

## КОМПАКТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

В астрофизике те звезды, в которых плотность вещества намного больше, чем в обычных звездах, известны как компактные объекты. Сюда включают белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. В дополнение к очень высокой плотности компактные объекты характеризуются тем фактом, что ядерные реакции в их недрах полностью остановились. Следовательно, они не могут противостоять силе гравитации тепловым давлением газа. В белых карликах и нейтронных звездах действие гравитации удерживается давлением вырожденного газа. В черных дырах сила гравитации полностью доминирует и сжимает звездное вещество до бесконечной плотности.

### Белые карлики.

Первым из открытых белых карликов был Sirius B, компаньон Сириуса. Необычная природа Сириуса B была осознана в 1915 г., когда было обнаружено, что его эффективная температура очень высока (около 10000K). При этом масса Сириуса B оказалась равной массе Солнца. Следовательно, светимость этой звезды, если бы она имела размеры Солнца, должна была бы в 10 раз превосходить солнечную. Наблюдается же светимость в 400 раз меньшая солнечной, что ниже ожидаемой более чем в 4 тысячи раз. Слабая яркость этого объекта объясняется тем, что у него очень малый радиус, слегка меньше, чем радиус Земли. Следовательно, его плотность чрезвычайно большая.

Высокая плотность Сириуса B была подтверждена в 1925 г., когда было измерено гравитационное красное смещение его спектральных линий. Это измерение послужило также наблюдательным подтверждением ОТО.

Белые карлики встречаются и как одиночные звезды и в составе двойных систем. Их спектральные линии уширены сильным гравитационным полем на поверхности звезды. У некоторых белых карликов спектральные линии еще больше расширены вследствие быстрого вращения. Наблюдаются также сильные магнитные поля. Так как белый карлик не имеет внутренних источников энергии, он будет медленно охлаждаться, меняя свой цвет от белого до красного и, наконец, до черного. В Млечном Пути должно быть большое число невидимых черных карликов.

Если белый карлик входит в состав тесной двойной системы, то под действием приливных сил возможно перетекание на него вещества с соседней звезды, что может привести к увеличению его массы. При приближении к Чандрасекаровскому пределу в центре белого карлика начнется термоядерное горение, приводящее к взрыву сверхновой 1-го типа. Возможен также коллапс белого карлика в нейтронную звезду.

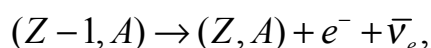
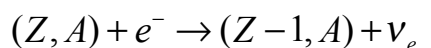
Радиус вырожденных звезд обратно пропорционален кубическому корню из их массы. В отличие от нормальных звезд, в этом случае с ростом массы радиус уменьшается.

### Нейтронные звезды.

Мы уже видели, что при  $M > M_{ch}$  белый карлик не может существовать как устойчивый объект, поскольку сила давления вырожденного газа оказывается неспособной противостоять гравитации. Звезда быстро коллапсирует, и этот коллапс может привести к возникновению нейтронной звезды.

Важной реакцией в течение финальных стадий звездной эволюции является так называемый УРКА-процесс, который производит большую эмиссию нейтрино без воздействия на состав вещества. Он был предложен в 1940 г. Шёнбергом и Гамовым. УРКА-процесс был изобретен в Рио-де-Жанейро и назван так в честь местного казино. По-видимому, деньги в казино «УРКА» исчезали точно так же, как энергия исчезала из недр звезд в форме нейтрино. Утверждают, что казино было закрыто властями, когда эта аналогия стала известна.

УРКА-процесс состоит из следующих реакций



где  $Z$  есть число протонов в ядре,  $A$  – массовое число,  $e^-$  – электрон,  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  – электронное нейтрино и антинейтрино.

Когда электронный газ вырождается, последняя реакция подавляется принципом запрета Паули. В результате протоны в ядрах преобразовываются в нейтроны. При росте числа нейтронов энергия их связи в ядрах уменьшается.

