

Демография черных дыр

А.М.Черепашук

*Анатолий Михайлович Черепашук, академик, директор ГАИШ,
заведующий астрономическим отделением физфака МГУ,
вице-президент Европейского астрономического общества,
член Английского Королевского астрономического общества.*

К настоящему времени открыто несколько сотен массивных и чрезвычайно компактных объектов, наблюдаемые свойства которых очень похожи на свойства черных дыр, предсказанных общей теорией относительности (ОТО) А.Эйнштейна. Хотя окончательных доказательств существования черных дыр пока не получено, за последнее десятилетие ученые как никогда приблизились к обнаружению подобных объектов. Поскольку никаких противоречий с ОТО у кандидатов в черные дыры не замечено, астрономы рискуют использовать термин «черная дыра» вместо более осторожного «кандидат в черные дыры». Рост числа обнаруженных кандидатов привел к тому, что родилась новая область астрофизики - демография черных дыр, изучающая их статистические свойства и связь с другими объектами Вселенной.

Под черной дырой понимают объект, а точнее, область пространства-времени, гравитационное поле которой такое сильное, что даже свет не может вырваться наружу. Иными словами, вторая космическая скорость для черной дыры равна скорости света.

Для Земли вторая космическая скорость, с которой космический аппарат может преодолеть тяготение, равна 11.2 км/с. Если сжимать Землю, сохраняя ее массу, то вторая космическая скорость на ее поверхности будет возрастать. Она достигнет скорости света, когда радиус планеты уменьшится до 9 мм, а плотность вещества возрастет до 10^{30} кг/м³ (что на 13 порядков больше плотности атомного ядра). Дальше Земля, согласно предсказанию ОТО, будет сжиматься уже сама (в системе отсчета, связанной с веществом Земли). В конце концов на месте нашей планеты образуется черная дыра.

В реальных условиях, разумеется, никто насильно не сжимает небесные тела, но некоторые из них сжимаются под действием собственной гравитации. Черные дыры образуются, например, при коллапсе внутренних частей наиболее массивных звезд, гравитация которых настолько сильна, что другие силы противостоять ей не могут.

Удивительные свойства черных дыр

Хотя о «темных звездах», на поверхности которых скорость преодоления притяжения превышает скорость света, писали еще в конце XVIII в. Д.Мичелл и П.Лаплас, черные дыры в их нынешнем понимании предсказал немецкий астроном К.Шварцшильд, основываясь на решении уравнений ОТО, в декабре 1915 г., а термин «черная дыра» изобрел американский физик Дж.Уилер в 1968 г.

Размер черной дыры характеризуется ее гравитационным радиусом

$$r_g = 2GM/c^2,$$

где M - масса тела, c - скорость света, G - постоянная тяготения. Гравитационный радиус обычно мал: для Земли, как уже говорилось, $r_g = 9$ мм, для Солнца $r_g = 3$ км, но для сверхмассивной черной дыры массой $2 \cdot 10^9 M_\odot$ он уже составляет $r_g = 40$ а.е. (астрономических единиц), что близко к расстоянию от Солнца до Плутона; такие дыры встречаются в ядрах галактик. Гравитационный радиус входит как фундаментальный параметр в решение уравнений ОТО, полученное К.Шварцшильдом для гравитационного поля сферически-симметричного невращающегося тела [1]. В этом поле притяжение между двумя телами становится бесконечным в двух случаях - когда расстояние r между центрами тел равно нулю или r_g . Особенность при $r = 0$ имеет место и для классического закона тяготения Ньютона. Но на нее не обращают внимания, поскольку, прежде чем расстояние между центрами тел достигнет нуля, они обязательно соприкоснутся поверхностями.

Гораздо существеннее особенность при $r = r_g$. В этом случае сила притяжения также обращается в бесконечность, и некоторый объем пространства оказывается отделенным от внешнего наблюдателя бесконечным потенциальным барьером. Все, что находится внутри черной дыры, становится недоступным для исследования внешнему наблюдателю. Особенность при $r = r_g$ как раз и обуславливает экзотические свойства черных дыр. Физической границей черной дыры служит **горизонт событий**, на котором, с точки зрения далекого наблюдателя, ход времени останавливается из-за релятивистского замедления.

Любому малому промежутку времени там соответствует бесконечно большой промежуток времени наблюдателя. Если мы пошлем к черной дыре корабль с космонавтом, то по мере его приближения к дыре увидим, что корабль начнет замедлять свое движение и у горизонта остановится. Но с точки зрения самого космонавта падающий на черную дыру корабль свободно проникает внутрь, под горизонт событий, однако передать информацию наружу будет невозможно, как и вывести корабль обратно: внутри черной дыры возможно только движение к центру. Мы, внешние наблюдатели, никогда ничего не узнаем о внутренности черной дыры.

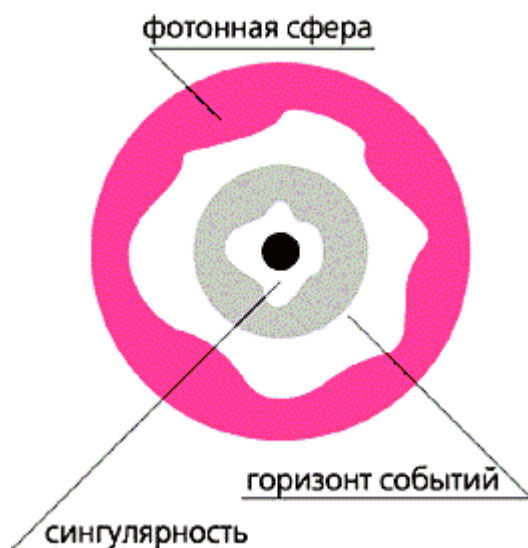


Рис. 1. Схема неврашаающей черной дыры. Сингулярность, куда сжалась исходная материя, окружена сферическим горизонтом событий, радиус которого равен гравитационному радиусу r_g . Вблизи горизонта событий находится фотонная сфера — область пространства, где захваченные фотоны двигаются вокруг черной дыры по замкнутым траекториям.

Для неврашаающей (шварцшильдовской) черной дыры (рис.1) радиус горизонта событий r_h равен гравитационному (шварцшильдовскому) радиусу: $r_h = r_g$. А для врашаающей (рис.2) радиус горизонта событий меньше гравитационного радиуса ($r_h < r_g$). В этом случае горизонт событий расположен внутри эргосферы, где вихревое гравитационное поле черной дыры вынуждает все тела непрерывно двигаться. Из эргосферы можно извлекать энергию, причем с огромной эффективностью, в десятки раз превышающей эффективность выделения энергии при термоядерных реакциях [2].

