**ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ЧЕРНЫХ ДЫР**

## СОДЕРЖАНИЕ

Особенности сил тяготения
Что такое черная дыра?
Краткие сведения об общей теории относительности Эйнштейна
Сферически-симметричный гравитационный коллапс
Вращающиеся и заряженные черные дыры
Общие свойства черных дыр
Эволюция звезд и черные дыры
Как обнаружить черную дыру?
Энергетика черных дыр
Квантовые эффекты в черных дырах
Первичные черные дыры
Черные дыры, термодинамика, информация
Что внутри черной дыры?
Вместо заключения: проблемы и гипотезы
Литература

## ОСОБЕННОСТИ СИЛ ТЯГОТЕНИЯ

Одним из наиболее удивительных предсказаний теории тяготения Эйнштейна является возможность существования черных дыр — компактных массивных объектов, обладающих столь сильным гравитационным полем, что никакие физические тела, никакие сигналы не могут вырваться из них наружу. И хотя черные дыры с полной достоверностью пока еще не открыты, имеется немало причин, по которым они привлекают к себе в последние годы пристальное внимание ученых. По-видимому, наиболее важной из них является то, что обнаружение черных дыр имело бы значение, далеко выходящее за рамки астрофизики, поскольку речь идет не об открытии еще одного, быть может, довольно удивительного астрофизического объекта, а о проверке правильности наших представлений о свойствах пространства и времени в сильных гравитационных полях.

Теоретические исследования свойств черных дыр и возможных следствий гипотезы об их существовании особенно интенсивно развивались последние 15 ,Лет. Наряду с изучением тех особенностей черных дыр, которые важны для понимания **их** возможных астрофизических проявлений, теоретические исследования позволили обнаружить ряд неожиданных закономерностей, ирису-1Дих физическим взаимодействиям с участием черных Дыр и установить глубокую связь физики черных дыр. С такими на первый взгляд далекими областями, как Термодинамика и теория информации. О черных дырах, их месте в астрофизике и об их удивительных свойствах и пойдет речь ниже.

Самое “слабое” взаимодействие. За возникновение черных дыр ответственны силы тяготения, вероятно, самого удивительного из всех известных физике взаимодействий, Начнем с того, что гравитационное взаимодействие — самое слабое. О его слабости можно судить,

например, по такому факту. Если принять за единицу энергию ядерного (сильного) взаимодействия между двумя протонами на расстоянии порядка размера протона, 2\*10-14 см, то энергия их электромагнитного взаимодействия будет в e2/-hc~1/137 Раз (-h - аш с чертой) меньше, энергия слабого взаимодействия достигает 10-5, а энергия гравитационного притяжения составит всего лишь 10-38. И несмотря на это, силы тяготения не только были открыты первыми, а закон Ньютона, описывающий эти силы, послужил отправной точкой для описания других взаимодействий, но и в подавляющем числе явлений в астрофизике и космологии гравитация играет основную роль. Причина этого состоит в том, что тяготение обладает рядом замечательных свойств, ведущих к его многократному усилению, не будь которого, это взаимодействие скорее всего вообще не было бы открыто. Что же это зa свойства?

Гравитационные силы — дальнодействующие. Свойство дальнодействия означает, что сила, действующая на пробную частицу со стороны тела, создающего поле, медленно, по степенному закону, уменьшается с расстоянием. Благодаря этому свойству пробная частица испытывает тяготение со стороны всех частей массивного тела, в том числе и достаточно от нее удаленных. Этим свойством наряду с тяготением обладает Электромагнитное взаимодействие, в то время как сильное и слабое взаимодействия являются короткодействующими и имеют малые радиусы действия. Физическая причина такого различия состоит в том, что кванты, переносчики сильного и слабого взаимодействия, обладают ненулевой массой покоя, что приводит к экспоненциально быстрому убыванию силы на расстояниях, превышающих комптоновскую длину волны lambda *=* -*h/тс* этих квантов. Радиусы действия сильного и слабого взаимодействий ~ 10-13 и 10-17 см соответственно. Кванты электромагнитного поля, фотоны, и кванты гравитационного поля, гравитоны, — частицы безмассовые, и сила взаимодействия между парой электрических зарядов или массивных тел убывает по известному степенному закону: сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Гравитационные силы имеют один знак. Между электромагнитным и гравитационным взаимодействиями имеется, однако, существенное отличие. В природе существуют электрические заряды двух видов: положи-

тельные и отрицательные, причем одноименные заряды отталкиваются. Это приводит к тому, что в макроскопических телах электрический заряд обычно практически скомпенсирован, в противном случае они были бы разорваны на части мощными силами электростатического отталкивания. Более того, при отсутствии, сторонних сил процессы в системах с заряженными телами протекают таким образом, чтобы уменьшить потенциальную энергию, при этом заряды противоположных знаков будут компенсироваться. Все это приводит к тому, что в естественных условиях электрический заряд макроскопических тел оказывается пренебрежимо малым,

Напротив, “заряды тяготения” — массы — всегда имеют один и тот же знак, причем они не отталкиваются, а притягиваются друг к другу. При этом чем тело массивнее, тем оно более устойчиво относительно “развала”. Для гравитационного взаимодействия характерен следующий, механизм самоусиления: массивное тело притягивает к себе вещество, падающее вещество увеличивает массу тела и, следовательно, его способность. Притягивать. Силы тяготения, ничтожно малые для отдельных элементарных частиц, суммируясь при составлении из них макроскопического тела, могут достигать огромной величины, вырастая в космическом масштабе, в могучий, нередко определяющий фактор. При этом малость константы гравитационного взаимодействия компенсируется большой величиной гравитационного заряда. Описанный выше механизм самоусиления приводит к тому, что в тех масштабах, в которых тяготение доминирует над другими взаимодействиями, однородное распределение вещества оказывается неустойчивым и рост случайных неоднородностей вызывает развитие, в частности, таких наблюдаемых структур, как планеты, звезды, галактики и скопления галактик.

Универсальность гравитационного взаимодействия. Гравитационное взаимодействие обладает еще одним, крайне важным, отличительным свойством — оно универсально. Для каждого из остальных, перечисленных выше взаимодействий существуют нейтральные частицы, тогда как все объекты, существующие в природе (включая и поля), порождают гравитационное поле. В роли гравитационного заряда выступает полная масса *т* системы, которая, как учит специальная теория

относительности, связана с полной энергией системы Е соотношением *т=Е/с2.* Именно поэтому все объекты природы, обладая энергией, непременно участвуют в гравитационном взаимодействии. “Весит”, в частности, и само гравитационное поле, что приводит к существенной нелинейности уравнений Эйнштейна, описывающих тяготение.

## ЧТО ТАКОЕ ЧЕРНАЯ ДЫРА?

Вывод Лапласа. Гравитационное поле тем сильнее, чем больше масса тела и чем меньше размер области пространства, в которой это тело сосредоточено. Еще в 1795 г. великий французский математик Пьер-Симон Лаплас, исследуя распространение света в поле тяготения, пришел к выводу, что в природе могут встречаться тела, абсолютно черные для внешнего наблюдателя. Поле тяготения таких тел настолько велико, что не вы пускает наружу лучей света. На языке космонавтики 9то означает, что вторая космическая скорость была бы больше скорости света *с.* Вывод Лапласа основывался на следующем рассуждении. Для того чтобы преодолеть гравитационное притяжение, создаваемое телом с массой *М,* и улететь на бесконечность, пробное тело на поверхности этого тела радиуса R должно обладать скоростью *v,* такой, что *v*2*/2>=GM/R.* Считая, что это соотношение применимо для света, мы вместе с Лапласом приходим к заключению, что если масса объекта сосредоточена в области с радиусом, меньшим так называемого гравитационного радиуса тела? *Rg :Rg=* =2GМ/с2~=~1,5-10-28 *М* (масса *М* измеряется в граммах, R*g —* в сантиметрах), то даже свет не выйдет за пределы этой области. Для Солнца гравитационный радиус — около 3 км, для Земли — порядка 1 см.

Теория Эйнштейна — ключ к проблеме черных дыр. Вывод Лапласа, строго говоря, является ошибочным, поскольку он основан на классической механике и 'теории тяготения Ньютона. В действительности, однако, нельзя пользоваться ни той, ни другой: распространение света подчиняется законам релятивистской механики, а сильное поле тяготения, т. е. поле, гравитационный потенциал которого phi = GM/R в единицах с2 порядка единицы: phi/с2~1, описывается общей теорией относительности. Тем не менее, как это иногда случается в истории

науки, обе “ошибки” Лапласа точно скомпенсировали друг друга и вывод о невозможности выхода световых сигналов из-под гравитационного радиуса оказался совершенно правильным. Более того, связанный со специальной теорией относительности и справедливый в общей теории относительности запрет на существование в природе сигналов, переносящих информацию со скоростью, большей скорости света, придал утверждению о невозможности получения какой-либо информации о событиях, происходящих под гравитационным радиусом, еще более категорический смысл.

..Подобное тело, сжатое до размера своего гравитационного радиуса, получило название черной дыры, а границу черной дыры, т. е. поверхность, ограничивающую область, откуда невозможен выход сигналов, стали называть горизонтом событий. Хотя вывод Лапласа о возможности существования черных дыр сохраняется и в общей теории относительности Эйнштейна, само описание этого объекта имеет существенные отличия. Прежде чем перейти к точному определению черных дыр и к рассказу об их удивительных свойствах, необходимо хотя бы несколько слов сказать об эйнштейновской теории гравитации.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

Принцип эквивалентности. Общая теория относительности, в окончательной форме сформулированная Эйнштейном в 1915 г., возникла в результате попытки построения релятивистского обобщения теории тяготения Ньютона, т. е. приведения теории Ньютона в соответствие с принципом конечности скорости распространения взаимодействия и с законами специальной теории относительности. Исходным пунктом для построения общей теории относительности явился принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс. Согласно этому принципу отношение гравитационной массы mгр, определяющей силу F, действующую на тело в гравитационном поле напряженности T:F = mгрГ, к инертной массе тин, связывающей силу *F* и величину вызываемого ею ускорения *a:F = mинa,* не зависит от свойств и состава тела. Поэтому ускорение пробного тела в трави-

рационном поле определяется только напряжённостью поля в точке, где тело находится. Иными словами; "в гравитационном поле зависимость от времени положения пробного точечного тела, его мировая линия, однозначно определяется начальным положением тела и его скоростью. Тем самым задача изучения движения частиц в гравитационном поле сводится к изучению геометрии мировых линий. В отсутствие поле тяготения мировые линии движения свободных частиц являются прямыми, т. е. кратчайшими, линиями между произвольной парой точек, лежащих на них. Оказывается, что при наличии гравитационного поля мировые линии пробных тел тоже можно считать “кратчайшими”, если только отказаться от предположения о том, что простр?а нет вовремя — плоское, и подобрать его геометрию соответствующим образом.

Гравитация как геометрия. Геометрия искривленного пространства определяется заданием расстояния между произвольной парой близких точек этого пространства. Тем самым определяется понятие длины любой кривой в таком пространстве. “Кратчайшие” кривые Лосят название геодезических. В заданных координатах квадрат расстояния ds2 между парой близких точек 'с координатами *хмю* и *х'+dxмю* в точке *х* определяется следующим образом: ds2 = g*мюню* *(х)dхмю dхню, .* Набор функций g*мюню* , задающий *в* каждой координатной системе pdc-стояние между близкими точками, называется метрикой. В плоском пространстве-времени координаты можно выбрать так, что функции g*мюню* постоянны во всем пространстве-времени и метрика имеет вид: ds2 = эта*мюню dxмюdx' -= (тождественно=) —C2dt2 + dx2 + dy2 + dz2.* В общем случае *это* невозможно. Самое большее, чего удается достичь за счет выбора координат, это добиться совпадения метрики *gмюню (х) В* Окрестности ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКИ *x0* С эта*мюню с* точностью до величин второго порядка малости.

Предположим теперь, что в гравитационном поле свободно движется невращающееся пробное тело. Свяжем с ним систему отсчета и, воспользовавшись принципом эквивалентности, постараемся описать в этой системе явления, происходящие в окрестности тела. Прежде всего заметим, что если мы ограничимся областью пространства-времени, размеры которой *I* много меньше характерной длины *L,* на которой гравитационное ноле

заметно изменяется, то ускорения всех тел в такой окрестности практически совпадают и относительно выбранной нами системы отсчета такие тела будут двигаться равномерно и прямолинейно. Иными словами, переходом к свободно падающей системе отсчета можно локально исключить гравитационное поле. В такой системе отсчета движение тел подчиняется законам, специальной теории относительности, а отклонение от этих законов тем меньше, чем меньше величина отношения H*L,*

Строго говоря, сделанный вывод о возможности, две-дения путем перехода к падающей системе отсчета задачи о движении в гравитационном поле к задаче о движении в инерциальной системе отсчета вне поля тяготения, т. е. к задаче специальной теории относительности, непосредственно касается только механических явлений. Заметим, однако, что осуществленная с крайне высокой степенью точности экспериментальная проверка равенства инертной и гравитационной массы { Вариация отношения mгр/mин при выборе различных веществ не превышает величины 10-12. Этот лучший в настоящее время результат был получен в 1971 г. в МГУ в группе В. Б. Брагинского.} позволяет распространить этот вывод на широкий класс немеханических явлений и сделать далеко идущие выводы о характере взаимодействия вещества и физических полей с гравитацией.

Дело в том, что свой вклад в полную энергию системы, а следовательно, и в ее инертную массу, вносят не только механические массы покоя частиц, входящих в состав системы, но и кинетическая энергия, связанная с их движением, а также и потенциальная энергия электромагнитного, сильного, слабого и самого гравитационного взаимодействий частиц друг с другом. Тот факт, что гравитационный заряд, равный гравитационной массе системы, совпадает с ее полной инертной массой, означает, что каждое из взаимодействий дает свой вклад в вес тела.

Объяснить эти экспериментальные результаты можно, лишь предположив, что принцип эквивалентности справедлив не только для механических движений, т. е. что выполняется более общий, так называемый принцип эквивалентности Эйнштейна, гласящий, что результат любого (не обязательно механического) локального эксперимента, выполненного в свободно падающей системе отсчета, не зависит от того, где и когда во Вселенной этот эксперимент был выполнен, и от того, с какой скоростью двигалась система отсчета. Согласно этому принципу для описания взаимодействия любой системы с гравитационным полем достаточно знать закон, управляющий поведением системы в инерциальной системе отсчета. Поведение системы в гравитационном поле, описываемом метрикой *gмюню ,* определяется простым пересчетом с помощью преобразования координат. Эта задача имеет чисто геометрический характер.

