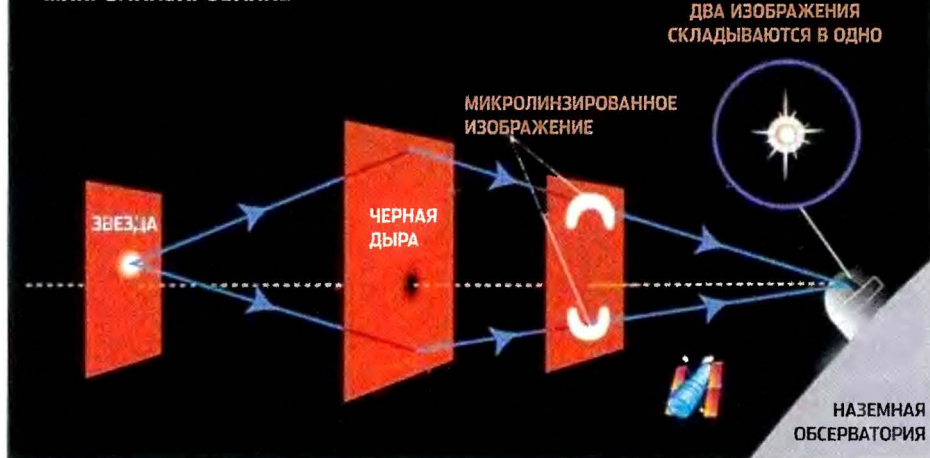


**Телескоп состоит из четырех пар зеркал косоугольного падения (параболических и гиперболических) с иридиевым покрытием. Угловое разрешение рентгеновского телескопа "Чандра" – 0,5 угловых секунды, поле зрения – 1 градус**

Из-за квантовых флуктуаций различных полей в вакууме непрерывно рождается и погибает множество виртуальных частиц. Поскольку тяготение около горизонта весьма велико, его флуктуации создают чрезвычайно сильные гравитационные всплески. При разгоне в таких полях новорожденные "виртуалы" приобретают дополнительную энергию и подчас становятся нормальными долгоживущими частицами.

Виртуальные частицы всегда рождаются парами, которые движутся в противоположных направлениях (этого требует закон сохранения импульса). Если гравитационная флуктуация извлечет из вакуума пару частиц,

**ГРАВИТАЦИОННОЕ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ**



**Мощное рентгеновское излучение – не единственный способ обнаружения черных дыр. Мощное гравитационное поле вокруг дыры работает как гравитационная линза**