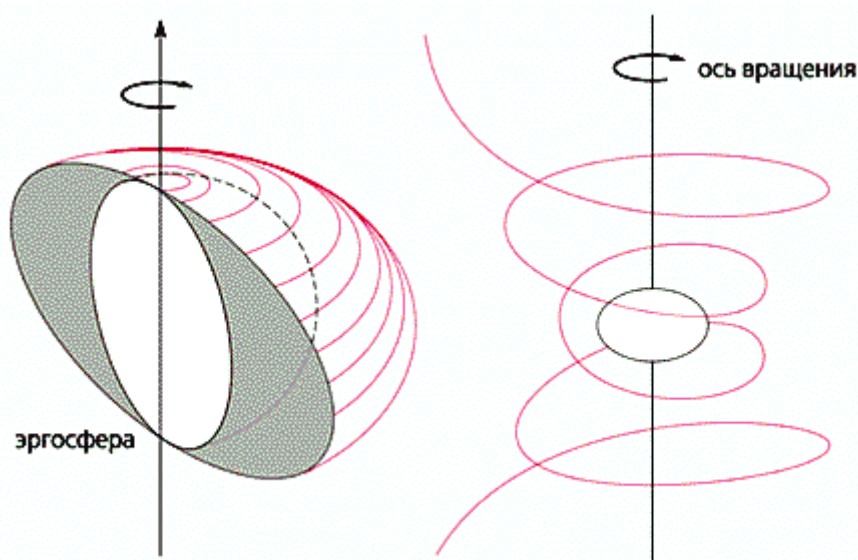


Рис.2. Схематическое изображение врашаающей черной дыры в разрезе. Горизонт событий окружен эргосферой, в которой тела, частицы и фотоны непрерывно двигаются, подхваченные вихревым гравитационным полем черной дыры (слева). Луч света, проходящий вблизи врашаающей черной дыры, завихряет свое движение (справа).

Следует отметить, что черные дыры, рождающиеся в нашу эпоху, а не в момент формирования Вселенной, строго говоря, не могут быть стопроцентными черными дырами. Из-за замедления времени вблизи горизонта событий поверхность коллапсирующей звезды с точки зрения далекого наблюдателя бесконечно долго приближается к горизонту событий. Однако уже в первые секунды коллапса поверхность звезды подходит к горизонту очень близко. Поэтому для удаленных наблюдателей

современные черные дыры имеют практически ненаблюдаемые поверхности, все процессы на которых очень замедленны. Для астрономов такие дыры являются практически черными дырами, имеющими практический горизонт событий.

Тернистый путь к открытию

Свойства черных дыр столь фантастичны, что в существование этих экзотических объектов в реальном мире верится с трудом, и об этом уже несколько десятилетий идут споры. Даже сам Эйнштейн сомневался в возможности их существования. В 1939 г. он писал: *«Основным результатом проведенного исследования является четкое понимание того, что в реальном мире отсутствуют шварцшильдовские сингулярности»*. Идея черной дыры как реального физического объекта с трудом пробивала себе дорогу. Несмотря на появление в том же году красивой и убедительной работы Дж.Оппенгеймера и Х.Снайдера, где на основе ОТО был рассмотрен коллапс звезды и показана неизбежность рождения черной дыры при сжатии ядра звезды достаточно большой массы, сомнения оставались вплоть до конца 1960-х годов.

Поиск черных дыр особенно интригует физиков, поскольку в последние годы предложены новые теории гравитации, которые отвергают существование черных дыр. Решение спора остается за астрономическими наблюдениями. Исследования ведутся в двух направлениях:

- Планируются космические и наземные эксперименты по наблюдению специфических эффектов вблизи горизонта событий черной дыры для определения метрики пространства-времени: измерения с помощью интерферометров, поиск гравитационных волн и т.п. Можно надеяться, что это позволит окончательно доказать существование черных дыр во Вселенной.
- Постоянно накапливаются данные о массах кандидатов в черные дыры и устанавливаются ограничения на их размеры. Эти исследования укрепляют уверенность в реальности черных дыр.

В начале XXI в. ситуация с исследованием черных дыр очень напоминает изучение звезд в начале XX в. Тогда природа звезд была неясна: считалось, что они светят за счет гравитационного сжатия. Но это не мешало развиваться звездной астрономии, проводилась большая работа по спектральной классификации звезд и были открыты важные связи между спектром, светимостью и массой звезды. Так и с черными дырами: открыто много массивных и компактных объектов, свойства которых очень похожи на ожидаемые свойства черных дыр, но окончательно их природа пока не выяснена. Однако ничто не мешает астрономам заниматься демографией кандидатов в черные дыры и изучать их статистические свойства.

Наблюдения черных дыр

Известно три типа черных дыр.

Во-первых, черные дыры звездной массы ($3-50 M_{\odot}$), образовавшиеся при коллапсе ядер массивных звезд в конце их эволюции. Если масса ядра звезды меньше так называемого чандрасекаровского предела $1.4 M_{\odot}$, то в конце ее эволюции (рис.3) образуется белый карлик - объект размером с Землю ($\sim 10^4$ км) и средней плотностью вещества около 10^9 кг/м³. В нем гравитационному сжатию противодействует давление вырожденного

электронного газа. В нашей Галактике, состоящей из 10^{11} звезд, порядка 10^{10} белых карликов, и они хорошо изучены астрономами.

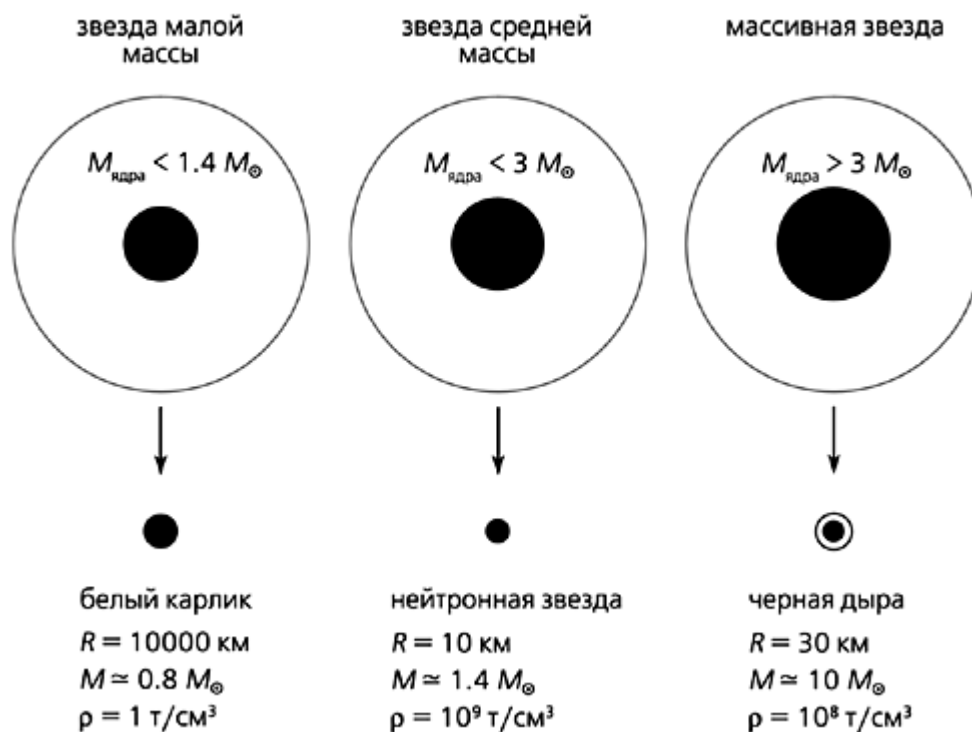


Рис.3. Образование белого карлика, нейтронной звезды и черной дыры на поздней стадии эволюции звезд разных масс.