При плотностях около  $4 \times 10^{14} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , нейтроны начинают вытекать из ядер, а при

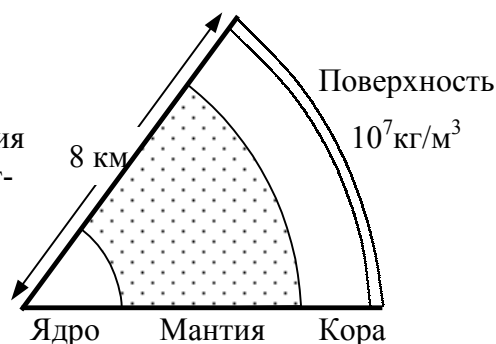
плотностях  $10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  ядра распадаются совсем. Вещество звезды будет тогда со-

стоять из нейтронной «каши» с примесью около 0.5% электронов и протонов.

Нейтронные звезды противостоят гравитации давлением вырожденного

*Структура нейтронной звезды.*

Кора является твердым веществом, а мантия – сверхтекучая нейтронная жидкость, плотность которой  $10^{17} - 10^{18} \text{кг/м}^3$ .



нейтронного газа, точно так же как белые карлики – электронным давлением. Уравнение состояния остается таким же, за исключением того, что масса электрона заменяется массой нейтрона, и что средний молекулярный вес определяется относительно числа свободных нейтронов. Так как газ состоит почти полностью из нейтронов, средний молекулярный вес будет приблизительно равен единице.

Типичные диаметры нейтронных звезд порядка 10 км. В отличие от обычных звезд они имеют хорошо определяемую твердую поверхность. Толщина атмосферы над ней составляет всего несколько сантиметров. Верхняя кора является металлической твердью с плотностью, быстро растущей внутрь. Большая часть звезды является нейтронной сверхтекучей жидкостью, а в центре, где плотность превышает  $10^{18} \text{ кг/м}^3$ , могут быть твердые ядра более тяжелых частиц (гиперонов).

Теория нейтронных звезд была развита в 1930-х годах, но первые наблюдения удалось сделать лишь в 1960-х. В это время были открыты и идентифицированы как нейтронные звезды быстро пульсирующие радиоисточники – *пульсары*. В 1970-х годах нейтронные звезды наблюдались также как *рентгеновские пульсары* и *рентгеновские барстеры*.

**Пульсары.** Пульсары были открыты в 1967-м году А. Хьюишем и Д. Белл (Кембридж, Англия), когда они зарегистрировали приходящие с неба резкие правильные радиоимпульсы. С тех пор было открыто множество пульсаров с периодами пульсаций от 0.0016 сек (для пульсара PSR 1937+214) до нескольких секунд.

Наиболее известный пульсар расположен в Крабовидной Туманности. Эта маленькая туманность в созвездии Тельца была обнаружена французским астрономом Шарлем Месье в середине 18-го столетия и стала первым объектом в каталоге Месье (M1). В 1948 г. она была идентифицирована как сильный радиоисточник, а в 1964 г. – как рентгеновский источник. Пульсар был открыт в 1968-м. В последующий год он был обнаружен в оптическом диапазоне.

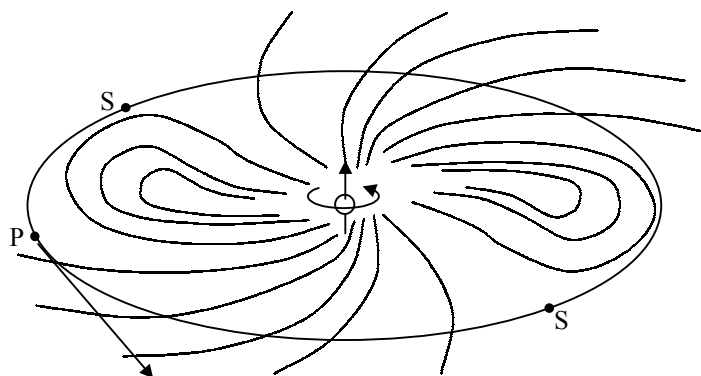
Нейтронные звезды трудно изучать в оптическом диапазоне, так как их светимость в видимой области очень мала (около  $10^{-6} L_{\odot}$ ). Например, Vela-пульсар имеет видимую величину около  $25^m$ . Это делает его одним из слабейших объектов, когда-либо наблюдавшихся. В радио области он является очень сильным пульсирующим источником. Некоторые пульсары ярко светят в гамма-лучах.