Приливные силы и кривизна пространства-времени. Если гравитационное поле неоднородно, то исключить его путем перехода к падающей системе отсчета сразу во всем пространстве или в конечной, но не очень малой области не удается. Действительно, рассмотрим, например, относительное движение в гравитационном поле Земли двух частиц, расположенных на расстоянии l друг от друга и падающих по радиусу к ее центру (рис. 1). При этом движении частицы *1 к 2* сближаются, ускорение их относительного сближения равно G*Ml/R3.* Частицы *3* и *4* удаляются друг от друга с относительным ускорением *2GMl/R3.* Это означает, что при

движении протяженного тела в неоднородном гравитационном поле в нем возникают так называемые приливные силы, стремящиеся его деформировать. Относительное приливное ускорение пары точек тела пропорционально расстоянию между этими точками и зависит от их взаимного расположения. Тензорный коэффициент пропорциональности характеризует степень неоднородности гравитационного поля и носит название тензора кривизны пространства-времени.

Поскольку гравитационное взаимодействие универсально к не существует “нейтральных” по отношению к нему тел, то оказывается невозможным в чисто гравитационных экспериментах измерить “напряженность” гравитационного поля. Подобные эксперименты позволяют определить только относительные ускорения, т. е. кривизну пространства-времени. Пространство-время является плоским, если его кривизна всюду обращается в ноль. В случае если кривизна не равна нулю, метрика не может быть плоской, однако в окрестности любой точки ее можно привести к виду:

*gмюню* (x)=eta*мюню* + (кривизна пространства-t)\**(х-x0)2 +(поправки порядка* *(х—х0)3 )*

Уравнения Эйнштейна. Согласно Эйнштейну, кривизна пространства-времени пропорциональна плотности энергии-импульса вещества, порождающего гравитационное поле. Соответствующие уравнения, позволяющие определить метрику по заданному распределению вещества и тем самым восстановить геометрию пространства-времени, носят название уравнений Эйнштейна. В пределе, когда гравитационное поле слабое, т. е. гравитационный потенциал phi (ф) много меньше с2 и движение источника нерелятивистское, уравнения Эйнштейна сводятся к обычному уравнению для гравитационного потенциала в теории Ньютона. Тем самым предсказания теории Эйнштейна для слабых гравитационных полей носят характер малых поправок ~ф/с2 к известным результатам теории Ньютона. Именно эти поправки подвергаются экспериментальной проверке. Результаты всех наблюдений и экспериментов по проверке общей теории относительности, включая такие, как измерение красного смещения и запаздывания световых сигналов в гравитационном поле, измерение сдвига перигелия Меркурия и отклонение лучей света Солнцем, подтверждают эту теорию в области слабого поля, допуская отклонение от нее не более нескольких процентов.

Наиболее радикально отличаются предсказания теории Эйнштейна от ньютоновской теории гравитации в случае, когда гравитационное поле нельзя считать слабым. Качественно новым в этом случае является предсказание теорией Эйнштейна возможности нетривиальных глобальных свойств пространства-времени. Это касается прежде всего космологии, когда рассматриваются, области пространства и интервалы времени порядка-радиуса кривизны пространства-времени. В частности наше пространство может обладать нетривиальной топологией и походить не на плоскость, а на расширяющуюся сферу, являясь замкнутым, имея конечный объем, но не обладая никакими границами.

Возможность существования черных дыр — другое предсказание теории Эйнштейна — связана с появлением нетривиальной причинной структурой, которая проявляется в наличии в пространстве-времени областей, откуда невозможно получение никакой информации наблюдателями, расположенными вне этой области.

Отсутствие экспериментальной проверки теории Эйнштейна в области сильного поля, именно там, где предсказания этой теории носят весьма специальный характер, оставляет в принципе открытой возможность для развития других, отличных от теории Эйнштейна теорий гравитации. За время, прошедшее с момента создания общей теории относительности, такие попытки предпринимались неоднократно. Практически все рассматриваемые в настоящее время модификации теории гравитации принимают принцип эквивалентности и являются метрическими, т. е. описывают действие гравитационного поля на вещество в терминах искривленного пространства-времени. Основные расхождения касаются формы уравнений самого гравитационного поля:

Новая теория гравитации получает право на жизнь лишь после того, как подтверждается ее пригодность для описания результатов экспериментов в слабом гравитационном поле. Общим для большинства из развитых вариантов оказалось предсказание возможности су\* шествования отрицательных энергий, так что при гравитационном излучении в двойной системе в таких теориях предсказывается увеличение (а не уменьшение!) расстояния между телами. Такие варианты, на наш взгляд, не следует считать разумными. И хотя до сих пор теория Эйнштейна является непревзойденной по красоте, строгости и экономности предпосылок, лежащих в (fee основании, и большинство физиков считают ее справедливой, в роли окончательного судьи в этом вопросе должен выступить опыт. Именно поэтому обсуждение свойств черных дыр и возможности наблюдения их с целью проверки предсказаний теории Эйнштейна в сильных гравитационных полях приобретают такое важное значение. Ниже, рассказывая о черных дырах, мы опираемся на результаты, полученные в рамках общей теории относительности.

Диаграммы пространства-времени. Исследование свойств гравитационного поля естественным образом разбивается на несколько этапов. Во-первых, необходимо найти решение уравнений Эйнштейна для интересующего нас случая. Не последнюю роль при этом играет удобный выбор координатной системы. При попытке наглядного изображения свойств решения уравнения Эйнштейна возникает проблема, как отразить свойства четырехмерного пространства-времени, да к тому же еще искривленного, на плоском рисунке. К счастью, многие из интересных решений обладают симметрией, т. е. метрика не зависит существенным образом от одной или нескольких переменных, и не теряя общности, можно изобразить на рисунке трехмерное или даже двух мерное сечение такого пространства. Для того чтобы на подобной диаграмме пространства-времени отразить существенные свойства метрики, удобно показать расположение локальных световых конусов, соответствующих данной метрике. Такой локальный световой конус с вершиной в точке *хмю* является геометрическим местом точек *-хмю + dxмю* близких *к хмю* и удовлетворяющих условию g*мюню* *(x)dxмю-* dx*ню* = 0. Образующие локального светового конуса изображают движение световых лучей. Пробным массивным частицам соответствуют линии, проходящие через вершину внутрь светового конуса. Картина рас положения локальных световых конусов позволяет не только ответить на многие вопросы, связанные с особенностями движения в найденном гравитационном поле; но и дает ясное представление о причинной структуре пространства-времени.

## СФЕРИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНЫЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

Черная дыра (строгое определение). На рис. *2* представлена диаграмма пространства-времени, изображающая процесс возникновения черной дыры в результате самопроизвольного сжатия — гравитационного коллапса массивного тела сферической формы. Решение, описывающее гравитационное поле вне такого тела, было получено в 1916 г. К. Шварцшильдом, и поэтому часто не вращающуюся и незаряженную черную дыру, описываемую этим решением, называют “шварцшильдовской”, Диаграмма построена на основе этого решения, и расположение локальных световых конусов на ней позво

Рис. 2. Диаграмма пространства-времени при сферическом ' коллапсе. Достаточно массивное тело с течением времени : сжимается под действием сил тяготения, пересекает горизонт Событий и в конце концов сжимается в точку. Цифрами обозначены локальные световые конуса. Сигнал из точек 1 и *2* может дойти до внешнего наблюдателя, из точек *3* и *4,* т. е. из-под гравитационного радиуса, **не** может

лдет судить о характере движения пробных частиц и лучей, света в гравитационном поле черной дыры. Действие гравитационного поля проявляется в том, что наклон локальных световых конусов к центру тем больше, чем ближе к центру находится вершина конуса. На поверхности гравитационного радиуса *r=Rg=2GM/c2* наклон локального светового конуса (он обозначен цифрой *3* на рисунке) настолько велик, что луч света, идущий наружу, увлекаемый действием мощного гравитационного поля, не может выйти к отдаленному наблюдателю и остается все время на одном и том же расстоянии от центра, равном гравитационному радиусу. Под гравитационным радиусом гравитационное поле вырастает до такой величины, что оно заставляет любые частицы и свет двигаться только в направлении центра.

Поэтому область, лежащая под гравитационным радиусом, оказывается невидимой для любого наблюдателя, покоящегося снаружи. Эта область получила название черной дыры.

Рассматриваемый нами случай — коллапс сферического тела — является простейшим. Черные дыры могут образовываться и в более общих ситуациях, при коллапсе несферических или вращающихся тел. Для образования черной дыры тело должно сжаться так, чтобы его максимальный размер не превосходил величины порядка гравитационного радиуса. Возникновение черной дыры означает, что гравитационное поле возросло до такой величины, что удерживает в ограниченной области пространства все частицы и световые лучи и не дает им вылететь наружу. В соответствии с этим черной дырой в самом общем случае называют область пространства-времени, откуда невозможен выход никаких сигналов к отдаленному наблюдателю. Граница невидимой для внешнего наблюдателя области получила название горизонта событий. Линии, образующие поверхность горизонта событий, совпадают с мировыми линиями пробных световых лучей.

Наличие резкой границы принципиально отличает черную дыру в теории Эйнштейна от “лапласовой черной дыры”. В последнем случае любые захваченные световые лучи, испущенные наружу, прежде чем начнут падать внутрь немного отойдут от центра.

Гравитационный коллапс с точки зрения падающего наблюдателя. Картина коллапса существенно зависит от того; падает ли наблюдатель вместе с коллапсирующмй телом или же покоится на большом расстоянии от него. В первом случае наблюдатель, находясь на поверхности Сжимающегося тела, не отметит никаких качественных особенностей при переходе вещества через гравитационный радиус. Он будет продолжать регистрировать непрерывное возрастание плотности вещества и приливных сил. Приливные силы будут растягивать тела в направлении падения и сжимать их в поперечном направлении. Поэтому, если мы хотим, чтобы наблюдения продолжались как можно дольше, надо позаботиться о том; чтобы сделать наблюдателя или заменяющий его прибор из чрезвычайно стойкого материала. Однако и в этом случае им не удается спастись от разрыва, поскольку, начиная с некоторого момента, приливные силы станут больше сил, удерживающих электроны в атомах. При падении в черную дыру с массой порядка солнечной это произойдет на расстоянии в несколько десятков микрон от центра. Еще ближе к центру приливные силы превзойдут ядерные.

После попадания под гравитационный радиус движение до центра займет по часам падающего наблюдателя время порядка *Rg /с.* Для черной дыры солнечной массы это время составляет 10-5 с. Момент пересечения гравитационного радиуса сопутствующий наблюдатель может установить следующим образом. Представим себе, что время от времени этот наблюдатель заставляет вспыхнуть поверхность коллапсирующего тела и измеряет, как изменяется площадь поверхности сферического фронта выходящей волны. Пересечению поверхностью тела горизонта событий соответствует момент, начиная с которого, площадь фронта от вспышки не возрастает, *А* уменьшается.

Остановить коллапс тела, попавшего под горизонт событий, невозможно. Для этого потребовалось бы создать такие условия, при которых частицы поверхности остановили бы свое падение и начали двигаться наружу. Это означает, что скорость их движения должна стать больше скорости света, что противоречит принципу причинности. Согласно общей теории относительности, сжатие вещества, попавшего внутрь черной дыры, продолжается до тех пор, пока его плотность не достигает бесконечно большого значения. При этом образуется сингулярность, т. е. особенность в пространстве-времени, характеризуемая формально бесконечным значением кривизны. Фактически это означает, что в окрестности таких точек нельзя пренебрегать эффектами, которые могли бы привести к модификации уравнений Эйнштейна и которые малы лишь при малых кривизнах. Подобную роль могут играть, например, квантово-гравитационные эффекты.

Картина коллапса с точки зрения удаленного наблюдателя. Удаленный наблюдатель никогда не увидит, что происходит внутри черной дыры. При подходе сжимающейся поверхности тела к гравитационному радиусу увеличивается запаздывание выходящих с поверхности тела наружу сигналов. Поэтому удаленный наблюдатель видит коллапсирующее тело как бы застывающим, а размер его быстро, по экспоненциальному закону, приближающимся к гравитационному радиусу. Выходящие лучи, испытывая возрастающее красное смещение в гравитационном поле, приходят все более и более “покрасневшими”. Мощность излучения быстро падает и за времена порядка *Rg/c* после сжатия коллапсирующего тела до размера порядка гравитационного радиуса, внешний наблюдатель перестает его видеть: образуется черная дыра. Эта “дыра” действительно черная. Обладая ограниченной энергией, коллапсирующее" тело до пересечения горизонта событий способно излучить на бесконечность лишь конечное число световых квантов, так что после момента выхода наружу последнего излученного кванта из черной дыры больше не выходит никакой информации. Начиная с некоторого момента, оказывается невозможной также попытка получить информацию о сколлапсировавшем теле с помощью посланной вслед этому телу ракеты. Дело в том, что когда эта ракета достигнет гравитационного радиуса, она, конечно же, не обнаружит там сколлапсировавшее тело. В этом смысле воспринимаемая внешним наблюдателем картина застывания тела у гравитационного радиуса напоминает улыбку знаменитого чеширского кота из книги Льюиса Кэрролла “Алиса в стране чудес”, которая оставалась после исчезновения самого кота.

## ВРАЩАЮЩИЕСЯ И ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

**Вращающаяся черная дыра. Эффект Лензе—Тиррин**га. Вращение тела может существенно изменить ситуацию. Если скорость вращения велика, то возникающие центробежные силы способны помешать коллапсу тела, приводя, например, к его разрыву на части еще до образования черной дыры. Если масса каждой части меньше критической, то этот процесс фрагментации может вообще предотвратить образование черной дыры. К сожалению, очень трудно провести количественные расчеты в подобном случае. Следует, однако, ожидать, что вращение существенным образом изменит картину коллапса, если первоначальный угловой момент J тела превышает величину *GM2/c.*

Однако если вращение коллапсирующего тела недостаточно велико, чтобы помешать сжатию его до размеров меньше или порядка гравитационного радиуса

(J/(GM2/c)<<l), то черная дыра может образоваться. Гравитационное поле возникшей вращающейся черной дыры обладает рядом особенностей, позволяющих отличить подобную черную дыру от черной дыры, образующейся при коллапсе невращающегося тела. Дело в том, что согласно общей теории относительности любое вращающееся массивное тело стремится вовлечь во вращение окружающее его пространство-время. Это явление называется эффектом Лензе — Тирринга или эффектом увлечения инерциальных систем. Эффект увлечения проявляется в появлении дополнительных сил, сходных с силой Кориолиса, действующих на пробные тела, двигающиеся в гравитационном поле. Если вдали от вращающегося тела, обладающего угловым моментом J, на расстоянии *R* поместить гироскоп, то эти дополнительные силы вызывают его прецессию с угловой скоростью

{->A - означает вектор А (стрелка над А)}

*->Q = Gc-2R-3[->J —* 3*->*n(*->J->*n)]. Здесь *->п —* единичный вектор направления оси гироскопа. Измеряя угловую скорость прецессии гироскопа в поле вращающейся черной дыры, можно определить ее угловой момент и тем самым угловой момент сколлапсировавшего тела J.