Если в конце эволюции масса ядра звезды лежит в интервале $1.4-3 M_{\odot}$, то, - как правило, в процессе вспышки сверхновой, - рождается нейтронная звезда. Ее радиус $\sim 10 \text{ км}$, а средняя плотность вещества близка к плотности атомного ядра. В нейтронной звезде сила гравитации противодействует градиенту давления вырожденного нейтронного вещества. В Галактике около 10^8 нейтронных звезд, и о них тоже многое известно.

Если же масса ядра звезды превышает $3 M_{\odot}$, то в результате его коллапса образуется черная дыра. Радиус типичной звездной черной дыры массой $10 M_{\odot}$ равен 30 км . В Галактике по последним оценкам $\sim 10^7$ звездных черных дыр, а их полная масса $\sim 10^8 M_{\odot}$, или $\sim 0.1\%$ от массы барионного вещества Галактики.

Во-вторых, сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик с массами $10^6-10^9 M_{\odot}$. В последнее время все более утверждается точка зрения, что практически все галактики имеют в своих ядрах сверхмассивные черные дыры.

В-третьих, первичные черные дыры, образовавшиеся в результате сильных деформаций метрики пространства-времени на ранних стадиях формирования Вселенной. До нашей эпохи должны были дожить лишь первичные дыры с массой $> 10^{12} \text{ кг}$ ввиду действия квантового механизма испарения черных дыр, предложенного С.Хокингом.

В последнее время обсуждается вопрос о черных дырах промежуточных масс $M = 10^2-10^5 M_{\odot}$. Они могут находиться в околядерных областях галактик, в областях усиленного звездообразования или в центрах массивных шаровых звездных скоплениях, но серьезных данных в пользу их существования пока нет.

С астрономической точки зрения, чтобы обнаружить черную дыру, нужно: измерить массу объекта; показать, что его радиус не превышает гравитационного радиуса для этой массы; получить свидетельства того, что у объекта нет наблюдаемой поверхности, а имеется лишь «практический» горизонт событий.

Массы черных дыр надежно измеряются по движению газа и звезд вокруг них. В большинстве случаев характерные расстояния этих «пробных тел» от черной дыры велики, так что можно использовать законы Ньютона, и для оценки массы достаточно знать скорость пробного тела и его расстояние от черной дыры. Поскольку все теории гравитации, в том числе и отличные от ОТО, строятся так, чтобы на больших расстояниях от тяготеющего тела сила его притяжения описывалась законом Ньютона, то массы кандидатов в черные дыры измеряются практически независимо от конкретной релятивистской теории гравитации.

В последнее время появилась возможность измерять массы одиночных звездных черных дыр по эффектам гравитационного микролинзирования. В качестве пробного тела здесь выступает луч света далекой звезды фона, искривляющийся в гравитационном поле черной дыры. Так как и звезда, и черная дыра перемещаются в пространстве, наблюдатель видит явление микролинзирования - усиление и последующее ослабление блеска далекой звезды. Длительность цикла пропорциональна корню квадратному из массы объекта, выступающего в роли гравитационной линзы: например, для $M = 6 M_{\odot}$ она составляет около года. С помощью этого эффекта уже измерены массы трех одиночных черных дыр: они лежат в пределах 6-8 $M_{\odot}$.

Интересно, что по характеру изменения блеска звезды фона можно не только измерить массу объекта-линзы, но и отличить черную дыру от «кротовой норы» - компактного объекта без горизонта событий и сингулярности в центре. Возможность существования «кротовых нор» (их еще называют пространственно-временными тоннелями или мостами Эйнштейна-Розена) предсказана в рамках ОТО. «Кротовая нора» должна состоять не из обычного барионного вещества, а из особой экзотической материи, имеющей отрицательное давление и анизотропные свойства. Это может быть физический вакуум или магнитное поле. Таким образом, хотя одиночная черная дыра и «кротовая нора» невидимы, их можно наблюдать и даже различить по эффектам отклонения света в их гравитационном поле.

Радиусы черных дыр измерять очень трудно. Сейчас используются следующие методы: изучение рентгеновской светимости и спектра рентгеновского излучения вещества, падающего на черную дыру; анализ быстрых изменений светимости и профилей спектральных линий в рентгеновском диапазоне; радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой и т.п. Все они дают лишь оценку верхней границы для радиусов кандидатов в черные дыры: $r < (10-100) r_g$. Однако даже эти грубые оценки свидетельствуют о чрезвычайной компактности известных кандидатов в черные дыры.

Самая сложная задача - получение наблюдательных свидетельств наличия горизонтов событий у кандидатов в черные дыры. Для этой цели планируются эксперименты с помощью космического рентгеновского интерферометра с угловым разрешением $\sim 10^{-7}$ " (американский проект «МАКСИМ»), а также российского космического радиоинтерферометра с угловым разрешением до 10^{-6} " (проект «РАДИОАСТРОН»).

Пока астрономы не имеют достаточных наблюдательных доказательств существования черных дыр ни для одного из кандидатов. Но все необходимые критерии,

сформулированные на основе ОТО, выполняются для всех известных кандидатов в черные дыры, число которых уже превышает 300.