Образующаяся при взрыве и коллапсе сверхновой нейтронная звезда будет вначале быстро вращаться. Виновником этого является закон сохранения момента количества движения. Именно он при взрыве сверхновой во много раз увеличивает скорость вращения ее остатка – пульсара. Действительно, в процессе коллапса масса, оставшаяся после взрыва звезды, не меняется, а радиус уменьшается примерно в сто тысяч раз. Но момент количества движения, равный произведению экваториальной скорости вращения на массу и на радиус,

остается прежним. Масса не меняется, следовательно, скорость должна увеличиться в те же сто тысяч раз. За несколько часов звезда сядет в устойчивое равновесие, обращаясь вокруг своей оси несколько сотен раз в секунду.

Вторым важным следствием законов сохранения является наличие у нейтронной звезды мощного магнитного поля. Дело в том, что величина магнитного потока на поверхности звезды равна произведению величины напряженности магнитного поля на квадрат радиуса звезды. Эта величина строго постоянна. Поэтому при сжатии звезды магнитное поле должно сильно увеличиться. Насколько сильно – можно увидеть из следующего сравнения. На поверхности Земли напряженность магнитного поля есть величина порядка одного гаусса. В физической лаборатории можно получить магнитные поля величиной в миллион гаусс. На поверхности белых карликов напряженность магнитного поля достигает ста миллионов гаусс. Вблизи черных дыр эта величина уже порядка десяти миллиардов гаусс. На поверхности нейтронной звезды напряженность поля может составлять сотни тысяч миллиардов гаусс.

Происхождение радиоимпульсов можно понять, если магнитное поле наклонено на угол  $45^\circ - 90^\circ$  относительно оси вращения. Нейтронная звезда окружена мощной магнитосферой, плазменным облаком, в котором частицы связаны с магнитным полем и вращаются вместе с ним. В результате взаимодействия магнитного поля пульсара с окружающей его магнитосферой образуются узкие пучки направленного излучения. Так как звезда вращается, это излучение ометается вокруг нее подобно лучу маяка, и, попадая в поле нашего зрения, наблюдается как быстрые импульсы.



*Магнитное поле вокруг вращающейся нейтронной звезды сносит с нее плазму. На некотором расстоянии скорость плазмы приближается к скорости света. На этом расстоянии излучающие области S испускают излучение узким, направленным вперед пучком. Излучение от точки P попадает к наблюдателю, расположенному в направлении стрелки.*

Быстрое вращение радиопульсара в начале его жизни вызывает не только радиоизлучение. Значительная часть энергии уносится также релятивистскими частицами.

Из-за эмиссии электромагнитного излучения, нейтрино, частиц космических лучей и, возможно, гравитационного излучения, угловой момент нейтронной звезды будет постоянно уменьшаться. Вследствие этого период пульсаров будет постоянно расти. Это свойство вращающихся нейтронных звезд было сначала предсказано теоретиками, а затем подтверждено экспериментально. Кроме этого иногда наблюдаются неожиданные малые скачки в периоде, что должно быть признаком быстрого движения массы в коре нейтронной звезды («звездотрясение») или в ее окрестностях.

Первым из пульсаров, принадлежащих двойным системам, был открытый в 1974 г. пульсар PSR 1913+16. Этот пульсар обращается вокруг компаньона, предположительно другой нейтронной звезды, с орбитальным периодом  $8^h$  и имеет эксцентриситет 0.6. Наблюдаемый период импульсов изменяется вследствие доплеровского эффекта, что позволяет определить кривую скорости пульсара. Эти наблюдения могут выполняться очень точно, и поэтому становится возможным исследовать изменения орбитальных элементов системы на интервале в несколько лет. Например, было найдено, что периастрон двойного пульсара вращается со скоростью около  $4^\circ$  в год. Это явление может быть объяснено посредством общей теории относительности. В солнечной системе соответствующее вращение перигелия Меркурия равно  $43''$  за столетие.

Двойной пульсар PSR 1913+16 обеспечил также первое сильное свидетельство существования гравитационных волн. За время наблюдений орбитальный период этой системы постоянно уменьшался. Это указывает на то, что система теряет орбитальную энергию со скоростью, которая точно согласуется со значением, предвычисленным общей теорией относительности. Теряемая энергия излучается в виде гравитационных волн.