Эргосфера. По мере приближения к вращающейся черной дыре одновременно усиливаются два эффекта: растет поле тяготения и усиливается эффект увлечения. Точное решение уравнений Эйнштейна, описывающее гравитационное поле вращающейся черной дыры, было получено в 1963 г. Роем Керром, Соответствующая этому решению диаграмма пространства-времени изобра жена на рис. 3. Анализ решения Керра показывает, что прежде чем мы достигнем горизонта событий, размер которого определяется выражением *r = Rq тождественно= GMc-2(1+ +* + sqrt(1-*(Jc/GM2)2) ),* эффект увлечения возрастает на столько, что оказывается невозможным ему противодействовать2. Это приводит к тому, что внутри поверхности, получившей название предела статичности и определяемой условием

*r=Rgтождественно=GM/c2(1+sqrt[1-(Jc/GM2)2cos teta ] )*

все тела увлекаются во вращение по направлению вращения черной дыры (teta — угол от оси вращения). Остановить это вращение, не вылетев наружу за предел статичности, невозможно. (Для этого потребовалось бы сообщить телу сверхсветовую скорость.) Область вокруг

----2 При |J|>GМ2/с черная дыра не образуется.

Рис, 3. Диаграмма пространства-времени вращающейся черной дыры

вращающейся черной дыры, лежащая между пределом статичности и горизонтом событий, получила название эргосферы. В отличие от области, лежащей под горизонтом событий, в эргосфере частицы могут двигаться, как приближаясь, так и удаляясь от черной дыры, и, в частности, могут покинуть эргосферу, вылетев наружу. Горизонт событий в общем случае играет роль односторонней мембраны, пропуская частицы и сигналы только в одном направлении — внутрь. -

Угловая скорость вращения черной дыры. Падающий наблюдатель пересекает предел статичности и горизонт событий за конечное время по собственным часам, регистрируя при этом лишь непрерывное возрастание приливных сил. Для внешнего наблюдателя процесс приближения к горизонту -событий как пробной частицы, так и самого коллапсирующего тела затягивается на бесконечно большое (по его часам) время. При этом оказывается, что, подходя к горизонту событий, все те-

Рис. 4. “Вид сверху” по оси вращения на вращающуюся черную дыру. Малые окружности соответствуют положениям фронта волны излучения через малый промежуток времени после испускания волны в точках /, *2, 3, 4.* Эффект увлечения в эргосфере настолько велик, что никакое физическое тело не может в ней покоиться относительно удаленного наблюдателя

ла приобретают одну и ту же угловую скорость вращения, равную OMEGA=(J/M)[R2g +(J/Мс)2]-1. Эта величина получила название угловой скорости вращения черной дыры. OMEGAпостоянна на поверхности черной дыры. В этом смысле вращение черной дыры напоминает вращение твердого тела. Так же как и при коллапсе невращающегося тела, возрастающее красное смещение при приближении поверхности тела к горизонту и падение по экспоненциальному закону мощности излучения, выходящего к отдаленному наблюдателю, приводят к тому, что через характерные времена порядка *Rg /c* перестает выходить наружу информация и образуется черная дыра. Заряженные черные дыры. Если коллапсирующее тело обладало электрическим зарядом, то возникающая черная дыра “помнит” об этом. Падение электрического заряда *Q* в черную дыру приводит к тому, что поток электрического поля через ее поверхность оказывается равным 4piQ в полном соответствии *с* теоремой Гаусса. Силовые линии электрического поля выходят из черной дыры, и вне ее имеется электрическое поле. Если черная дыра не вращается, то это поле описывается законом Кулона. Вращение заряженной черной дыры с массой *М* и угловым моментом J приводит к дополнительному появлению дипольного магнитного поля, причем магнитный момент оказывается равным: мю= (Q/M)J. Соответствующее точное решение уравнений Эйнштейна, обобщающее решение Керра на случай, когда черная дыра обладает электрическим зарядом, было получено в 1965 г. в работе группы американских теоретиков во главе с профессором Эзрой Ньюмапом. Как выяснилось позднее, это решение, получившее название решения Керра—Ньюмана, однозначно определяемое тремя параметрами: *М -* массой, J — угловым моментом и *Q —*электрическим зарядом, является самым общим из возможных решений, описывающих стационарную черную дыру в пустоте. Геометрические свойства керр-ньюмановской черной дыры весьма сходные с описанными выше свойствами керровской черной дыры.

Поверхность черной дыры при наличии вращения перестает иметь сферическую форму. Площадь поверхности керр-ньюмановской черной дыры равна

A = 4pi [R2g + *(J/Mc)2]* =4piG2с-4(2M2—Q2/G+.

+ 2Мsqrt[*M2—Q2/G—J2c2/G2M2]).*

При описании свойств черных дыр важную роль играет так называемая поверхностная гравитация kappa

При отсутствии вращения и заряда kappa*=c4/GM=GM/*R2g Эта величина хaрактеризует “напряженность” гравитационного поля на поверхности черной дыры. Электрический потенциал на поверхности черной дыры равен

## ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНЫХ ДЫР

Несферический гравитационный коллапс. При сжатии сферически-симметричного тела гравитационное поле вне этого тела остается неизменным (статическим). Это утверждение в общей теории относительности известно как теорема Биркгофа. При коллапсе вращающихся тел и тел несферической формы гравитационное поле оказывается нестационарным — происходит излучение гравитационных волн. Черная дыра, возникающая в результате этого коллапса, также нестационарна, т. е. ее форма и размер зависят от времени. Часть гравитационных волн уходит на бесконечность, другая часть поглощается черной дырой, что приводит к увеличению ее энергии. Если черная дыра предоставлена самой себе, то с течением времени процесс излучения гравитационных волн прекращается и черная дыра становится стационарной.

Замечательным оказывается то, что всякая черная дыра, переходя в стационарное состояние, обязательно

превращается в керровскую или в случае, если тело обладало электрическим зарядом, керр-ньюмановскую черную дыру, свойства которой однозначно определяются значениями трех параметров: *М —* массы, J — углового момента и *Q —* заряда. После образования стационарной черной дыры все особенности внутреннего строения сколлапсировавшего тела, наличие в нем источников различных полей, кроме электромагнитного, связанного с зарядом Q,становятся недоступными для наблюдения. Подобные черные дыры, обладающие одинаковыми значениями параметров *М, J* и Q, неотличимы друг от друга. Все остальные характеристики, которыми обладало коллапсирующее тело (такие, как мультипольные гравитационные и электромагнитные моменты, заряды, связанные с другими взаимодействиями (например, сильным и слабым и т. п.), забываются черной дырой.

Физическая причина этого состоит в следующем. Любое физическое поле, обладая энергией, притягивается черной дырой. Поэтому любой элемент объема с таким полем около черной дыры обладает весом. Связанные с полем натяжения проявляются в виде давления со стороны поля на поверхность объема, приводя к “выталкивающей силе”, аналогичной силе Архимеда. Физическое поле может находиться в равновесии около черной дыры, т. е. быть стационарным, если вес поля в любом элементе объема в точности компенсируется “выталкивающей силой”. Если вне черной дыры нет источников полей, то выполнение этого своеобразного “закона Архимеда” оказывается возможным только для таких конфигураций гравитационного и электромагнитного полей, которые отвечают случаю керр-ньюмановской черной дыры. Во всех остальных случаях элемент поля либо “всплывает”, либо “тонет”. После этого процесса перестройки поля, сопровождаемого излучением, черная дыра сохраняет только те характеристики, которые она не способна сбросить при излучении, — массу, угловой момент и электрический заряд.

Теорема Хокинга. Хотя детальное описание процесса перестройки поля и превращения черной дыры в стационарную представляет собой довольно сложную задачу, этот процесс подчиняется одной общей закономерности, установленной английским физиком С. Хокингом в 1972 г.: площадь поверхности черной дыры не может уменьшаться со временем (рис. 5). Соответствующая

Рис. 5. Возможные процессы с черными дырами. Иллюстрация к теореме Хокинга.

Плоскости *t1, t2, t3* обозначают пространственные сечения в соответствующие моменты времени, S0(tl) — площадь черной дыры о в момент времени ti*.* Две черные дыры могут сливаться в одну, черные дыры могут возникать, площадь поверхности одиночной черной дыры возрастает со временем. Одна черная дыра не может распасться на две или более черных дыр. Теорема Хокинга утверждает, что общая площадь поверхностей черных дыр в момент ( является неубывающей функцией времени

теорема была доказана им при самых широких предположениях, среди которых наиболее существенным является предположение о положительности плотности энергии вещества и физических полей, с которыми взаимодействует черная дыра. Это предположение, безусловно справедливое в рамках классической физики, мо-

жет, однако, нарушаться при учете квантовых эффектов, Доказательство этой теоремы основано на том, что падение в черную дыру вещества и поля, плотность энергии которых положительна, приводит к возрастанию энергии черной дыры, а следовательно, и площади ее поверхности. Для невращающейся незаряженной черной дыры в этом легко убедиться, используя связь между массой *М* и площадью поверхности *А : А = = 16pi(GM/c2)2,* Обратный процесс извлечения вещества и энергии из-под горизонта событий невозможен.

Теорема Хокинга справедлива и в более общем случае, когда имеется несколько черных дыр. При их взаимодействии сумма площадей поверхностей черных дыр не уменьшается со временем. Используя эту теорему, удается, в частности, доказать, что одиночная черная дыра не может распасться на две меньшие черные дыры. Для того чтобы убедиться в этом, предположим сначала, что процесс распада черной дыры с массой *М,* угловым моментом J и зарядом *Q* возможен, и в результате этого процесса образуются две далеко отстоящие друг от друга черные дыры с массами *М1* и *М2,* угловыми моментами J1 и J2 и зарядами Q1 и q2. В соответствии с .законами сохранения энергии и электрического заряда Q = Q1 + Q2, M>=M1+M2

Неравенство возникает из-за того, что часть энергии при распаде может быть унесена гравитационным, а при наличии заряда — и электромагнитным излучением. Это излучение может унести также полный угловой момент или часть его. Можно убедиться, что эти соотношения противоречат условию возрастания площади поверхности черных дыр: *A1+A2>=A.*

Обратный процесс слияния двух черных дыр возможен. Этот процесс может сопровождаться излучением гравитационных волн. Если при слиянии черных дыр с массами *М1* и *М2* образуется дыра с массой *М,* то уносимая излучением доля энергии epsilon*=(M1 + M2—M)/(M1+*M2) не превосходит величины 1—2-3/2= 0,64647... Если заряды этих дыр равны нулю или имеют одинаковый знак, то epsilon<1/2- Если к тому же черные дыры не вращаются и J1 = J2 = 0, то epsilon< 1 —2 -2/2 = 0,2929...

## ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Возможен ли коллапс малых масс? Прервем на время рассказ об удивительных свойствах черных дыр, чтобы ответить на неизбежный вопрос: “А какие есть основания считать, что черные дыры действительно существуют в природе?”

Для того чтобы тело с массой *М* образовало черную дыру, необходимо сжать его до размера порядка гравитационного радиуса, при этом плотность окажется порядка р{ро}~M/(4/3piR3g)=Зс6/(32piG3М2)~7,3-1082M-2 г/см3 *(М —* масса в граммах). Еще задолго до достижения таких плотностей возникает необходимость преодолеть сопротивление обычных сил отталкивания. Самостоятельному переходу малых масс в энергетически выгодное состояние черной дыры препятствует энергетический барьер, высота которого определяется величиной необходимой работы против сил давления. Для больших масс такого барьера нет. Чтобы оценить критическую массу, при которой энергетический барьер исчезает, рассмотрим однородный шар, составленный из *N* нейтронов. Тогда, считая, что давление нейтронного вещества определяется уравнением состояния идеального (вырожденного) ферми-газа, для высоты энергетического барьера получаем значение порядка N?/3 *т Пл с2,* где mПл=

= sqrt[-hc/G] примерно=2,8 • 10-5 г — так называемая планковская масса. Если сравнить это выражение с полной массой покоя системы из *N* барионов Nmnс2 (mn = 1,67-10-24г — масса нейтрона), то видно, что при N<Nкр = = *(тпл /тn)3 ~- 10*57 действительно имеется барьер, препятствующий гравитационному коллапсу вещества {3 В 1962 г. известный советский физик Я. Б. Зельдович заметил, что с учетом квантовых эффектов коллапс малых масс оказывается возможным, однако поскольку этот процесс связан с квантовым подбэрьерным просачиванием, то вероятность его ничтожно мала. Для того чтобы предотвратить возможное недоразумение, подчеркнем, что мы рассматриваем в этом разделе вопрос о коллапсе изолированной массы. В среде с высокой плотностью и давлением возможно образование черных дыр меньшей массы. }.

О том, насколько велик этот потенциальный барьер в случае малых масс, позволяет судить следующий пример. Если бы мы захотели создать малую черную дыру, заставив сколлапсировать 1600 т железа, на преодоление барьера нам бы пришлось затратить энергию, выделяемую при термоядерном горении 2\*1013 т дейтерия. Иными словами, нам бы потребовалось взорвать весь дейтерий, содержащийся в земном океане! Поэтому в современной Вселенной возможно образование черных дыр только с массой большей или порядка Мкрит.= *= тп N*крит.~-1033 г. Если теперь вспомнить, что масса средней звезды как раз имеет такой порядок (масса Солнца равна 2\*Ю33 г), то возникает закономерный вопрос, не возникают ли черные дыры естественным образом на каком-либо этапе эволюции звезд.

Эволюция звезд. Звезды возникают из облаков газа и пыли, имеющихся во Вселенной. Первоначальные неоднородности этих образований возрастают со временем. В этом проявляется характерное для гравитационного взаимодействия свойство неустойчивости, уже отмечавшееся ранее. В результате этого процесса возникают массивные сгущения с массами, во много раз большими солнечной массы. Подобная протозвезда сжимается, при этом ее первоначальная потенциальная гравитационная энергия превращается при сжатии в тепловую и температура в ее центре растет. Когда она достигает 106 К, начинаются термоядерные реакции.