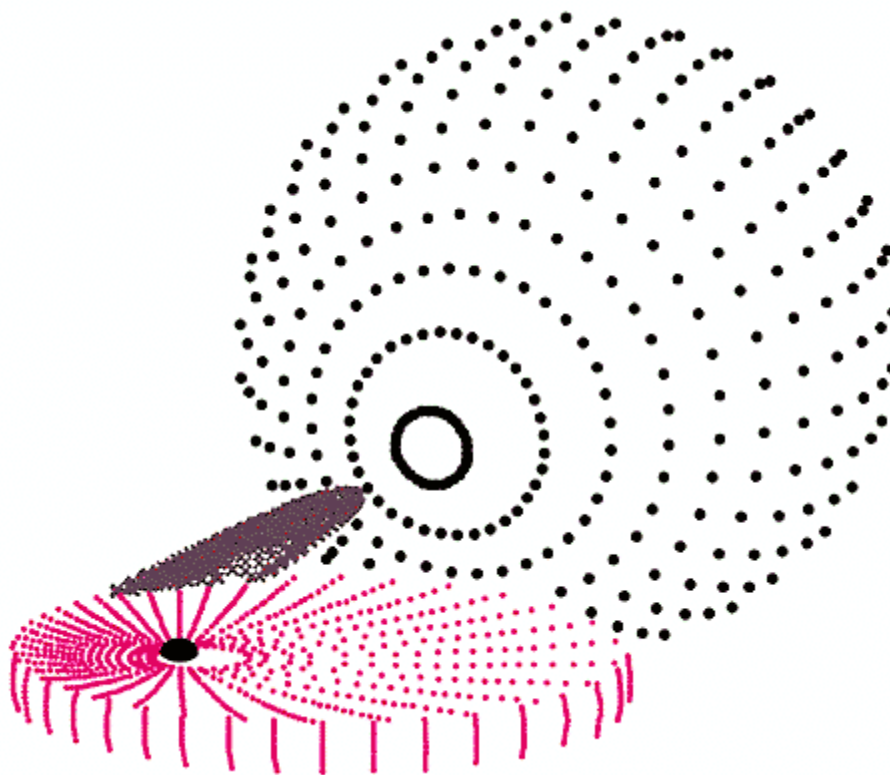
Наибольшие успехи достигнуты в исследовании черных дыр звездных масс и сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик.

Скрывающиеся среди звезд

Уже открыто около 20 черных дыр звездной массы 4-15 $M_{\odot}$ в рентгеновских двойных системах, а также три одиночные черные дыры (по эффектам гравитационного микролинзирования).

Рентгеновская двойная система (рис.4) состоит из нормальной оптической звезды - донора вещества, вокруг которой обращается релятивистский объект - нейтронная звезда или черная дыра, - находящийся в режиме аккреции вещества. Впервые на возможность наблюдать черные дыры указали Я.Б.Зельдович и Э.Солпитер (США) в 1964 г.: они показали, что при несферической аккреции вещества на черную дыру может выделяться гигантская энергия, порядка 10% от энергии покоя падающего вещества. Позже, в 1972-1973 гг., Н.И.Шакура, Р.А.Сюняев и др. развили теорию аккреции вещества в двойной системе и предсказали мощное рентгеновское излучение при дисковой аккреции на нейтронную звезду или черную дыру.

Рис.4.
Математическая
модель
рентгеновской
двойной
системы.



В центральной части аккреционного диска, вблизи релятивистского объекта, вещество движется почти со скоростью света. Взаимное трение потоков газа приводит к разогреву плазмы до температур в десятки и сотни миллионов градусов. Если аккреция идет на быстро вращающуюся нейтронную звезду с сильным магнитным полем ($\sim 10^{12}$ Гс), то вещество из внутренних частей диска направляется этим полем на магнитные полюса звезды, где оно сталкивается с поверхностью, и там появляются горячие рентгеновские

пятна. Из-за своего вращения нейтронная звезда становится рентгеновским пульсаром, демонстрируя строго периодическую переменность излучения с периодом от нескольких до сотен секунд. Если же магнитное поле нейтронной звезды сравнительно слабое ($<10^8$ Гс), то вещество диска достигает поверхности на экваторе звезды и там накапливается. При достижении критической массы может произойти термоядерный взрыв, и тогда образуется рентгеновский барстер I типа - возникают короткие (порядка секунд) и мощные вспышки рентгеновского излучения, следующие нерегулярно во времени (рентгеновский барстер II типа связан с проявлением неустойчивостей в аккреционном диске, его легко отличить от барстера I типа).

Таким образом, рентгеновский пульсар или рентгеновский барстер I типа - явные признаки наличия у нейтронной звезды наблюдаемой поверхности. На это же указывает и феномен радиопульсара - короткие и строго периодические радиоимпульсы, связанные с переработкой в направленное радиоизлучение энергии вращения сильно намагниченной нейтронной звезды.

У аккрецирующей черной дыры не должны наблюдаться признаки рентгеновского пульсара, рентгеновского барстера I типа или радиопульсара, поскольку черные дыры не имеют наблюдаемой поверхности. От нее можно ожидать лишь иррегулярной или квазипериодической (но не строго периодической) переменности на временах вплоть до $r_g/c \sim 10^{-4}$ с.

Первый космический рентгеновский источник - знаменитый Скорпион X-1, двойная система с нейтронной звездой, - был открыт в 1962 г. с борта американской ракеты «Аэробы» (земная атмосфера непрозрачна для рентгеновского излучения). Руководил экспериментом Р.Джиаккони, удостоенный в 2002 г. Нобелевской премии. Систематические исследования таких объектов начались с запуском в 1971 г. американского рентгеновского спутника «UHURU», открывшего около сотни рентгеновских двойных систем [3]. К настоящему времени их известно уже около 1000, причем у 20 из них массы рентгеновских источников превышают $3 M_\odot$, что позволяет считать их черными дырами.

Рентгеновские наблюдения со спутников и оптические наземные наблюдения прекрасно дополняют друг друга: наличие мощного рентгеновского излучения свидетельствует о компактности объекта, а изучение движения оптической звезды-спутника методами наземной астрономии позволяет измерять массу рентгеновского источника и тем самым идентифицировать релятивистский объект как черную дыру в случае, если эта масса превышает $3 M_\odot$. В 1972-1974 гг. в работах советских ученых были выполнены первые оптические отождествления рентгеновских двойных систем и изучены все виды их оптической переменности [4]. Это дало возможность развить мощные методы определения масс черных дыр в рентгеновских двойных системах [5].

На рис.5 приведена зависимость масс нейтронных звезд и черных дыр от масс их спутников в двойных системах. Массы радиопульсаров в двойных системах определены по релятивистским эффектам в их орбитальном движении. Видно, что корреляции между массами рентгеновских объектов и массами их спутников нет, т.е. тесные двойные системы с нейтронными звездами и черными дырами подобны классическим тесным двойным системам, где встречаются любые комбинации компонентов.