**Рентгеновские пульсары.** Рентгеновские пульсары всегда принадлежат к двойным системам. Компаньон, как правило, является ОВ сверхгигантом. В противоположность радиопульсарам период пульсирующей эмиссии рентгеновских пульсаров уменьшается со временем. Это означает, что скорость вращения нейтронных звезд должна возрастать. Периоды импульсов рентгеновских пульсаров значительно длиннее, чем периоды радиопульсаров, от нескольких секунд до десятков минут.

Двойная природа рентгеновских пульсаров дает ключ к пониманию их характерных свойств. Нейтронная звезда, образовавшаяся в двойной системе, представляет собой сначала нормальный радиопульсар. Сильное излучение пульсара не дает газу от компаньона падать на него. Однако когда со временем энергия излучения пульсара уменьшается, перетекающее от компаньона вещество может достичь его поверхности. Падающий на нейтронную звезду газ будет «стекать» по магнитным силовым линиям к полюсам. Именно там, в сравнительно небольших участках размером порядка километра, рождается мощнейшее рентгеновское излучение. Излучение производят релятивистские и обычные электроны, движущиеся в магнитном поле пульсара. Угловой момент падающего газа повышает также скорость вращения пульсара.

**Рентгеновские барстеры.** В некоторых случаях, когда магнитосфера нейтронной звезды находится близко к ее поверхности, вещество начинает там накапливаться, образуя своего рода оболочку звезды. В этой оболочке могут создаваться благоприятные условия для термоядерного взрыва, который наблюдается как вспышка (по-английски – burst). Рентгеновские барстеры являются неправильными переменными, показывающими случайные вспышки подобно карликовым новым. Типичные интервалы между вспышками несколько часов

или дней, но известны также более быстрые барстеры. Сила вспышки, похоже, зависит от промежутка времени между ними. Источником излучения рентгеновских барстеров не может быть вспышка водорода, так как максимум излучения находится в рентгеновской области. Объяснить наблюдаемую картину можно предположив, что барстеры являются двойными системами подобно карликовым новым, но содержащими вместо белого карлика нейтронную звезду. Газ от компаньона оседает на поверхности нейтронной звезды, где водород «выгорает» в гелий. Когда растущая оболочка гелия достигает критической температуры, она превращается в углерод посредством быстрой гелиевой вспышки. Так как в этом случае не имеется толстых демпфирующих внешних слоев, вспышка выглядит как всплеск рентгеновского излучения.

Такое же объяснение используется для всплесков гамма излучения, очень коротких и резких  $\gamma$ -импульсов, приходящих от нейтронных звезд. Спутниковые наблюдения показали, что  $\gamma$ -всплески почти равномерно распределены на небе, в отличие от известных нейтронных звезд. Поэтому вопрос их происхождения остается открытым.

### Черные дыры.

Мы уже видели, что имеется верхний предел для массы нейтронной звезды – масса Оппенгеймера – Волкова, выше которой даже давление вырожденного нейтронного газа не может сопротивляться гравитационной силе. Точное значение этой верхней границы массы трудно вычислить теоретически, так как она зависит от недостаточно известной вероятности взаимодействия частиц, но оно оценивается в  $1.5 - 2M_{\odot}$ .

Если масса звезды превышает  $M_{OV}$ , и если она не теряет массу в процессе своей эволюции, она не может больше достичь какого-либо устойчивого финального состояния. Сила гравитации будет превосходить все другие силы, и звезда сколлапсирует в черную дыру.

Черная дыра называется черной, потому что даже свет не может ее покинуть. Впервые на возможность существования настолько массивных тел, что свет не мог бы оторваться от их поверхности, указали еще в конце 18-го столетия Д. Митчел и П. Лаплас. Согласно классической механике, скорость отрыва от тела радиуса  $R$  и массы  $M$  есть

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Эта величина будет больше скорости света, если радиус становится меньше критического радиуса

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}.$$

Такое же значение для критического радиуса (Шварцшильдовский радиус) было получено из общей теории относительности К. Шварцшильдом. Чтобы получить более наглядное представление о численном значении радиуса