Доля водорода, наиболее распространенного элемента Вселенной, в звездах высока — от 50 до 80%, а вместе с гелием он составляет от 96 до 99% массы звезды. При термоядерной реакции водород превращается в гелии и выделяется та энергия, которая компенсирует звезде ее потери на излучение. В термоядерной топке такой звезды, как наше Солнце, ежесекундно превращается в гелий ~600 млн. т водорода и при этом освобождается энергия, эквивалентная (согласно формуле Эйнштейна *Е = тс2)* массе ~4 млн. т. Однако запасы водорода в звездах настолько велики, что их хватает на миллиарды лет. Давление нагретого газа противостоит в звезде гигантским силам гравитационного притяжения, горящие звезды оказываются устойчивыми и, пока не исчерпались запасы водородного горючего, параметры звезды (такие, как температура, светимость), изменяются крайне незначительно.

После выгорания водорода давление падает и центральная область звезды сжимается. При сжатии растут плотность и температура и, когда температура достигает 100 млн. град., начинается термоядерное горение накопившегося гелия, Резкое выделение энергии при этом заставляет внешнюю часть звезды расшириться до гигантского размера в сотни миллионов километров, и звезда превращается в красный гигант. Сгорание гелия происходит быстрее, и эта стадия занимает существенно меньшее время, чем стадия горения водорода. Для звезд гораздо массивнее Солнца при дальнейшем сжатии ядра после выгорания гелия возможны и другие типы термоядерных реакций, приводящих к появлению более тяжелых элементов, однако и эти стадии лишь слегка оттягивают неизбежный конец.

Картина гибели звезды зависит от ее массы. Звезды с массой порядка солнечной и меньше, постепенно сжимаясь и, возможно, выбросив часть своего вещества, превращаются в белые карлики — карликовые звезды с размером порядка радиуса Земли и огромной плотностью. Плотность их настолько велика, что кубический сантиметр их вещества имеет массу, измеряемую тоннами. У только что образовавшегося белого карлика достаточно велики запасы тепловой энергии, и поэтому, лотя ядерная энергия уже исчерпана, они светят еще в течение сотен миллионов лет, постепенно остывая. Звезды средней массы, от одной до нескольких масс Солнца, могут также превращаться в белые карлики, сбросив, однако, значительную часть своего вещества.

Самые массивные звезды заканчивают свой жизненный путь грандиозным взрывом. Взрывы массивных звезд приводят к выделению столь колоссальных энергий, что на короткое время умирающая звезда становится ярче целой галактики. Такие вспышки звезд, получивших название **сверхновых,** происходят в галактиках в среднем раз в 100 лет. Последняя вспышка сверхновой в нашей Галактике наблюдалась в 1604 г. При взрыве массивных сверхновых в космос выбрасывается огромное количество вещества, масса которого может составлять несколько солнечных масс. Скорость расширения оболочки, первоначально составляющая тысячи километров в секунду, с течением времени уменьшается до сотен километров в секунду. Через сотни дней сверхновая гаснет, и на ее месте наблюдают в виде туманности сброшенную светящуюся оболочку.

Белые карлики. Предел Чандрасекара. Хотя детально рассчитать бурные процессы, сопровождающие ,гибель звезды, затруднительно, вопрос о том, какова дальнейшая участь звезды или ее остатка, допускает довольно четкий ответ. Поскольку ядерное горючее уже выгорело и потери энергии на излучение не компенсируются, звезда или ее остаток могут закончить свою эволюцию в виде устойчивого холодного образования, если только давление этого холодного вещества окажется достаточно большим, чтобы противостоять гигантским силам гравитационного притяжения. Основной вклад в давление при низких температурах дают фермионы, которые в соответствии с принципом Паули не прекращают своего движения и при абсолютном нуле температуры.

При сжатии выгоревшей звезды на некотором этапе происходит разрушение атомов на их составляющие: ядра и свободные электроны. Это случается, когда атомы прижаты друг к другу до расстояний, меньших радиуса орбит вращения электронов в атоме. Давления вырожденного электронного газа оказывается достаточным для обеспечения равновесия звезды с массой меньшей или порядка солнечной. Сжатие такой звезды прекращается, когда размеры ее становятся порядка размера Земли и образуется белый карлик.

Для белых карликов характерны следующие средние параметры: масса — 1,2-1033 г, радиус — 9000 км, средняя плотность — 400 кг/см3, ускорение силы тяжести на поверхности — 106 м/с2, вторая космическая скорость (т. е. скорость ухода частиц с поверхности) — около 4000 км/с.

Чем больше масса белого карлика, тем выше плотность вещества в нем и тем больше импульс Ферми электронов. При плотности вещества порядка 2000 кг/см3 скорость движения электронов становится порядка скорости света и далее почти не растет. Поэтому становится несущественным другой фактор, приводящий к увеличению давления, а именно, рост частоты ударов электронов о поверхность, помещенную в подобный релятивистский газ. Этого оказывается достаточно для того, чтобы рост давления перестал компенсировать рост силы тяготения, и звезда потеряла устойчивость. В начале 30-х гг. известный астрофизик С. Чандрасекар показал, что предел устойчивости белых карликов — 1,2 солнечной массы. Эта предельная масса получила название предела Чандрасекара. Для вращающихся звезд этот предел немного больше.

Нейтронные звезды и пульсары. Что же происходит с мертвыми звездами, массы которых превышают предел Чандрасекара? Этот вопрос был исследован в ряде работ в 30-х гг., среди которых следует выделить работы В. Бааде и Ф. Цвикки (1934 г.), Л. Д. Ландау (1937 г.) и Ю. Р. Оппенгеймера и Г. Волкова (1939 г.). В них было показано, что сжатие таких массивных звезд продолжается до тех пор, пока плотность в них не достигнет плотности, характерной для атомных ядер: 1014— 1015 г/см3. При этом происходит перестройка вещества, в результате которой ядра разваливаются на составляющие их протоны и нейтроны. Энергия вырожденных электронов настолько велика, что энергетически более выгодным оказывается их слияние с протонами, и в веществе звезды при такой плотности появляется заметная нейтронная составляющая. Давление вырожденного нейтронного ферми-газа может остановить Сжатие, при этом образуется так называемая **нейтронная** звезда. Нейтронные звезды имеют размер от 10 до нескольких десятков километров.

Для нейтронных звезд характерны следующие средние параметры: масса — 2\*1033 г (порядка солнечной), радиус — 10—20 км, плотность — 2\*1014 г/см3, минимальный период вращения — 0,001 с, вторая космическая скорость — 0,4—0,5 скорости света.

Открытие нейтронной звезды, предсказанной теоретиками, произошло в 1967 г. довольно неожиданным образом. Начиная с 1964 с, на радиотелескопе в Кавен-дишской лаборатории Кембриджского университета в Англии в группе, возглавляемой профессором Э. Хьюи-шем исследовались вариации радиоизлучения от дискретных космических источников. Однажды летом 1967г. аспирантка Э. Хьюиша Жаклин Белл обратила внимание на один довольно необычный источник, посылающий, как выяснилось позднее, строго периодические ра-\* диосигналы. До открытия других подобных объектов, получивших позднее название пульсаров, этот уникальный строго периодический характер радиоизлучения настолько озадачил открывателей, что в качестве одной из гипотез обсуждалась возможность посылки этих сигналов представителями внеземной цивилизации.

Идея о возможной связи пульсаров с остатками сверхновых завоевала признание, когда после открытия еще нескольких пульсаров в 1968 г. был открыт пульсар в Крабовидной туманности, получивший название ПР0532 обладавший рекордно коротким периодом *—* 0,03 с. В 1054 г. астрономы Древнего Китая наблюдали вспышку сверхновой в созвездии Тельца, как раз в том месте, где теперь наблюдается Крабовидная туманность. Более того, по скорости расширения этой туманности астрономам удалось установить момент начала расширения, который блестяще совпал с датой наблюдения сверхновой китайскими астрономами. Таким образом, Крабовидная туманность — это оболочка, сброшенная сверхновой, а пульсар NP0532 — остаток звезды.

Расчеты показали, что ни вращение, ни колебания белых карликов не могут объяснить столь короткий период излучения пульсаров (до сотых долей секунды), и ученые пришли к выводу, что пульсары представляют собой разновидность нейтронных звезд. Периодическое радиоизлучение пульсаров связано с наличием сильных магнитных полей у вращающихся нейтронных звезд. Пульсар работает как маяк: направляемое магнитным полем излучение достигает Земли всякий раз, когда направление магнитного поля совпадает с направлением на Землю. В настоящее время число известных пульсаров измеряется сотнями.

Предельная масса нейтронных звезд. Для устойчивых нейтронных звезд также существует верхний предел массы. Этот предел, равный 2—3 солнечным массам {ДЛя нейтронных звезд поправки, связанные с общей теорией относительности, могут достигать 15—20%. Ранее уже упоминалось о том, что наряду с общей теорией относительности имеется целый ряд логически непротиворечивых теорий гравитации. Вывод о существовании предельной массы нейтронных звезд остается справедливым и в других наиболее разработанных вариантах (например, в скаляр-тензорной теории Бранса—Дикке и в биометрической теории Розека), однако само значение предельной массы может оказаться **другим**}, возникает по той же причине, что и предел Чанд-расекара: нейтроны при плотностях, соответствующих предельной массе, становятся релятивистскими, давление с увеличением плотности растет медленнее и ней-.тронная звезда теряет устойчивость. Новым оказывается то, что для звезд большей массы остановка коллапса невозможна и сжатие звездных остатков с массой, большей 2—3 масс Солнца, приводит к образованию черной дыры. Если бы вспышки всех достаточно массивных сверхновых приводили бы к образованию черных дыр, то в нашей Галактике число черных дыр исчислялось бы миллионами. Однако из-за того, что при взрыве массивных сверхновых может сбрасываться большая доля их массы, число реально существующих черных дыр может оказаться значительно меньше.

Итак, после гибели звезды остается либо белый карлик, либо нейтронная звезда, либо черная дыра. Белые карлики были известны уже многие десятилетия, нейтронные звезды открыты в виде пульсаров 15 лет назад, а что известно о черных дырах?

## КАК ОБНАРУЖИТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ?

Одиночные черные дыры. Как же увидеть черную ды-ру, возникшую при коллапсе звезды? Одиночную черную дыру можно обнаружить, только если она находится относительно недалеко от Солнца, поскольку светимость ее на два порядка слабее светимости Солнца.

Межзвездный газ, аккрецирующий на черную дыру, нагревается и может начать излучать. Основная часть излучения формируется вдали от черной дыры, поэтому по его свойствам трудно отличить черную дыру от одиночной нейтронной звезды, обладающим слабым магнитным полем или с диаграммой направленности излучения, препятствующей наблюдению ее как пульсара.

Черные дыры в двойных системах. Гораздо более простой представляется задача обнаружения черной дыры, если она образует двойную систему вместе с обычной звездой. Случай, когда одна из компонент двойной системы в результате более быстрой эволюция образует черную дыру еще при жизни своего менее массивного компаньона, является благоприятным для наблюдения по следующим причинам.

Во-первых, хотя сама черная дыра визуально не наблюдается, вращение видимой звезды вокруг общего центра масс приводит к периодическому изменению, связанному с эффектом Доплера, длин волн принимаемого излучения. Если массу видимой звезды найти, воспользовавшись известной зависимостью спектральных характеристик звезд от их массы, то, зная период вращения и максимальное значение проекции скорости видимой звезды на луч зрения наблюдателя, определяемые по характеристикам эффекта Доплера, можно вычислить минимальное значение массы невидимой компоненты. Если масса невидимой компоненты, определенная таким образом, окажется большой (например, порядка 5—10

Рис. 6. Аккреция на черную дыру в двойной системе. Сплошной стрелкой показано направление вращения аккреционного диска, пунктирной — вращения двойной системы относительно центра масс

солнечных масс), то это можно рассматривать как свидетельство того, что невидимая компонента является черной дырой, поскольку маловероятно для обычной звезды с такой большой массой остаться “невидимой”, а для звезд-малюток (белых карликов и нейтронных звезд) эти массы лежат вне допустимого предела их устойчивости. Предложение использовать “невидимость” в качестве, критерия при поиске черных дыр в двойных системах было высказано в начале 60-х гг. советскими астрофизиками Я. Б. Зельдовичем и О. X. Гусейновым. Однако среди звезд, отобранных по этому признаку, черную дыру, к сожалению, обнаружить не удалось.

Во-вторых, среди многочисленных двойных звезд существует довольно много тесных двойных систем, у которых расстояние между компонентами сравнимо с суммой радиусов звезд. Если черная дыра входит в состав такой системы, то скорость аккреции на нее значительно возрастает за счет вещества, перетекающего от обычной звезды и может достигнуть величины 10-5 солнечной массы в год. Вещество, перетекающее от звезды, вследствие, вращения системы обладает большим угловым моментом, поэтому частицы не смогут сразу упасть на черную дыру и “вынуждены” занять круговую орбиту, соответствующую имеющемуся у них угловому моменту.

В среднем порции газа требуется несколько недель или месяцев для того, чтобы упасть в черную дыру.

Таким образом, вокруг черной дыры образуется диск из аккрецирующего вещества (рис. 6). Плоскость этого диска совпадает с плоскостью, в которой движутся компоненты двойной системы, его диаметр составляет несколько миллионов километров, а толщина меньше 150000 км. Работа гравитационных сил частично превращается в кинетическую энергию движения газа, частично, из-за трения, переходит в тепло и разогревает аккрецирующий газ, который начинает интенсивно излучать рентгеновские лучи. Светимость диска может в сотни тысяч раз превосходить общую светимость Солнца, поэтому поиск черных дыр целесообразно вести, изучая мощные компактные космические источники рентгеновского излучения.