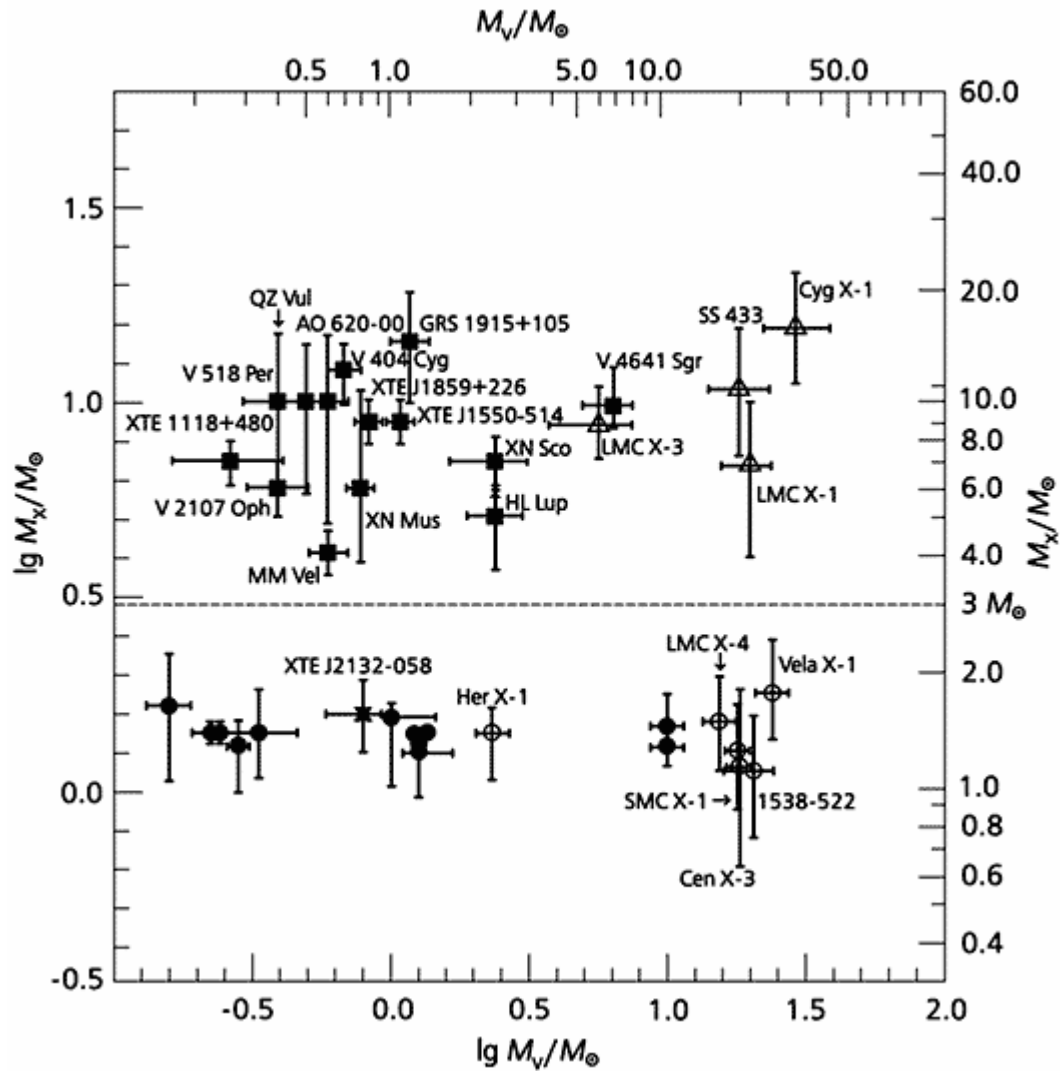


Рис. 5. Зависимость масс нейтронных звезд и черных дыр (M_x) от масс их оптических спутников (M_v) в двойных системах. Релятивистские объекты распределились выше и ниже линии $3 M_\odot$: ■ - черные дыры в рентгеновских новых, □ - черные дыры в квазистационарных рентгеновских двойных системах с оптическими спутниками - массивными горячими звездами, ● - радиопульсары, ○ - рентгеновские пульсары, ● - рентгеновский барстер I типа. В полном согласии с ОТО, массы 19 нейтронных звезд не превышают теоретического верхнего предела массы $3 M_\odot$.

Накопление сведений о массах релятивистских объектов укрепляет нашу уверенность в реальном существовании черных дыр. Во всех случаях, когда удастся измерить массу релятивистского объекта, имеющего явные признаки наблюдаемой поверхности (радиопульсар, рентгеновский пульсар, рентгеновский барстер I типа), она не превышает $3 M_\odot$ - абсолютного верхнего предела массы нейтронной звезды, предсказанного ОТО. В то же время, ни у одного (!) из 20 массивных компактных рентгеновских источников - кандидатов в черные дыры - не замечено ни одного из перечисленных признаков наблюдаемой поверхности, также в полном согласии с ОТО. Правда, у некоторых нейтронных звезд феномены радиопульсара, рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера I типа могут не наблюдаться (например, из-за слабости магнитного поля, его «неудачной» ориентации относительно наблюдателя, сильного темпа аккреции и т.п.). Очевидно, отсутствия каких-либо признаков недостаточно для доказательства природы объекта, необходим поиск специфических эффектов.

В ряде рентгеновских двойных систем с черными дырами обнаружены сильно направленные (коллимированные) выбросы вещества - джеты (от англ. jet - выброс). Скорости движения вещества в джетах достигают $0.95 c$. Такие рентгеновские двойные

системы с джетами принято называть микрокварами, поскольку у далеких космологических объектов - квазаров (очень активных ядер галактик) - также наблюдаются релятивистские джеты, происхождение которых, по-видимому, связано с аккрецией вещества на сверхмассивную черную дыру.

Интересные данные в последние годы получены о вращении звездных черных дыр. Аккреционные диски, вращающиеся в ту же сторону, что и центральная вращающаяся черная дыра, проникают гораздо ближе к ее центру, чем в случае невращающейся, шварцшильдовской черной дыры, поскольку радиус горизонта событий r_h для вращающейся черной дыры меньше ее гравитационного радиуса r_g (для предельно вращающейся кэрровской черной дыры $r_h = 0.5 r_g$). Поэтому выделение гравитационной энергии, а следовательно, светимость и температура теплового компонента рентгеновского излучения при аккреции вещества на вращающуюся черную дыру должны быть выше по сравнению с невращающейся. Это действительно наблюдается, например, у двух рентгеновских двойных систем - микрокваров GRS 1915+105 и GRO J1655-40, которые, скорее всего, содержат быстро вращающиеся черные дыры. Как видим, астрономам удастся не только оценивать массы и радиусы кандидатов в черные дыры, но и получать информацию об их вращении (!).

А как коррелирует распределение масс релятивистских объектов с распределением масс их потенциальных производителей? Роль последних теории эволюции отводит в первую очередь звездам Вольфа-Райе (с массами 5-50 $M_\odot$) в конце их жизненного пути [6]. Звезды Вольфа-Райе характеризуются наличием в их спектрах мощных и широких линий излучения гелия, азота, углерода и кислорода в разных стадиях ионизации. По современным представлениям, звезды Вольфа-Райе первого типа населения Галактики (т.е. концентрирующиеся вблизи галактической плоскости) являются обнаженными горячими гелиевыми ядрами первоначально массивных звезд ($M > 30 M_\odot$), потерявших основную часть своих водородных оболочек либо вследствие перетекания вещества в тесных двойных системах, либо в результате интенсивной потери массы в виде звездного ветра. Такие звезды должны в конце своей эволюции взрываться как сверхновые типа I b/c (в их спектрах не наблюдается линий водорода, а присутствуют лишь линии гелия I b и углерода I c) и формировать в результате коллапса своих углеродно-кислородных ядер нейтронные звезды или черные дыры. А как раз в звезду Вольфа-Райе, согласно большинству эволюционных сценариев для тесных двойных систем, содержащих массивную звезду, эта массивная звезда и превращается, быстро теряя свою водородную оболочку под влиянием приливного воздействия со стороны спутника.