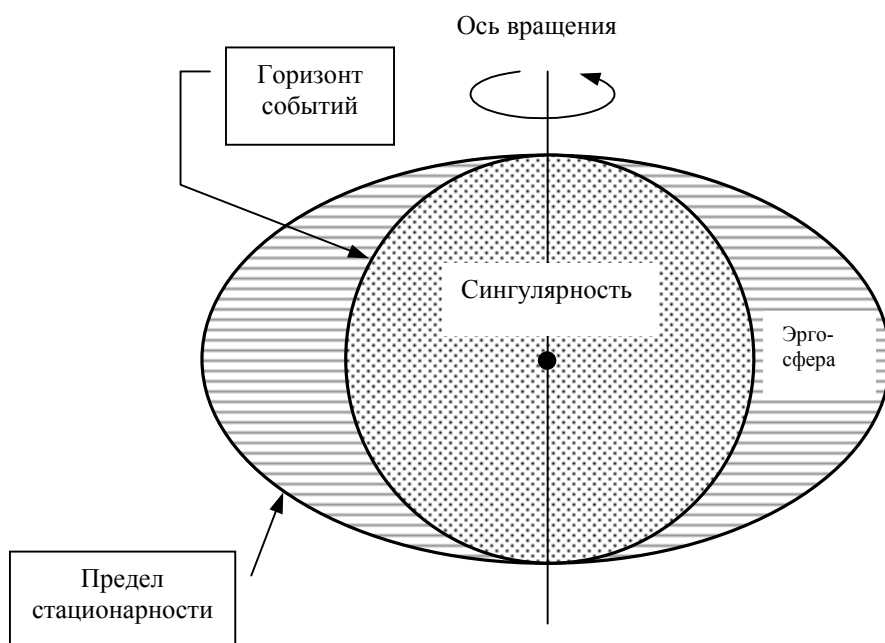
Шварцшильда, отметим, что для Земли он равен всего восьми миллиметрам. То есть, если сжать Землю до такого размера, она превратится в объект, который в наше время называют черной дырой. Для Солнца  $R_S \approx 3 \text{ км}$ . Однако, при нормальной звездной эволюции массы Солнца недостаточно, чтобы оно стало черной дырой. Из-за того, что масса черной дыры, образующейся при звездном коллапсе, должна быть больше, чем  $M_{OV}$ , радиус наименьших черных дыр, образующихся таким способом, около 5 – 10 км.

Свойства черных дыр изучаются на основе общей теории относительности. В теории относительности каждый наблюдатель несет с собой свое собственное локальное измерение времени. Если два наблюдателя покоятся относительно друг друга, их часы идут с одинаковой скоростью. В противном случае скорость их часов различна, и видимое течение событий также отличается.

Окружающая черную дыру поверхность с радиусом, равным радиусу Шварцшильда, называется *горизонтом событий*. Никакая информация даже в принципе не может выйти из-под горизонта событий. Около горизонта событий различные определения времени становятся значительными. Наблюдатель, падающий в черную дыру, согласно его собственным часам достигнет центра за конечное время, и не заметит чего-либо особенного, проходя через горизонт событий. Однако для внешнего наблюдателя он выглядит никогда не достигающим горизонта событий; скорость его падения выглядит уменьшающейся до нуля с приближением к горизонту.

Замедление времени проявляется также как уменьшение частоты световых сигналов. Частота на бесконечности приближается к нулю для излучения, испущенного вблизи горизонта событий.

Приливные силы вблизи черной дыры становятся чрезвычайно большими, так что любое вещество, падающее в дыру, будет разорвано на части. Все атомы и элементарные частицы вблизи центральной точки разрушаются, и финальное состояние вещества в этой точке физике сегодняшнего дня неизвестно. Наблюдаемые свойства черной дыры не зависят от того, как она устроена. Ко-



Черная дыра окружена сферическим горизонтом событий. Вокруг вращающейся черной дыры имеется также сплюснутая поверхность, внутри которой вещество не может оставаться стационарным. Эта область называется эргосферой.

гда звезда сколлапсирует в черную дыру, за горизонтом событий исчезает не только вся информация о составе вещества, но и, например, любое магнитное поле. Все свойства черной дыры полностью определяются тремя наблюдаемыми параметрами: массой, угловым моментом и электрическим зарядом. Никакое другое свойство вещества, участвующего в образовании черной дыры, не передается ей в «наследство».