Лебедь Х-1 — черная дыра? Один из рентгеновских источников в двойных системах, расположенный в созвездии Лебедя и получивший название Лебедь Х-1, привлек к себе внимание. В 1971 г. в результате исследований этого источника на американском спутнике “Ухуру” и с помощью рентгеновских телескопов па высотных баллонах удалось с большой точностью установить его положение. В том же году были зарегистрированы изменения его рентгеновской светимости и одновременно с этим наблюдалось резкое возрастание излучения от радиоисточника, расположенного в этом же районе. Это позволило отождествить рентгеновский и радиоисточники и тем самым зафиксировать положение рентгеновского источника *с* точностью до угловой секунды. Внутри этой области была обнаружена горячая го лубая звезда HDE 226868, которая оказалась спектрально двойной, с периодом 5,6 суток. Позднее было обнаружено, что и излучение рентгеновского источника обладает периодической компонентой с таким же периодом. Тем самым было доказано, что рентгеновский источник входит в двойную систему вместе со звездой HDE 226868. Эта звезда расположена на расстоянии более 6500 световых лет от Солнца, имеет массу более 20 солнечных масс, а масса ее невидимого компаньона (источника рентгеновского излучения) оказалась более 8 масс Солнца. Поскольку эта масса существенно превышает предельную массу нейтронной звезды, то естественно предположить, что рентгеновский источник Лебедь Х-1 является черной дырой. Все, что нам известно об этом источнике, можно понять в рамках модели аккрецирующего диска вокруг черной дыры. Однако уникальность этого объекта и то огромное значение, которое имело бы для физики и астрофизики достоверное открытие первой черной дыры, заставляют астрофизиков относиться с огромной осторожностью к вынесению “окончательного приговора”. Можно надеяться, что в недалеком будущем после более тщательных и детальных исследований свойств этого объекта удастся полностью исключить другие мыслимые возможности, например, исключить возможность того, что Лебедь Х-1 является нейтронной звездой в тройной системе, и получить достоверное доказательство того, что первая черная дыра во Вселенной уже открыта.

Массивные и сверхмассивные черные дыры. Черные дыры могут служить крайне эффективными источниками энергии, обладая "в принципе возможностью полного превращения массы покоя падающего на них вещества в энергию. Даже с учетом неизбежных потерь реально возможно превращение в черных дырах в энергию от нескольких процентов до десятков процентов массы аккрецируемого вещества. Поэтому о черных дырах вспоминают каждый раз, когда требуется объяснить выделение колоссальных энергий в компактных областях пространства. Одним из наиболее значительных примеров подобного “использования” черных дыр является идея объяснения активности ядер галактик и квазаров наличием в них черной дыры с массой порядка 108 солнечных масс. При падении на нее межзвездного вещества, участвующего во вращении галактик и звезд, вокруг такой черной дыры образуется аккреционный диск, максимум излучения которого лежит в ультрафиолетовом и оптическом диапазоне. Модель черной дыры в ядрах активных галактик и квазаров успешно выдерживает соревнование с другими возможными объяснениями природы активности ядер, например, такими как наличие в ядре компактного звездного скопления или сверхмассивного вращающегося магнитоплазменного тела, однако окончательной ясности в этом вопросе нет.

Резюмируя краткий экскурс в теорию эволюции звезд и астрофизику, подчеркнем, что при определенных условиях черные дыры должны возникать в качестве конечного продукта развития звезды, более того, имеются серьезные основания считать, что первая черная дыра уже открыта; сомнения, которые имеются, касаются главным образом того, как часто черные дыры образуются и действительно ли нам повезло, и мы уже наткнулись в созвездии Лебедя на черную дыру.

## ЭНЕРГЕТИКА ЧЕРНЫХ ДЫР

Черная дыра как генератор энергии. Обсудим теперь более подробно вопрос о черных дырах как источниках энергии. Рассмотрим сначала следующий мысленный эксперимент с невращающейся черной дырой. Будем на эту дыру медленно опускать груз на прочной невесомой нити. Если масса груза т, то его полная энергия *Е* будет отличаться от mс2 на величину, равную работе гравитационного поля, так что на расстоянии *R* энергия *Е*

равняется *E = mc2*sqrt[*1—2GM/c2R* ]. На горизонте работа, совершенная гравитационным полем над грузом, в точности равна первоначальной внутренней энергии груза, и полная энергия обращается в нуль. Поэтому рассмотренный механизм позволяет освободить полную внутреннюю энергию, заключенную в теле, и превратить ее в работу. Энергия, заключенная в черной дыре, при этом не расходуется, и ее параметры, такие, как масса и размер, не изменяются. Если подобный эксперимент про: вести, не отбирая энергию от тела, например дав ему возможность свободно падать, то в результате этого энергия черной дыры возрастет на величину, равную энергии, привнесенной в нее упавшим телом. Площадь поверхности черной дыры при этом возрастет в полном соответствии с теоремой Хокинга.

Извлечение энергии из вращающихся черных дыр. Процесс Пенроуза. Массу вращающейся черной дыры можно уменьшить, не нарушая теоремы Хокинга только в том случае, если при этом одновременно уменьшается и величина ее углового момента. Действительно, площадь незаряженной черной дыры пропорциональна

*М(М* + sqrt[ *М2— (Jc/GM)2*]*)*. При уменьшении массы *М* эта величина может остаться постоянной только в том случае, когда J соответствующим образом уменьшается. Процессы с участием черных дыр, в которых площадь их поверхности не изменяется, называют обратимыми. Оказывается, что с помощью обратимых процессов можно извлечь из черной дыры всю энергию, связанную с ее

Рис. 7. Процесс Пенроуза. Тело, падающее с некоторого расстояния (положение A), влетает в эргосферу вращающейся черной дыры и распадается в точке *Б* около поверхности черной дыры на две части. Одна часть поглощается черной дырой. Параметры взрыва выбраны так, что энергия этой части отрицательна, Другая часть вылетает из эргосферы (положение *В),* обладая энергией большей, чем энергия падающего тела

вращением. В 1969 г. английский физик Р. Пенроуз рассмотрел следующий мысленный эксперимент.

Бросим на вращающуюся черную дыру (рис. 7) тела таким образом, чтобы оно влетело в эргосферу и, взорвавшись, распалось там на две части. Параметры взрыва можно выбрать так, чтобы одна из частей приобретала угловой момент, направленный против вращения черной дыры, и полная энергия ее будет отрицательной, а вторая часть вылетает из эргосферы наружу. Полная энергия вылетающей части будет больше, чем энергия падающего тела. Закон сохранения углового момента приводит к тому, что вылетающее из черной дыры тело унесет и часть ее углового момента. Максимальный выигрыш энергии в таком процессе достигается при распаде падающей частицы около самого горизонта событий. В этом случае процесс извлечения энергии оказывается обратимым.

Теорема Хокинга позволяет просто оценить максимальное количество энергии, которое можно извлечь из вращающейся черной дыры с массой *М* и угловым моментом /. Эта энергия *Евр* определяется как разность *(М—Mi)c2,* где *m1 —* масса невращающейся черной дыры, получаемой в результате обратимого процесса. Вычисления дают

Евр = Mc2 [ 1 -sqrt( *1/2* *(*1 + sqrt(1-*(Jc/GM*2*)*2))].

Максимальное значение энергии вращения равно EВР.макс = Mс2(1-2-1/2 ) ~- 0,3 *Мс*2*.*

Анализ реалистических моделей образования и эволюции черных дыр показал, что при разумных предположениях черная дыра должна вращаться с некоторой конкретной угловой скоростью, при которой параметр отношения Jc/GM2 ~- 0,998. Это очень быстрое вращение, и связанная с ним доля энергии составляет почти 30% полной энергии черной дыры.

Если аккреция вещества на черную дыру сопровождается появлением некоторого регулярного магнитного поля, то вращающаяся черная дыра приобретает электрический заряд и возможны электродинамические явления, связанные с выбросом частиц. В рамках подобных моделей можно связать некоторые известные в астрофизике явления выброса вещества с освобождением энергии вращения черных дыр.

**Явление** суперрадиации. Способ, предложенный Пенроузом, можно несколько изменить, рассмотрев вместо падающего на вращающуюся черную дыру тела, электромагнитную или гравитационную волну. Обычно при рассеянии волны на черной дыре амплитуда рассеянной волны меньше амплитуды падающей волны, поскольку часть энергии поглощается черной дырой. Однако при падении цилиндрической волны, для которой отношение энергии к ее угловому моменту относительно оси вращения черной дыры меньше угловой скорости черной дыры, происходит усиление. Явление усиления падающей волны вращающейся черной дырой получило название суперрадиации. Если окружить вращающуюся черную дыру полностью отражающими излучение стенками, то даже малый сигнал, обладающий параметрами, удовлетворяющими условию усиления, будет непрерывно расти. Подобная система вполне могла бы явиться генератором соответствующего излучения.

## КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЧЕРНЫХ ДЫРАХ

Квантовое рождение частиц во внешнем поле. До сих пор при описании взаимодействия вещества с черными дырами мы игнорировали квантовые особенности взаимодействия. Квантовые эффекты действительно несущественны для черных дыр с массой порядка солнечной или больше. Однако для черных дыр малой массы эти эффекты не только не малы, но приводят к качественному изменению картины эволюции черной дыры.

Согласно современным, квантовым представлениям физический вакуум, т. е. состояние, в котором отсутствуют реальные частицы, является довольно сложным образованием. В вакууме непрерывно происходит образование, взаимодействие и уничтожение виртуальных (короткоживущих) частиц. В отсутствие внешних полей вакуум устойчив, т. е. все протекающие в нем процессы не приводят к появлению реальных (долгоживущих) частиц. При наличии внешнего поля часть виртуальных частиц, взаимодействуя с ним, успевает приобрести достаточную энергию, чтобы стать реальными. Этот процесс приводит к эффекту квантового рождения частиц из вакуума внешним полем.

Вероятность рождения частиц во внешнем статическом поле можно оценить следующим образом. Пусть напряженность поля Г и заряд рождающихся частиц равен *g.* Согласно соотношению неопределенности время жизни виртуальной пары частиц, обладающих энергией *Е,* порядка -h/E. За это время частицы могут удалиться друг от друга на характерное расстояние l0~-hc/E. Вероятность обнаружить пару таких частиц на большем расстоянии / пропорциональна ехр (—l*E/*-h*e).* Эта же величина дает вероятность рождения реальной пары частиц с энергией E, если расстояние l таково, что работа *gГl,* произведенная на нем полем, равна *Е.* Поэтому вероятность рождения частиц в поле напряженности Г пропорциональна ехр(—*E2/*-h*cgГ).*

Рождение частиц в заряженных и вращающихся черных дырах. Приведенные выше рассуждения полностью справедливы для процессов рождения заряженных частиц в однородном электростатическом поле. Это поле рождает из вакуума электрон-позитронные пары и пары других заряженных частиц. В 1970 г. М. А. Марков и В. П. Фролов обратили внимание, что квантовый эффект рождения частиц из вакуума в поле заряженной черной дыры приводит к уменьшению заряда черной дыры практически до его уничтожения.

Аналогичное явление происходит, как показали в 1972 г. Я. Б. Зельдович и А. А. Старобинский, во вращающихся черных дырах. Напомним, что рассмотренное в предыдущем разделе явление суперрадиации имело чисто классический характер. Это проявляется, в частности, в том, что коэффициент усиления не зависит от постоянной Планка. Как и другие классические процессы, явление суперрадиации можно описать на квантовом языке. При подобном описании явление суперрадиации состоит в увеличении числа квантов в отраженной волне по сравнению с числом квантов в волне падающей. Действительно, энергия волны заданной частоты при классическом описании пропорциональна квадрату ее амплитуды, а при квантовом — числу квантов. Поэтому увеличение амплитуды волны при неизменной частоте означает увеличение общего числа квантов поля.

Рассмотренное классическое явление суперрадиации имеет квантовый аналог: спонтанное рождение частиц из вакуума в гравитационном поле вращающейся черной дыры. Поскольку в физическом вакууме равно нулю лишь среднее значение поля, а сами поля флуктуируют около нулевых значений, то амплитуда тех вакуумных флуктуации, для которых выполняется условие усиления, непрерывно возрастает, что проявляется в рождении реальных квантов поля.

Эффект рождения квантов в поле вращающейся черной дыры можно описать и несколько иным образом, при котором роль эргосферы проявляется более отчет- • лнво. Для того чтобы произошло рождение реальной частицы, вылетающей из черной дыры без нарушения закона сохранения энергии, необходимо, чтобы вторая из частиц виртуальной пары приобрела отрицательную энергию. Это оказывается возможным, если она находится в эргосфере и обладает определенным значением углового момента.

Работу, необходимую для превращения виртуальных частиц в реальные, совершает гравитационное поле черной дыры. Рожденные частицы, вылетающие из черной дыры, обязательно обладают угловым моментом, совпадающим по направлению с угловым моментом черной

дыры. Поэтому вне вращающейся черной дыры появляется поток частиц, уносящих энергию и момент черной дыры. Характерная частота этого излучения порядка угловой скорости OMEGA вращения черной дыры, а полный поток энергии порядка *dE/dt~*-hOMEGA2*.* При заданной массе *М* максимальное значение угловой скорости достигается у экстремальной черной дыры, для которой *J~GM2/c,* Эта,угловая скорость равна OMEGA *= c3/2GM.* Поэтому скорость истечения энергии из такой вращающейся черной дыры не превосходит величину

dE/dt<~ -h(c3/GM)2~4,3\*10-17 эрг/с*(МС/М)2,*

где Mc =2\*1033 г — масса Солнца.

Приведенная оценка показывает, что для черны дыр, возникающих при коллапсе звезд, подобные квантовые эффекты крайне малы даже для быстро враща-ющихбя чёрных дыр. Заметим, что приведенные формулы касаются лишь безмассовых частиц (фотонов, нейтрино, гравитонов), скорость рождения массивных частиц существенно меньше.

Важной особенностью описанных процессов рождения частиц в заряженных и вращающихся черных дырах является то, что в результате их площадь поверхности черной дыры не уменьшается, на рождение частиц расходуется запасенная черной дырой электростатическая энергия или энергия вращения. После исчерпания этой энергий процесс излучения должен был бы прекратиться, а сама черная дыра превратиться в шварцшиль-довскую (т. е. в черную дыру, для которой Q = J = 0).

Эффект Хокинга. В 1974 г. английский физик, профессор Кэмбриджского университета Стивен Хокинг показал, что квантовый процесс рождения частиц происходит и в нейтральных невращающихся черных дырах. В еврей работе С. Хокинг рассмотрел безобидный на первый взгляд вопрос о том, сколько частиц рождается в процессе коллапса, приводящего к образованию шварцшильдовской черной дыры. Распространенное до работы С. Хокинга мнение сводилось к следующему. В процессе коллапса гравитационное поле переменно и, как всякое переменное поле, рождает частицы. Однако с точки зрения внешнего наблюдателя коллапсирующее тело довольно быстро застывает у гравитационного радиуса, а образующееся статическое поле не способно рождать частицы, поскольку в отличие от керровской черной дыры у шварцшильдовской дыры отсутствуют состояния с отрицательной энергией для частиц вне горизонта событий. Поэтому наблюдатель, изучающий явление коллапса, зарегистрирует некоторое конечное число частиц, образующихся при коллапсе и выходящих наружу. Общее число рожденных частиц зависит от конкретных характеристик коллапса, и почти все рожденные частицы должны возникать на активной стадии коллапса.