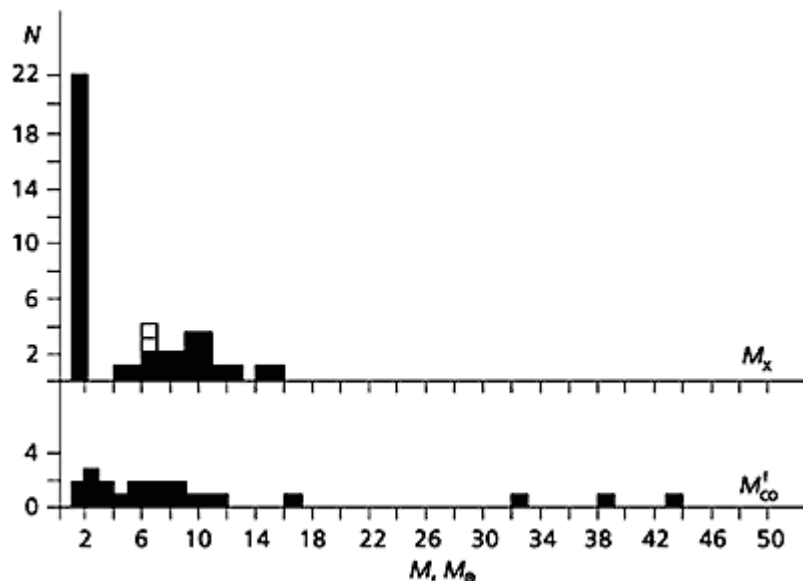


Рис. 6. Гистограмма распределения масс релятивистских объектов M_x в двойных системах (вверху, черные столбцы). Светлые квадратики соответствуют массам одиночных черных дыр, измеренным по эффектам гравитационного микролинзирования. Высокий пик в интервале 1-2 $M_\odot$ соответствует нейтронным звездам. Гистограмма распределения конечных масс углеродно-кислородных ядер M'_{CO} для 23 звезд Вольфа-Райе в двойных системах с известными массами (внизу).

На рис.6 приведены распределения масс релятивистских объектов и масс предсверхновых - производителей релятивистских объектов - СО-ядер звезд Вольфа-Райе в конце их эволюции. Видно, что распределение масс релятивистских объектов в двойных системах не непрерывно, а имеет провал в интервале масс 2-4 $M_\odot$ и является бимодальным. Массы 19 нейтронных звезд лежат в узких пределах 1-2 $M_\odot$, среднее значение массы нейтронной звезды равно $1.35 \pm 0.15 M_\odot$. Измеренные массы 20 черных дыр лежат в пределах 4-15 $M_\odot$ при среднем значении массы черной дыры $7 \pm 1 M_\odot$. В интервале масс 2-4 $M_\odot$ не обнаружено ни нейтронных звезд, ни черных дыр, хотя ОТО не запрещает существование нейтронных звезд с массами вплоть до 3 $M_\odot$. Подчеркнем, что число релятивистских объектов с измеренными массами весьма велико - порядка 40. В то же время распределение масс СО-ядер звезд Вольфа-Райе непрерывно в диапазоне масс 2-15 $M_\odot$. Таким образом, по какой-то глубокой причине в природе не рождаются (или аномально редко рождаются) очень массивные ($M > 2 M_\odot$) нейтронные звезды и маломассивные ($M < 4 M_\odot$) черные дыры. Если эта закономерность подтвердится дальнейшими наблюдательными данными по релятивистским объектам, то она потребует серьезной интерпретации. Недавно было обнаружено, что вспышки сверхновых типа I b/c, сопровождающие коллапсы СО-ядер звезд Вольфа-Райе, распределены по светимостям в максимуме также бимодально: два класса сверхновых типа I b/c (нормальные и яркие сверхновые) различаются по светимости в максимуме на порядок величины.

В последние годы все более утверждается точка зрения о том, что коллапсы СО-ядер быстро вращающихся звезд, связанные с образованием предельно быстро вращающихся керровских черных дыр в различных галактиках, могут быть источниками знаменитых и пока загадочных гамма-всплесков, при которых за время в несколько секунд выделяется гигантская энергия в гамма-диапазоне $\sim 10^{46}$ Дж [7].

В самых недрах галактик

К настоящему времени под подозрением свыше 300 сверхмассивных черных дыр в ядрах как активных, так и «спокойных» галактик (рис.7). Их массы лежат в интервале 10^6 - $10^9 M_\odot$. Эти массы измерены по движению звезд, газовых облаков или газовых дисков вокруг

черных дыр с использованием закона тяготения Ньютона. Движение газовых облаков или дисков можно регистрировать непосредственно, используя высокое угловое разрешение космического телескопа «Хаббл» (рис.8) или 8-10-метровых наземных оптических телескопов нового поколения. Движение газа можно изучать и опосредованно, наблюдая переменность профилей линий излучения в спектрах ядер активных галактик и измеряя время запаздывания переменности линий относительно переменности непрерывного спектра, что позволяет оценить расстояния газовых облаков от центральной черной дыры. Впервые этот эффект запаздывания был обнаружен В.М.Лютым и А.М.Черепашуком в 1972 г.

Для ряда сверхмассивных черных дыр получены наблюдательные ограничения на их размер и показано, что он не превышает нескольких гравитационных радиусов.



Рис.7. Типичная спиральная галактика, видимая «с полюса». Хорошо различимы главные структуры: ядро (*в центре*), балдж (сферическое сгущение старых маломассивных звезд, окружающих ядро) и спирали, состоящие из ярких сравнительно молодых звезд.