К. Шварцшильд получил свое решение уравнений ОТО для случая неподвижной черной дыры. В природе этот случай вряд ли имеет место. Если же черная дыра вращается, то вокруг нее образуется область пространства-времени с весьма необычными свойствами, называемая *эргосферой*. Эта область ограничена воображаемой поверхностью, которая называется *пределом стационарности*. Между горизонтом событий и пределом стационарности ничто не может оставаться в покое, там само пространство-время как бы закручивается вокруг оси вращения черной дыры. Процесс вращения дыры приводит к одной удивительной возможности, на которую впервые обратил внимание Р. Пенроуз. Он доказал, что из эргосферы черной дыры можно черпать энергию.

Если какое-то тело попадает в эргосферу и разделяется там на две части таким образом, что одна из них будет двигаться к горизонту событий, а другая в противоположную сторону, то эта вторая часть будет подхвачена гравитационным вихрем эргосферы и выброшена из нее с огромной скоростью. При этом энергия осколка будет превышать первоначальную энергию исходного тела. Вследствие этого, согласно законам сохранения, должна уменьшиться общая энергия дыры. Так как из самой дыры ничего извлечь невозможно по определению, то значит, энергия черпается из эргосферы за счет уменьшения энергии вращения дыры, т.е. замедления ее вращения. Энергия вращения дыры может уменьшаться также при рассеянии на ней электромагнитных волн. Рассеянная волна при определенных условиях может оказаться интенсивнее падающей.

Наиболее поразительный эффект в поведении черных дыр был открыт выдающимся физиком-теоретиком Стивеном Хокингом.

Дело в том, что к началу 1970-х годов сформировалось следующее представление о черных дырах. Если дыра сформировалась, то все, что попало за горизонт событий, не может выйти обратно. Черная дыра – область пространства, невидимая для внешнего наблюдателя. Единственный путь для обнаружения черных дыр – изучение их взаимодействия с окружающей материей. Образовавшаяся дыра должна существовать вечно, она вечно поглощает энергию, лишь увеличивая свои размеры и массу. Суть открытия Хокинга состоит в том, что в сильном поле тяготения черной дыры могут протекать квантовые процессы рождения частиц. Вакуум в черной дыре неустойчив и из него могут рождаться частицы и античастицы, в основном безмассовые: фотоны, нейтрино, гравитоны. При этом возможен случай, когда один из партнеров падает обратно в дыру, а другой покидает окрестность черной дыры с помощью вытекающего из законов квантовой механики туннельного эффекта. Улетающие из черной дыры частицы уносят с собой часть ее энергии. Квантовые процессы совершенно ничтожны для черных дыр, возникающих при коллапсе массивных



звезд, но существенны для маломассивных первичных черных дыр, которые могли возникнуть на ранних этапах жизни Вселенной. По мере уменьшения массы черной дыры мощность ее излучения должна расти, и, в конце концов, маленькая дыра породит мощную вспышку жесткого гамма-излучения (последние  $10^9$  г дыра излучает за 0.1 с, что подобно взрыву миллиона мегатонных водородных бомб). В реальных условиях дыры, возникшие из звезд, все время увеличивают свою массу за счет падения в них газа и излучения. Увеличение массы черной дыры при этом обычно мало, но существенно превышает потери за счет квантового испарения.

Черные дыры, возникшие в результате коллапса массивных звезд, могут вызывать своим сильным гравитационным полем бурные процессы при падении в них газа. Такие газовые потоки могут быть особенно мощными, когда на черную дыру, входящую в состав тесной двойной системы, газ перетекает от звезды-гиганта. Газ, нагретый при падении в поле тяготения черной дыры, дает рентгеновское излучение, и по этому излучению дыра может быть обнаружена.

В настоящее время уже открыты некоторые быстро и нерегулярно меняющиеся рентгеновские источники такого типа. Среди них наиболее вероятным кандидатом в черную дыру является Лебедь X-1. Этот объект является меньшим компонентом двойной системы HDE 226868. Большой компонент есть оптически видимый сверхгигант с массой  $20 - 25M_{\odot}$ . Вычисленная масса невидимого компонента  $10 - 15M_{\odot}$ , что намного больше верхнего предела для нейтронных звезд, и т.о. он должен быть черной дырой.

Верхнего предела для массы черной дыры нет. Множество активных явлений в ядрах галактик можно объяснить наличием там черных дыр с массами порядка миллионов или миллиардов солнечных масс.