Результат, полученный С. Хокингом, оказался совсем другим. Он показал, что наряду с незначительным числом частиц, рожденных переменностью поля и зависящим от деталей коллапса, квантовые эффекты приводят также к излучению стационарного потока частиц. Спектр и интенсивность этого потока определяются только параметрами образовавшейся стационарной дыры. Более того, оказалось, что черная дыра рождает и излучает частицы (фотоны, нейтрино, гравитоны и др.) в точности так же, как если бы вместо черной дыры имелось черное тело, нагретое до температуры *Т= = hkappa/2pick,* где *кappa —* поверхностная гравитация черной дыры{ Для невращающейся черном дыры эта температура T~10-7 К (масса Солнца/М). Поэтому для черных дыр, возникающих при коллапсе звёзд; этот эффект крайне незначителен.}.

Странный на первый взгляд вывод С, Хокинга о тепловом характере излучения объясняется особенностями квантовых явлений в статическом гравитационном поле и в конечном счете связан с принципом эквивалентности, выделяющим гравитацию из всех остальных взаимодействий. Поскольку любая частица вне шварцшильдовской черной дыры имеет положительную энергию, то квантовый процесс рождения частиц в поле такой черной дыры происходит так, что одна из частиц пары обязательно “рождается” под горизонтом. Эти “частицы” невидимы для наблюдателя на бесконечности, и при описании любых наблюдений вне черной дыры по состояниям этих “частиц” происходит усреднение. Ины-ми словами, наблюдатель вне черной дыры всегда имеет дело только с частью "полной квантовой системы, и в соответствии с этим излучение черной дыры описывается матрицей плотности, даже если первоначально (дообразования черной дыры) мы имели дело с чистым квантовомеханическим состоянием.

Появление матрицы плотности означает, что наблюдатель с определенной вероятностью может застать систему в любом из ее возможных состояний. Говорят, что система находится в состоянии теплового равновесия при температуре *Т* (т. е. описывается тепловой матрицей плотности), если соответствующая вероятность w (omega) дается термодинамической формулой Гиббса: w~ ~ехр (—*E/kT),* где *Е —* энергия состояния. • Чтобы “объяснить” тепловой характер излучения черной дыры, попробуем применить к этому случаю приведенную в начале раздела формулу, описывающую вероятность ш рождения частиц внешним полем: *w~* ~ехр(—*E2/hcgГ). {здесь и везде h с чертой}* Как уже упоминалось ранее при обсуждении общих свойств гравитационного взаимодействия, отличительной особенностью этого взаимодействия, связанной с принципом эквивалентности, является пропорциональность гравитационного заряда *g* полной энергии частицы *Е.* Поэтому вероятность рождения частицы в статическом гравитационном поле имеет гиб-бсовский вид: w~ехр(—*E/kT0),* при этом эффективная “температура” *Т0* оказывается пропорциональной “напряженности” гравитационного поля. В случае черной дыры в качестве *Т0* входит величина *T=hkapa/2pick,* пропорциональная поверхностной гравитации kappa играющая роль напряженности гравитационного поля на поверхности черной дыры.

Квантовое излучение и поляризация вакуума около черных дыр. Строго говоря, спектр частиц, рожденных черной дырой, слегка отличен от теплового. Это отли-чие вызвано тем, что рожденные частицы, прежде чём достичь отдаленного наблюдателя, испытывают дополнительное рассеяние на гравитационном поле черной дыры. Однако если черную дыру поместить в резервуар с тепловым излучением с температурой, равной хокин-говской температуре черной дыры, то установится равновесие. Указанное выше рассеяние на гравитационном поле не мешает установлению равновесия, поскольку частицы, падающие внутрь черной дыры, испытывают точно такое же рассеяние, как и выходящие частицы. Равновесие черной дыры с тепловым излучением в термостате является неустойчивым. Малые флуктуации, приводящие к превышению потока, падающего на черную дыру излучения над уходящим потоком, приводят к. понижению температуры черной дыры и к дополни тельному уменьшению уходящего потока излучения. Аналогичным образом случайное уменьшение массы черной дыры приводит к ее нагреванию и тем самым к дальнейшему уменьшению ее массы. Эта неустойчи вость тесно связана со свойством отрицательности теп лоемкости, присущим гравитационно-связанным систе мам.

Возможность равновесия черной дыры с тепловым излучением невольно порождает следующий вопрос. Хорошо известно, что если газ находится в тепловом равновесии в гравитационном поле, то температура его должна быть выше в тех областях, где гравитационный потенциал меньше. В статическом гравитационном поле условие равновесия имеет вид:

*T(x)|gtt* (x)|1/2= const,

где *Т(х)* — локальная температура газа в точке *X,* Применяя это условие, нетрудно убедиться, что равновесная локальная температура излучения около черной дыры равна:

*Т = Т4Д(1- 2GM/c2r)1/2*.

Здесь *Т4Д —* хокинговская температура черной дыры. Если попытаться теперь оценить плотность энергии излучения e (epsilon)*,* используя закон Стефана—Больцмана е~T4, то можно было бы прийти к выводу, что в равновесии плотность излучения вблизи черной дыры неограниченно растет, или, иными словами, такое равновесие невозможно. Однако приведенный вывод несостоятелен. Ошибка кроется в том, что закон *е* ~ *Т4* справедлив только, если параметры термодинамической системы мало изменяются на расстояниях порядка lambda*~hc/kT?* В случае черной дыры эта характерная длина имеет порядок гравитационного радиуса, и вблизи горизонта событий закон е~T4 не применим. Вычисления показывают, что плотность энергии вблизи горизонта конечна Ч всего лишь в несколько раз превышает плотность энергии теплового излучения на бесконечности.

Следует отметить, что внешнее поле, изменяя характер движения вакуумных виртуальных частиц, поляризует вакуум. Это приводит, в частности, к тому, что во внешнем поле наряду с вкладом реальных частиц в цензор энергии —- импульса имеется дополнительный вклад, связанный с виртуальными частицами. Вблизи черной дыры оба вклада одного порядка и их трудно разделить.

. Квантовый взрыв черных дыр. Квантовое испарение изолированной черной дыры приводит к уменьшению ее массы, а следовательно, и площади. Причина этого “нарушения” теоремы Хокинга в том, что в отличие от классической теории квантовая теория допускает появление таких состояний, в которых плотность энергии отрицательна. Именно это имеет место вблизи черных дыр. Поток частиц из черной дыры на бесконечность, уносящих положительную энергию, сопровождается по-тркрм отрицательной энергии, связанной с поляризацией вакуума, внутрь черной дыры, приводящим к уменьшению ее массы. В результате черная дыра испаряется.

За единицу времени черная дыра с массой *М* грамм излучает энергию

dE/dt ~ 1046 эрг/с *N\*M-2.*

В этом выражении N — число сортов частиц, которые излучает черная дыра. Черная дыра с эффективной температурой *Т* излучает все элементарные частицы, масса покоя которых не превосходит *kT/c2.* Для черных дыр с массой больше 1017 г возможно испускание только безмассовых частиц: фотонов, нейтрино и гравитонов. По мере испарения черной дыры уменьшается ее масса и соответственно растет температура. При этом появляется возможность излучения все более и более массивных частиц Интенсивность излучения растет как вследствие уменьшения .массы дыры *М,* так и из-за роста числа сортов частиц *N.* В результате квантового испарения черная дыра с массой *М* грамм выгорает за время *t~10-27cM3.* Для черных дыр с массой около 1015 г это время жизни оказывается порядка 1010 лет, т. е. порядка времени, прошедшего с начала расширения Вселенной. Время жизни черных дыр, возникающих при коллапсе звезд, более чем на 50 порядков превосходит возраст Вселенной.

Процесс квантового испарения особенно значителен для малых черных дыр с массой меньшей или порядка 1015 г. Последний этап эволюции такой черной дыры протекает очень бурно и, по сути дела, представляет взрыв, при котором в результате распада оставшейся черной дыры с массой порядка 3\*109 г за последнее 0,1 с выделяется энергия 1030 эрг. Хотя по астрофизическим масштабам эта энергия не очень велика, однако это явление довольно внушительно и уникально, так как при этом в крайне малой области пространства размером меньше радиуса нуклона, освобождается энергия, эквивалентная энергии одновременного взрыва 1 миллиона 1 мегатонных водородных бомб. Наличие вращения и заряда у малой черной дыры мало изменяет описанную картину. В этом случае излучение Хокинга с температурой *T=hkappa/2pick* сопровождается дополнительным излучением, уносящим угловой момент дыры и ее заряд, так что через довольно короткое время черная дыра становится практически невращающейся и нейтральной.

## ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Существуют ли малые черные дыры? До работы С. Хокинга черные дыры могли считаться образцами идеальных захоронений вещества во Вселенной. Попавшее в них вещество не только нельзя извлечь, но даже память о его свойствах стирается, отсекаясь мощным гравитационным полем. Энергию этого вещества можно было считать безвозвратно утерянной. После работы С. Хокинга представление о черных дырах претерпело существенное изменение. Черные дыры в результате квантового распада со временем возвращают запасенную энергию обратно. Они могут служить своеобразным преобразователем вещества из одной формы в дру“ гую. Дело в том, что черные дыры с одинаковой массой, образованные, например, при коллапсе нейтрального вещества и антивещества, неотличимы и при квантовом распаде излучают равное число частиц и античастиц { Это свойство, вообще говоря, может -нарушаться, если при квантовом испарении рождаются частицы, которые затем распада-птся с нарушением СP-ннвариантности.}. В процессе образования и последующего испарения черных дыр могут нарушаться законы сохранения барием-ного и лептонного зарядов.

При обсуждении этих и многих других удивительных следствий явления квантового испарения черных дыр сталкиваются, однако, со следующим чрезвычайно важным вопросом: могут ли существовать в природе малые черные дыры, поскольку следствия, вытекающие из эффекта Хокинга, касаются главным образом черных дыр с малой массой?

В 1966 г. советские ученые Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков и в 1971 г, С. Хокинг обратили внимание на то, что, хотя в настоящее время образование черных дыр с массой, меньшей солнечной, невозможно, на раннем этапе развития Вселенной малые черные дыры могли возникать из первоначальных неоднородностей крайне плотного расширяющегося вещества. Хотя давление вещества в ту эпоху также было крайне велико, перепады давления, а следовательно, и силы, с ними связанные, практически отсутствовали. Расширение более плотной области происходит медленнее и вскоре сменяется сжатием. Распределение вещества при этом становится заметно неоднородным, однако для возникновения значительного градиента давления требуется время порядка отношения размера области к скорости звука в среде. Если процесс сжатия происходит столь быстро, что градиент давления не успевает возникнуть, ничто не препятствует образованию черной дыры. Подобные черные дыры, образующиеся на раннем этапе эволюции Вселенной, получили название первичных. На стадии, когда плотность вещества равна р, могут возникать черные

дыры с массой M~- sqrt(c6/pG3) -~ 1,6 • 1042 г2р-1/2(плотность р в граммах на кубический сантиметр).

Стандартный сценарий эволюции Вселенной. Прежде чем перейти к обсуждению космологических следствий эффекта квантового испарения первичных черных дыр, остановимся (по необходимости кратко) на основных этапах развития Вселенной. В настоящее время средняя плотность вещества по Вселенной крайне мала. Она составляет всего лишь от З\*10-31 до 10-29 г/см3. Однако известный факт разбегания галактик указывает на то, что в отдаленном прошлом средняя плотность вещества была гораздо выше? Существование реликтового излучения с температурой 2,7 К свидетельствует в пользу того, что в более ранние времена вещество во Вселенной было сильно нагрето.

Известные в настоящее время данные наблюдений (высокая степень — до 0,01% — изотропности реликтового излучения, изотропность распределения галактики радиоисточников, довольно высокая степень однородности распределения галактик и их систем в масштабах больше 100 мегапарсек) позволяют заключить, что в среднем при усреднении по масштабам порядка 100 мегапарсек распределение вещества во Вселенной довольно однородно и изотропно. С другой стороны, существование галактик и их систем указывает на то, что в-меньших масштабах имеются значительные отклонения от равномерного распределения.

Все эти факты находятся в соответствии с принятой *в* настоящее время стандартной моделью “горячей Вселенной”. Согласно этой модели на ранних этапах Вселенная представляла собой в среднем однородное и изотропное распределение горячей материи, расширение которой началось примерно 10—20 млрд. лет тому назад. Формально (если, не задумываясь, верить в неограниченную применимость теории Эйнштейна) это расширение началось из состояния вещества с бесконечной плотностью. Однако по крайней мере при плотности, большей чем *pg* ~ c5/hG2~ 1093 г/см3, классическая теория гравитации неприменима из-за большой величины квантово-гравитационных эффектов. Обычные представления о структуре и свойствах пространства-времени, по-видимому, требуют значительного пересмотра при значениях кривизны порядка 1066 см-2, соответствующего этой плотности. Поэтому фактически обычные классические уравнения Эйнштейна описывают эволюцию Вселенной, начиная с некоторого момента времени *ta,* в который вещество имело большое, но конечное значение плотности ро. Обычно полагают *t0* ~ 10-43 с, ро <~ 1093 г/см3. Распределение плотности вещества в этот момент предполагается в среднем однородным и изотропным.

При временах *t0* - 10-43 с, квантово-гравитационная эра сменяется адронной эрой, длящейся до 10-4 с. Расширение Вселенной приводит к уменьшению плотности вещества в течение адронной эры до ядерной, а температура падает до 1013 К. В конце этой эры происходит аннигиляция адронов с антиадронамп.

Позднее, 10-4 *с <~* *t<~* 10 с (лептонная эра), вследствие понижения температуры последовательно аннигилируют сначала мю+мю--пары, .а затем и е+е--пары, и сначала для мюонного, а затем для электронного нейтрино вещество во Вселенной становится практически прО

зрачным — происходит “отрыв” нейтринного реликтового излучения. В начале следующей, радиационно-до-минирующей эры (10 с<~ t *<~* 1012 с), по прошествии около 3 мин от начала расширения нейтроны и протоны образуют ионизованный газ, состоящий в основном из водорода (70—75%, по массе) и гелия (25—30% по массе). В конце этой эры температура понижается до 4000 К, происходит рекомбинация водорода, резко возрастает прозрачность водородного газа для фотонов и происходит “отрыв” реликтового фотонного излучения. В это же время из-за резкого смягчения уравнения состояния, вызванного рекомбинацией, становится возможным развитие гравитационных неустойчивостей, приводящих к образованию галактик и звезд.