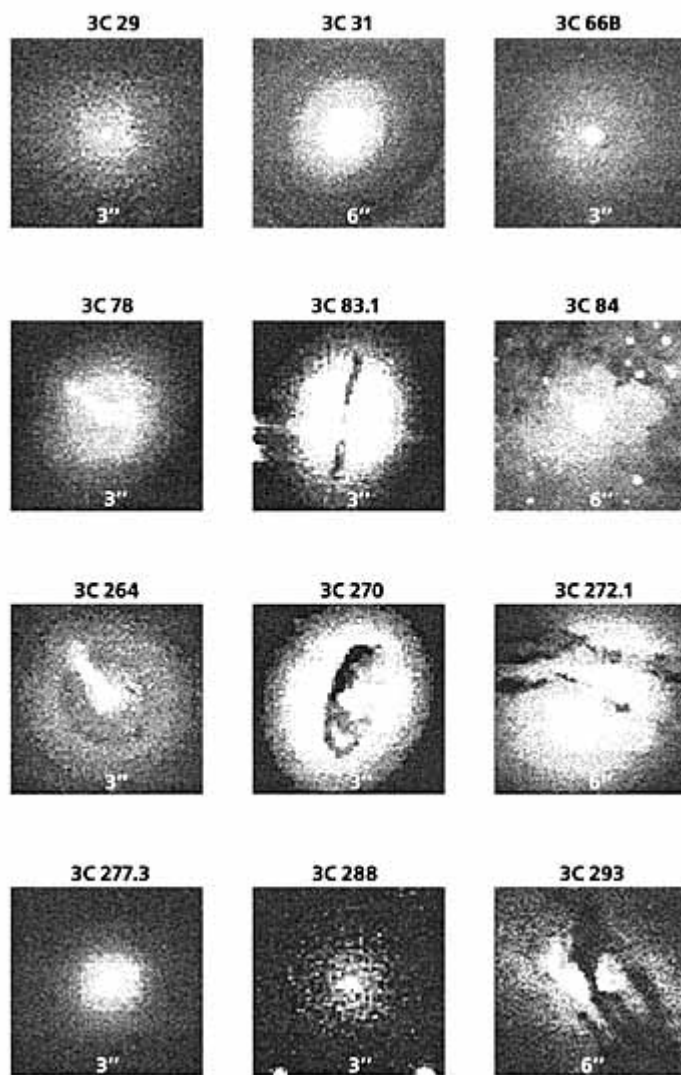


Рис. 8. Газово-пылевые дискообразные оболочки вокруг ядер ряда галактик, открытые космическим телескопом «Хаббл». По вращению этих дискообразных оболочек определяют массы центральных сверхмассивных черных дыр.

Особенно интересные и надежные данные получены при исследовании сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики. Группами немецких и американских ученых по наблюдениям в инфракрасном диапазоне с применением методов компенсации атмосферных искажений построена видимая орбита звезды S2, обращающейся вокруг центральной сверхмассивной черной дыры. Период орбитального обращения этой звезды равен 15.2 года (рис.9). Исходя из размера орбиты и периода обращения надежно оценивается масса черной дыры в центре Галактики - около $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

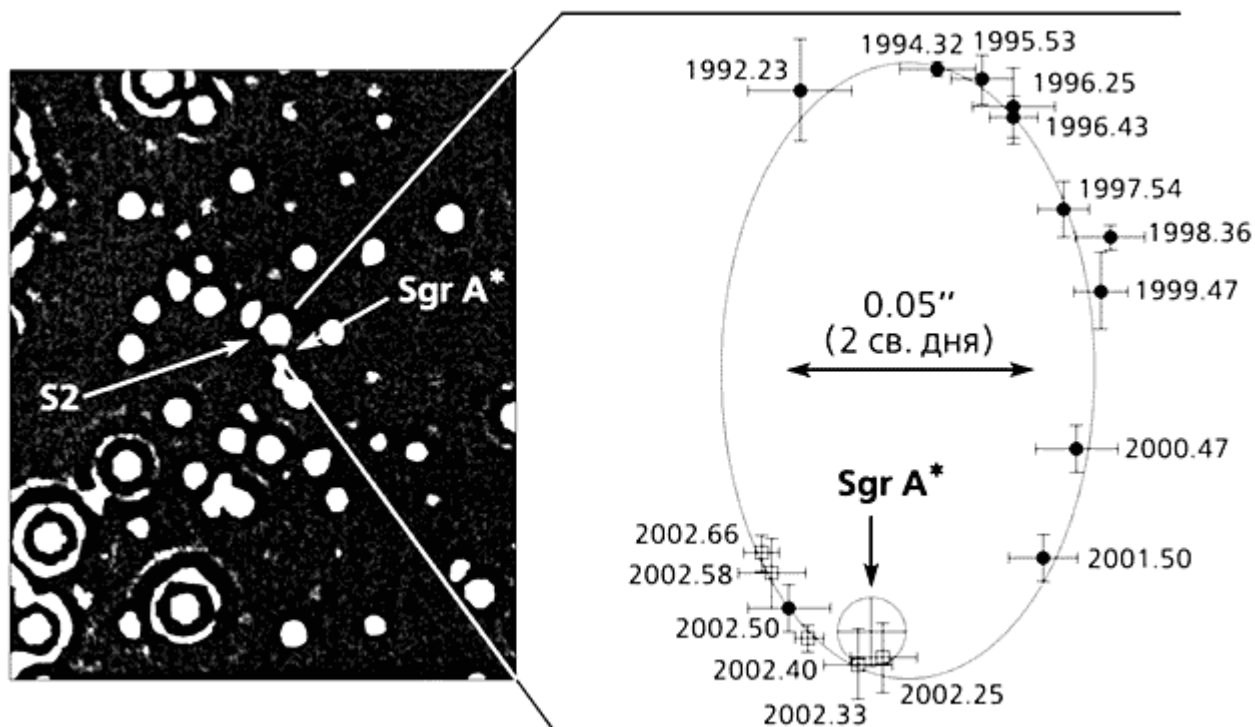


Рис. 9. Ближайшие окрестности радиисточника Sgr A* (сверхмассивная черная дыра массой $4 \cdot 10^6 M_\odot$) в созвездии Стрельца в направлении центра нашей Галактики (слева). Вокруг центра Галактики обращается звезда S2 с периодом 15.2 года. Справа показаны наблюдения 1992-2002 гг., демонстрирующие движение звезды S2 по эллиптической орбите вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Галактики.

Радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинной базой на волне 3.5 мм (рис.10), выполненные китайскими учеными в 2005 г. [8], показали, что радиус излучающей области вокруг черной дыры в центре Галактики составляет 1 а.е., то есть всего около 13 гравитационных радиусов ($r_g = 17 R_\odot$ для $M = 4 \cdot 10^6 M_\odot$). Размер этого компактного радиисточника увеличивается с длиной волны вследствие рассеяния радиоизлучения. Поэтому дальнейшие наблюдения на более коротких волнах, вероятно, позволят увидеть ближайшие окрестности горизонта событий черной дыры в центре Галактики. Это даст возможность непосредственно наблюдать эффекты сильного гравитационного искривления электромагнитных лучей в поле тяжести черной дыры, приводящие к появлению «тени» в распределении радиояркости вблизи горизонта событий, что прямо доказало бы: компактный объект в центре нашей Галактики - черная дыра в смысле ОТО.



Рис. 10. Радиоизображение области центра нашей Галактики с угловым разрешением $2 \cdot 10^{-4}$ ", полученное на волне 3.5 мм методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой [8]. Темное пятно в левом нижнем углу характеризует размер диаграммы направленности радиоинтерферометра. Видно, что центральная черная дыра массой $4 \cdot 10^6 M_\odot$ окружена оболочкой из плазмы, излучающей в радиодиапазоне, радиус которой составляет 1 а.е.