Первичные черные дыры и начальные возмущения.

Процессы образования первичных черных дыр с массой, меньшей солнечной, могли происходить лишь в адрон-ную эру, когда средняя плотность вещества была достаточно высока. Первичных черных дыр образуется тем больше, тем больше была амплитуда начальных неоднородностей и чем “мягче” уравнения состояния вещества в момент их образования. Дальнейшая судьба первичных черных дыр зависит от их массы. Черные дыры с массой от 1015 до 1033 г могли бы доживать до настоящего времени и оказаться “живыми свидетелями” процессов, происходивших во времени 10-23—10-5 с после “большого взрыва”.

В 1966 г. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков обратили внимание на то, что изменения плотности вещества в черных дырах и плотности окружающего их ультрарелятивистского газа различны. Вследствие этого даже если на вещество, заключенное в подобные черные ды-

ры, приходится значительная доля общего количества вещества в настоящее время, то в момент образования этих черных дыр доля вещества, попавшего в них, была крайне мала.

Дело в том, что совокупность подобных черных дыр

можно рассматривать как газ частиц без давления. При увеличении объема системы в *а* раз плотность такого газа падает как а-1. С другой стороны, окружающее черные дыры горячее вещество представляет собой ультрарелятивистский газ, давление которого *р* связано с плотностью энергии-е соотношением: р =е/3. При-увс-



Р и с. 8. Ограничение на допустимую долю р массы оещества, попадающего в первичные черные дыры с массой *М* (в граммах), в момент их образования

личении объема в *а* раз происходит дополнительное уменьшение плотности энергии, связанное с работой силы давления, в результате уменьшение плотности энергии происходит по закону а-4/3 Даже при равной плотности энергии в черных дырах и в веществе в настоящее время, в момент образования черных дыр в далеком прошлом плотность окружающего вещества по указанной причине должна значительно превосходить плотность вещества в черных дырах.

Первичные черные дыры с меньшей массой, образовавшиеся ранее 10-23 с после начала расширения Вселённой, уже распал-ись к настоящему времени в результате квантового испарения. Тем не менее, наблюдая наличке или отсутствие продуктов их распада, можно найти ограничения на возможное число и спектр масс подобных черных дыр. Первичные черные дыры с массой около 5\*1014 г должны распадаться в настоящее время. Вспышки при квантовом взрыве таких черных дыр давали бы потоки у-квантов с энергией порядка 200 МэВ. Наблюдения на gamma-телескопах не дают указаний на подобные вспышки с нужными свойствами. С другой стороны, из наблюдаемого значения плотности фонового у-излучення в этом диапазоне можно заключить, что если бы подобные черные дыры существовали и были равномерно распределены во Вселенной, то на кубический парсек пространства их приходится менее десяти тысяч.

Результаты многочисленных работ, посвященных анализу космологических ограничений на допустимое число первичных черных дыр в широком диапазоне их масс, представлены на рис, 8. Так как число и спектр

масс первичных черных дыр тесно связаны со спектром начальных неоднородностей и уравнением состояния на ранних этапах, то появляется привлекательная возможность получения весьма ценной информации о состоянии вещества при сверхвысоких температурах и давлениях и о строении Вселенной в крайне отдаленном прошлом { Заметим, что данные о реликтовом фотонном излучении позволяют непосредственно судить о свойствах Вселенной в момент отрыва излучения от вещества (во времени ~1012 с). О более ранних этапах (во времена ~ 1 с) косвенную информацию дает соотношение между количеством синтезированного гелия, дейтерия и водб-рода во Вселенной}. Основной вывод, который удается сделать при анализе полученных ограничений на число первичных черных дыр во Вселенной, состоит в том, что в широком диапазоне масштабов неоднородности во Вселенной на ранних стадиях расширения были поразительно малыми.

## ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, ТЕРМОДИНАМИКА, ИНФОРМАЦИЯ

Черные дыры и термодинамика. Открытие теплового излучения черной дыры было полной неожиданностью для большинства специалистов, хотя к моменту этого открытия уже существовало довольно много соображений, свидетельствующих о тесном переплетении физики черных дыр и термодинамики.

Известный американский физик Дж. Уилер, по-видимому, первым обратил внимание на то, что в рамках классической теории тяготения уже сам факт существования черной дыры противоречит закону возрастания энтропии. Действительно, представим себе, что черная дыра поглощает горячее тело, обладающее некоторым запасом энтропии. Тогда внешний наблюдатель видит уменьшение полной энтропии мира, доступного его наблюдению.

Если мы не хотим отказаться от закона возрастания энтропии только по той причине, что во Вселенной где-то образовалась черная дыра, следует сделать вывод, нш всякая черная дыра сама по себе обладает определенным запасом энтропии и что горячее тело при падении передает ей не только массу, угловой момент и заряд, но и свою энтропию S, так что энтропия черной дыры возрастает на величину, не меньшую 5. Однако еще раньше, чем пришли к такому выводу, появилось довольно много указаний на то, что свойства одной из характеристик черной дыры — площади ее поверхности *А* напоминают свойства энтропии. Действительно, согласно теореме Хокинга, при любых классических процессах площадь Aне убывает, т. е. ведет себя так же, как энтропия. Вообще оказалось, что аналогия между физикой черных дыр и термодинамикой простирается довольно далеко. Она относится как к конкретным термодинамическим устройствам (типа тепловой машины), так и к общим законам термодинамики, каждому из которых нашелся свой аналог в физике черных дыр. Четыре закона физики черных дыр. Так же как термодинамическая система, произвольная черная дыра после релаксационных процессов, сопровождающихся излучением гравитационных волн, приходит в равновесие (стационарное состояние), в котором она полностью .описывается заданием конечного числа параметров: *М, J, Q.* Внутренняя энергия *Е = Мс2* стационарной черной дыры может быть найдена, если известны площадь поверхности черной дыры *А,* ее угловой момент и электрический заряд. Для двух стационарных черных дыр с” слегка отличными значениями площади б/4 (б-дельта), углового момента б/ и электрического заряда бQ внутренняя энергия отличается на величину бЕ = бМс2, равную:

Первый закон физики черных дыр бE=(kappa\*c2/8piG)\*бA+OMEGA\*бJ+ФбQ

Здесь kappa — поверхностная гравитация,OMEGA — угловая скорость и Ф — электрический потенциал черной дыры. Второй и третий члены в правой части этой формулы описывают изменение энергии вращения и электрической энергии. Внешне эта формула напоминает первое начало термодинамики: бE = T\*бS + OMEGA\*бJ+ФбQ, дающее выражение для изменения внутренней энергии термодинамической системы при изменении ее энтропии 6S, углового момента бJ и заряда бQ.

Дж. Бекенштейн, ученик Дж. Уилера, отнесся к этой аналогии серьезно, приписав черной дыре энтропию S, пропорциональную ее площади *А,* и температуру *Т,* пропорциональную ее поверхностной гравитации kappa.*.* Для того чтобы продемонстрировать полезность термодинамического подхода в физике черных дыр и оценить коэффициенты пропорциональности в выражении для энтропии и температуры черной дыры, он рассмотрел модель тепловой машины, превращающей теплоту в работу. Ее действие основано на сбрасывании в черную дыру, выступающую в роли холодильника, некоторого количества тепла из опускаемого к горизонту событий контейнера, заполненного тепловым излучением.

Дж. Бекенштейн оценил КПД этой своеобразной тепловой машины и, используя формулу Карно, получил для температуры черной дыры выражение, лишь на численный множитель порядка 1 отличающееся от хокин-говской температуры черной дыры. Если использовать приведенное выше выражение для бE и положить температуру черной дыры равной хокинговской, то соответствующее значение энтропии черной дыры оказывается равным:

Sчд=Ar/4(hG/c3)тождесвенно= *Ak/4l2пл*

Теорема Хокинга, позволяет записать аналог второго начала термодинамики в видег

Второй закон физики чёрных дыр

бSчд**>=0.**

В обоих случаях (в термодинамике и физике черных дыр) второе начало означает присущую системе в целом существенную необратимость и выделяет тем самым направление времени. В термодинамике .закон возрастания энтропии приводит к тому, что часть внутрен? ней энергии, которая не может быть превращена в работу, увеличивается со временем. Совершенно аналогично закон возрастания площади черной дыры означает, что доля внутренней энергии черной дыры, которую из нее нельзя извлечь, возрастает со временем. Как и в термодинамике, величина SЧД связана с невозможностью получить информацию о строении системы, в данном случае о внутренности черной дыры.

На первый взгляд наличие хокинговского испарения, в результате которого происходит уменьшение площади поверхности черной дыры, существенно подрывает рассматриваемую аналогию. Однако это не так. Поскольку хокинговское излучение носит тепловой характер, оно обладает энтропией SИЗЛ, причем оказывается, что всегда сумма энтропии этого излучения и энтропии черной дыры не убывает со временем. Поэтому выполняется

Обобщенный второй закон физики черных дыр

бSЧд + бSвещ>=0,

где SЧд— сумма энтропии черных дыр, в рассматриваемой системе и Sвещ — полная энтропия вещества и излучения вне черных дыр. Тот факт, что в обобщенный закон на одинаковом основании входят, казалось бы, разные по своей природе величины, еще раз указывает на их глубокое родство.

В термодинамике равновесие невозможно, если температура разных частей системы различна. Наличие состояния термодинамического равновесия и существование .температуры в термодинамике постулируются нулевым началом. В физике черных дыр справедливо аналогичное утверждение:

Поверхностная гравитация kappa стационарной черной дыры постоянна везде на горизонте событий.

Если поверхностная гравитация в разных точках поверхности черной дыры различна, то такая черная дыра нестационарна и предоставленная самой себе с течением времени приходит в стационарное состояние с постоянным к. Этот нулевой закон выполняется и для системы, состоящей из термодинамической системы и черной дыры.

Наконец, в полной аналогии с третьим законом термодинамики можно сформулировать Поверхностную гравитацию невозможно обратить в нуль посредством любого конечного числа операций.

Сформулированные законы физики черных дыр оказываются крайне полезными при рассмотрении различных явлений с участием черных дыр. Точно так же, как начала термодинамики, они позволяют изучать многие общие характеристики таких процессов, не привлекая конкретные решения сложных динамических уравнений. Черные дыры, энтропия и информация. Наличие связи тепловых свойств черных дыр с потерей информации об области пространства-времени внутри ее находится в согласии с общим информационным подходом к термодинамике, который восходит к классикам теории теплоты, был сформулирован Л. Сциллардом и развивался многими физиками и математиками. Суть этого подхода состоит в утверждении, что существует прямая связь между недостатком информации о физической системе и величиной ее энтропии.

Прежде чем привести более точную, количественную формулировку этой связи, напомним, как происходи? переход обычной динамической системы в состояние тер модинамического равновесия. В процессе такого пере хода система быстро “забывает” свое начальное состоя- ние, происходит “запутывание” (стохастизация) движет ния составляющих ее частиц. Вследствие присущей си стеме взаимодействующих частиц динамической не устойчивости малые неопределенности в начальных ус- ловиях быстро возрастают. В результате возникают бы; строе перемешивание состояний частиц и равномерное заполнение всей доступной системе области значений динамических переменных. Аналогичным образом взаимо действие динамической системы с термостатом приводит к тому, что все макроскопические состояния, отвечаю щие заданным микроскопическим параметрам системы, оказываются равновероятными. Иными словами, в тер модинамике состояние системы с заданным набором макроскопических параметров является крайне вырож-. денным, поскольку ему отвечает большое число *N* разт личных микроскопических состояний. Мерой этого выт рождения и служит энтропия системы *S = klnN.*

Равновероятность вырожденных состояний означает, что чем больше *N,* тем меньшей информацией о том, в каком из конкретных состояний находится система, мы располагаем. В простейшем случае, когда до некоторого процесса имелось *Р* равнозначных ответов на вопрос о состоянии системы, а после него число равнозначных ответов стало р, изменение информации в результате этого процесса равно{/\-дельта треугольник} /\*I = kln(P/p).* Если /\I>0, мы имеем дело с приростом информации, в обратном случае — С ее убылью. Переход динамической системы в состоял ние термодинамического равновесия в процессе стоха-стизации связан с потерей информации, и /\I = — *klnN.* В нашем простом случае мы приходим к важному соотношению: /\S = — /\I, имеющему общий характер. Уменьт шение количества информации о физической системе соответствует увеличению ее энтропии.

Анализ конкретных процессов измерения приводит к следующему утверждению, являющемуся ключевым для информационного подхода к термодинамике: всякое измерение, позволяющее получить дополнительную информацию о состоянии системы и тем самым уменьшить ее энтропию, необходимо сопряжено с такими действиями, которые сами приводят к возрастанию энтропии в окружающем мире, перекрывающем ее понижение в системе,

В черной дыре информация о состоянии сколлапси-ровавшего вещества отсекается мощными силами тяготения. Чёрная дыра “забывает” свою предысторию, сохраняя память только о “макроскопических” характеристиках: массе, заряде и угловом моменте. В соответствии с этим энтропия черной дыры SЧд служит мерой потери информации в результате коллапса, и число различных (“микроскопических”) состояний системы, коллапс которой приводит к образованию черной дыры с заданными параметрами *М, J, Q,* должно быть пропорционально ехр(Sчд/k). К сожалению, прямое вычисление этого числа состояний представляет собой весьма сложную и еще не решенную задачу.

До открытия эффекта Хокинга мы знали единственный механизм появления тепловых свойств у динамической системы. Он состоит в превращении упорядоченного движения частиц в хаотическое; Физика черных Дыр указала нам новый механизм, позволив увидеть новые и неожиданные аспекты термодинамики, обогатив наше понимание природы теплоты.

## ЧТО ВНУТРИ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ?

Теоремы о сингулярностях. Область пространства-Времени внутри черной дыры недоступна для изучения отдаленному наблюдателю. Однако падающий вместе с;коллапсирующим телом наблюдатель может “увидеть” происходящие там события. Таким образом, предсказания теории, касающиеся внутренности черной дыры, в принципе допускают проверку. Своеобразие этой проверки состоит в том, что результаты ее не могут быть сообщены наружу и использованы для сравнения с теорией физиками, находящимися вне черной дыры.