Оценки плотности вещества в измеренной области вокруг центральной черной дыры дают величину $6.5 \cdot 10^{21} M_\odot / \text{пк}^3$ - на 16 порядков выше плотности звезд в наиболее плотных звездных скоплениях. Если бы компактный объект в центре Галактики был не черной дырой, а скоплением отдельных темных тел (старых белых карликов, нейтронных звезд, черных дыр звездной массы), то при столь чудовищной плотности это скопление из-за коллективных взаимодействий рассеялось бы менее чем за 100 лет. Поэтому массивный ($M = 4 \cdot 10^6 M_\odot$) и компактный ($r < 12.6 r_g$) объект в центре Галактики должен быть единым телом, скорее всего, черной дырой.

По данным о более чем 300 сверхмассивных черных дырах уже можно сделать некоторые выводы об их демографии. Вот важнейшие из них.

Выявлена зависимость между массой центральной сверхмассивной черной дыры и массой балджа галактики (рис.11). Балдж - это сферическое сгущение маломассивных ($M < 1 M_\odot$) звезд вокруг ядра галактики. Возраст звезд балджа порядка возраста Вселенной ($\sim 10_{10}$ лет). Оказалось, что масса центральной черной дыры возрастает с массой балджа галактики линейно, при этом масса черной дыры составляет около 0.1% от массы галактического балджа. Наличие подобной корреляции ставит серьезные ограничения на механизмы образования сверхмассивных черных дыр. В частности, представляется вполне вероятной модель роста сверхмассивной черной дыры в результате слияния менее массивных объектов и аккреции вещества в иерархических моделях формирования галактики, когда галактика образуется путем объединения ряда меньших галактик.

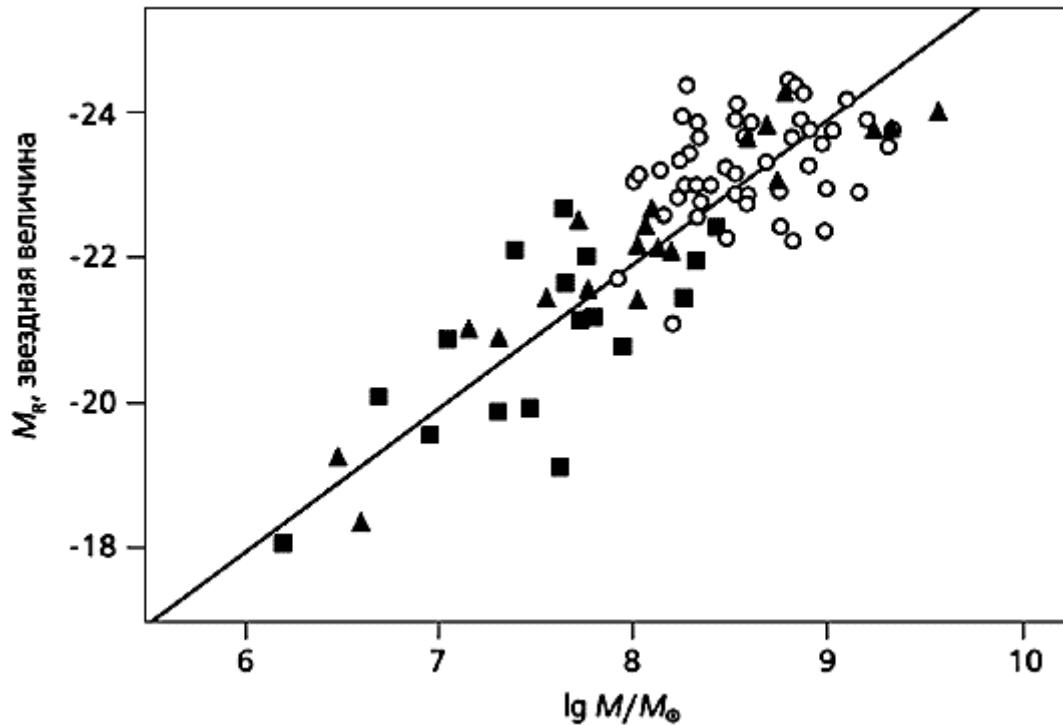


Рис. 11. Абсолютная звездная величина балджа M_R галактики, пропорциональная логарифму его массы, как функция логарифма массы сверхмассивной черной дыры M в ее центре. Обозначения: ○ - нормальные галактики, ■ - сейфертовские галактики I типа, △ - квазары.

Со светимостью галактического диска, которая обусловлена в основном молодыми звездами, родившимися менее миллиарда лет назад, масса центральной черной дыры не коррелирует. Для ядер активных галактик найдена зависимость между массой центральной черной дыры и светимостью ядра галактики в оптическом диапазоне. В то же время для ядер «спокойных» галактик (которые составляют 99% от общего числа галактик) подобная корреляция не наблюдается.

Выявлена корреляция между максимальной скоростью вращения галактики (характеризующей ее полную массу) и массой центральной черной дыры. Отсюда следует, что масса черной дыры возрастает с массой гало галактики, состоящего из темной материи [9]. Значит ли это, что за формирование центральной черной дыры ответственна загадочная темная материя?

В последние годы открыто свыше десятка квазаров (аккрецирующих сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик) с очень большим красным смещением ($z > 6$), что соответствует возрасту менее 1 млрд лет. Их массы составляют порядка $10^8 M_\odot$, и пока трудно объяснить, как сверхмассивным черным дырам удалось сформироваться за такое сравнительно короткое время.

* * *

Итак, черные дыры, как звездной массы, так и сверхмассивные, к настоящему времени уже прочно завоевали «права гражданства». Но для окончательного решения вопроса о природе многочисленных кандидатов в черные дыры требуются специальные «критические» эксперименты. Можно надеяться, что в ближайшие десятилетия будет

бесспорно доказано существование черных дыр во Вселенной. Это приведет к прорыву в понимании природы пространства-времени и сущности гравитации.

Литература

1. Чандрасекар С. Математическая теория черных дыр. М., 1986.
2. Черпацук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино, 2003.
3. Шапиро С., Тююколки С. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. М., 1985.
4. [Черпацук А.М. // Успехи физ. наук. 2003. Т.173. №4. С.345-382.](#)
5. Постнов К.А., Черпацук А.М. // *Астрономический журнал*. 2003. Т.80. С.1075-1085.
6. [Черпацук А.М. // Успехи физ. наук. 2002. Т.172. №8. С.959-963.](#)
7. Тутоков А.В., Черпацук А.М. // *Астрономический журнал*. 2003. Т.80. С.419-435.
8. Zhi-Qiang Chen, Lo K.Y., Liang M. -C. // *Nature*. 2005. V.438. P.62-65.
9. Засов А.В., Петрович Л.Н., Черпацук А.М. // *Астрономический журнал*. 2005. Т.82. С.407-413.