Учет квантовых эффектов и открытие хокинговского излучения, по-видимому, несколько изменяют эту ситуацию. При уменьшений размера черной дыры в резулъта-

те квантового испарения ее радиус становится все мень ше и меньше, и свойства гравитационного поля в обла стях, находившихся до начала испарения под гравит,а- ционным радиусом, могут повлиять на сам характер ис парения. При сферическом коллапсе все тела, попавшие под гравитационный радиус, достигают за время порядка *RR/c* физически особой точки r = 0, в которой кривизна пространства-времени формально обращается в беско нечность. В 1965 г. английский физик Р. Пенроуз дока зал теорему, утверждающую, что и в самом общем слу чае, если только выполняются уравнения Эйнштейна,

плотность энергии положительна и начальные данные полностью определяют решение в будущем, внутри черной дыры обязательно имеются особые точки, в которцх

обрываются мировые линии. Эта и другие подобные.тео-ремы, доказанные Р. Пенроузом и С. Хокингом в конде 60-х гг., указывают на то, что в рамках классических уравнений Эйнштейна появление сингулярностей внутри нерной дыры в процессе коллапса является неизбежным.

Принцип “космической цензуры”. Строго говоря, появление, сингулярностей в теории сигнализирует о том, что эта теория является неточной или неполной. Поэтому уже сам факт существования сингулярностей бросает, вызов теоретикам. При описании свойств черных дыр с точки зрения внешнего наблюдателя сингулярности, лежащие под горизонтом, никак себя не проявляют. Иное дело, если сингулярность образуется вне горизонта событий. Существование таких сингулярностей, получивших название “голых”, означало бы нарушение свойства детерминированности теории. Принято считать, чтб в физически приемлемых ситуациях голые сингулярности не образуются.

Соответствующий принцип, получивший название принципа “космической цензуры”, был сформулирован Р. Пенроузом в 1969 г. Согласно этому принципу, прежде чем в процессе гравитационного коллапса неограниченно возрастет кривизна и разовьется сингулярность, гравитационное поле достигает такой силы, что перестает выпускать информацию наружу, т. е. возникает горизонт событий, окружающий сингулярность. И хотя принций “космической цензуры” выглядит весьма правдоподобно, а многочисленные работы, содержащие ана-

лиз различных мысленных экспериментов, его подтверждают, тем не менее до сих пор отсутствует достаточно общее строгое доказательство этого принципа. Доказательство принципа “космической цензуры” и выяснение условий, при которых он справедлив, являются одной из наиболее важных нерешенных задач общей теории относительности { Сам Пенроуз так высказался об этой ситуации: “Таким образом, мы имеем дело, возможно, с самым фундаментальным нерешенным вопросом общерелятивистской теории коллапса, а именно: существует ли “космический цензор”, запрещающий появление голых сингулярностей и облачающий каждую из них в абсолютный горизонт событий?”}.

Пространство-время вблизи сингулярности незаряженной невращающейся черной дыры. Если коллапси-рующее тело, образующее черную дыру, в момент пересечения горизонта обладало незначительными отклонениями от сферической симметрии, то возникающая нестационарная черная дыра слабо отличается от шварцшильдовской. В процессе дальнейшего сжатия под горизонтом событий отклонение от симметрии нарастает, и можно было бы ожидать, что даже малые первоначальные возмущения существенно изменяют свойства пространства-времени вблизи сингулярности.

В 1978 г. советские физики А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков обратили внимание на то, что хотя наблюдатель, падающий вместе с коллапсирующим телом, действительно столкнется с ростом возмущений, тем не менее наблюдатель, падающий внутрь черной дыры через длительное время после ее образования, обнаружит, что возмущения исчезают и пространство-время вблизи сингулярности практически не отличается от идеального сферически-симметричного пространства-времени, описываемого геометрией Шварцшильда. Причина исчезновения возмущений вблизи сингулярности та же, что при перестройке поля в процессе превращения черной дыры в стационарную. Наличие “веса” приводит к “падению” возмущений на сингулярность, так что влияние источников подобных возмущений, находящихся на коллапси-рующем теле, вымирает вблизи *r = 0* при удалении от границы этого тела.

Внутренность заряженной и вращающейся черной дыры. Хотя при внесении малого заряда или малого углового момента свойства черной дыры изменяются незначительно, глобальные свойства точных решений уравнений Эйнштейна, как показывает их анализ, претерпевают качественное изменение. При коллапсе заряда Q возрастающие дальнодействующие силы отталкивания способны остановить сжатие и заряд начнет расширяться9. Если справедлив принцип причинности, а у физиков есть все основания считать, что это так, то при расширении заряд обязан выйти в какую-то другую область пространства-времени, сигналы из которой не достигают наблюдателя, расположенного вне черной дыры. Соответствующее точное решение уравнений Эйнштейна показывает, что это пространство находится в абсолютном будущем. Более того, формально возможен процесс коллапса и расширения заряда без развития сингулярности. Нарушения теоремы Пенроуза о сингулярностях не происходит, поскольку оказывается нарушенным одно из условий теоремы, а именно, дальнейшая эволюция заряда оказывается непредсказуемой. Эта эволюция зависит не только от начальных данных, но и от задаваемых произвольно свойств того мира, куда заряд выходит. Аналогичная ситуация имеет место в случае если система вращается.

В 1979 г. советские физики И. Д. Новиков и А. А. Старобинский обратили внимание на то, что учет квантового рождения частиц в электрическом поле может Качественно изменить ситуацию. Дело в том, что прежде чем произойдет остановка коллапса заряженного тела(, его электрическое поле настолько возрастает, что рождающиеся электрон-позитронные пары будут оказывать существенное влияние на метрику. Анализ этого влияния приводит к выводу, что выход в новое пространств, По-видимому, невозможен, а ситуация в целом близка К той, которая имеет место при сферическом коллапсе незаряженного вещества.

Роль эффектов квантовой гравитации. Сингулярности — это болезнь общей теории относительности, и, как показывают строгие теоремы, болезнь неизлечимая. Однако имеются основания считать, что учет эффектов квантовой гравитации, приводящий к модификации уравнений Эйнштейна в областях с большой кривизной,

\* Смена сжатия расширением возможна при r*<.GМ/сг(1--sqrt(*1-(Q2/GM2))),

является тем универсальным средством, которое предотвращает появление сингулярностей. Величина *1пл*= = sqrt(hG/c3)~- 10-33 см, называемая планковской длиной, является характерным масштабом, возникающим при рассмотрении квантовогравнтационных явлений. Эффекты, связанные с квантовой природой гравитационного поля, оказываются существенными тогда, когда кривизна пространства-времени больше или порядка lпл-2. Модификация уравнений Эйнштейна связана с добавлением в уравнения членов, учитывающих *вклады* в энергию-импульс квантовых эффектов поляризации вакуума и рождения частиц гравитационным полем.

При сравнении поляризации вакуума в гравитационном поле с поляризацией вакуума в электростатическом поле выясняется одно крайне существенное отличие. Поляризация вакуума связана с действием электростатического поля на вакуумные виртуальные пары. В электрическом поле заряженные частицы виртуальной пары двигаются таким образом, что ближе к заряду, создающему внешнее поле, находится частица виртуальной пары, имеющей противоположный заряд. Поэтому даже в том случае, когда отсутствует рождение реальных частиц из вакуума, взаимодействие виртуальных пар при усреднении приводит к экранировке внешнего заряда. Наблюдаемый на бесконечности заряд оказывается меньше, чем заряд, внесенный в вакуум.

В гравитационном поле, поскольку одноименные заряды притягиваются, имеет место обратное явление. Эти простые качественные соображения подтверждаются результатами, полученными в 1977 г. советскими учеными Г. А. Вилковыским и Е. С. Фрадкиным, которые свидетельствуют в пользу того, что квантовая гравита-ция является так называемой **“асимптотически свободной”** теорией, т. е. теорией, в которой константа взаимодействия на малых расстояниях, эффективно уменьшаясь, обращается в ноль. В соответствии с этим эффекты квантовой гравитации проявляются в ослаблений силы притяжения на малых расстояниях. Это может привести к отсутствию сингулярности при гравитационном коллапсе. В пользу такой возможности свидетельствует также то, что в квантовой теории условие положительности плотности энергии нарушается, и поэтому строгие теоремы, которые используют это предположе-

ние в той или иной форме, перестают работать. Вопрос о роли эффектов квантовой гравитации вообще и в черных дырах в частности чрезвычайно важен. И хотя квантовая гравитация как теория еще далеко не завершена, а применение ее к исследованию конкретных вопросов'связано со значительными, часто принципиальными трудностями, уже полученные на этом пути результаты подтверждают надежду на то, что квантовая гравитация действительно устранит сингулярности.

## ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ГИПОТЕЗЫ

Элементарные черные дыры (максимоны). Что же остается после взрыва черной дыры? Результаты, полученные С. Хокингом, не дают ответа на этот вопрос, поскольку они непосредственно применимы лишь до тех пор, пока масса испаряющейся черной дыры гораздо больше планковской массы mпл =sqrt[hc/G]~- 10-5г. В 1979г. Г. А, Вилковыский и В. П. Фролов показали, что учет эффектов квантовой гравитации приводит к тому, что черные дыры с массой, меньше планковской, не образуются. Поэтому если только отсутствует сингулярность внутри черной дыры { При наличии сингулярности возможно в результате распада чёрной дыры ее превращение в “голую” сингулярность.}, то имеются следующие две возможности: черная дыра распадается полностью иди в результате распада остается элементарная черная дыра с массой порядка планковской.

Гипотеза о возможности существования в природе подобных элементарных черных дыр (получивших название максимонов) была выдвинута в 1965 г. советским физиком М. А. Марковым. Максимоны (если только они действительно существуют в природе) могли бы играть роль максимально тяжелых элементарных частиц. Обладая сравнительно большой (почти макроскопической) массой, максимон имеет крайне малый размер: *1пл ~* ~ 10-33 сантиметра. Чрезвычайно малое сечение взаимодействия максимонов с веществом (сигмаmпл~10-66 см2) приводит к тому, что звезды и планеты практически полностью для них прозрачны {Длина свободного пробега максимона в веществе ядерной плотности сравнима с размером видимой части Вселенной. }. Поэтому даже если бы в настоящее время максимонов во Вселенной было много, то крайне трудно было бы обнаружить их теми методами, которыми регистрируют другие элементарные частицы.

Исходя из оценок средней плотности вещества во Вселенной, можно заключить, что если бы максимоны были распределены равномерно, то на 1 млрд. км3 пространства приходилось бы не более одного максимона. Если справедлива стандартная модель горячей Вселенной, то даже при средней плотности максимонов в настоящее время порядка критической (~10-29 г/см3), на ранних этапах эволюции Вселенной доля вещества в максимонной составляющей была пренебрежимо мала. В настоящее время вопрос о существовании максимонов и их роли в эволюции Вселенной остается открытым.

Виртуальные черные дыры и пенная структура про странства-времени. Даже если максимоны нестабильны, элементарные черные дыры могут, по-видимому, играть важную роль в физике элементарных частиц. При вы числении собственной энергии частицы обычно учиты вают вклад промежуточных состояний с произвольно большой энергией, что приводит к появлению известных расходимостей. Учет гравитационного взаимодействия соответствующих виртуальных частиц и возможности появления виртуальных черных дыр в промежуточном состоянии может привести к устранению этих расходи мостей. Виртуальные (короткоживущие) черные дыры могут возникать и в вакууме в результате квантовых флук туации. Квантовые флуктуации гравитационного поля тем больше, чем меньше масштабы длин. На расстоя ниях порядка планковских (~10-33 см) флуктуации метрики порядка единицы. Подобные флуктуации озна чают сильные отклонения от плоской геометрии. Иными словами, пространство-время в малых масштабах скорее напоминает мыльную пену, чем гладь воды.

Представление о пенной структуре пространства-времени, сформулированное в 50-х гг. известным американским физиком Дж. Уилером, в последнее время получило дальнейшее развитие в работах английской группы, возглавляемой С. Хокингом. Взаимодействие элементарных частиц с виртуальными черными дырами (пространственно-временной “пеной”) может приводить к таким следствиям, как несохранение барионного и лептонного зарядов. И хотя ожидаемое при этом время жизни протона (~1050 лет) почти на 20 порядков превосходит время жизни протона, предсказываемое в рамках теорий Великого объединения, сама возможность подобных процессов может иметь фундаментальное значение, особенно при обсуждении вопроса о происхождении Вселенной.

Завершая рассказ о черных дырах, хотелось бы обратить внимание на следующее. Еще 20 лет назад мало кто верил в саму возможность существования черных дыр. Гипотеза о черных дырах привлекла к себе пристальное внимание после открытия нейтронных звезд. И удивительное дело — черные дыры сразу “пришлись ко двору” в астрофизике. Им нашлось место не только в виде остатков при вспышках сверхновых, но и в ядpax шаровых скоплений, галактик и квазаров. .

После открытия С. Хокингом явления квантового испарения черных дыр особое значение приобрел вопрос о (космологической роли малых черных дыр. Гипотеза об элементарных черных дырах (максимонах) не только интересна своими возможными космологическими следствиями, -но и существенна для физики элементарных частиц. Виртуальные черные дыры явятся, возможно, важным элементом будущей квантовой теории гравитации. Исследование свойств черных дыр привело к обнаружению глубоких связей между гравитацией и термо-динамикой. Этот простой перечень говорит о том, что за последние 16—15 дет, по сути дела, возникла, новая область науки — физика черных дыр со своим объектом исследования и своими проблемами. Проблемы эти, зачастую носят столь фундаментальный характер, а объект настолько удивителен, что эта область привлекает внимание многочисленных исследователей. И хочется надеяться, что она порадует физиков новыми, быть может, еще более неожиданными, результатами.

## ЛИТЕРАТУРА

Гинзбург В. Л. О теории относительности. М., Наука, 1979.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд. М., Наука, 1971.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной. — Природа, 1972, N 4, с. 28.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д., Староби'н-ский А. А. Черные и белые дыры. — Природа, 1976, № 1, с. 34.

Кауфман У. Космические рубежи теории относительности. М., Мир, 1981.

Киржниц Д. А., Фролов В. П. намика, информация. — Природа, 1981, N 11. с. 2.

Лайтман А. П., Сюняев Р. А., Шакура Н. И., Шапиро С. Д., Эрдли Д. М. Современное состояние данных о Лебеде Х-1. — Успехи физических наук, 1978, т. 126, с. 515.

Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной. М., Знание, 1977.

Новиков И. Д., Пол на рев А. Г. Первичные черные дыры. — Природа, 1980, Л” 7, с. 12.

Фролов В. П. Черные дыры и" квантовые процессы в них. — Уепехи физических наук, 1976, т. 118, с. 473.