

Сергей Попов

НЕБО В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ...

Наблюдения на рентгеновской обсерватории «Чандра» показали наличие большого числа маломассивных рентгеновских двойных звезд в эллиптических и линзовидных галактиках, а также в балджах — центральных сферических компонентах — дисковых галактик. Распределение источников по светимостям хорошо описывается двумя компонентами, граница между которыми соответствует светимости порядка $(2-3) \cdot 10^{38}$ эрг/с. Т.к. эта величина примерно соответствует максимальной (т.н. Эддингтоновской) светимости объекта с массой $1.4 M_{\odot}$, то возможно, что более мощные источники являются аккрецирующими черными дырами, а менее мощные — нейтронными звездами. Т.о. с некоторой долей уверенности можно говорить, что мы видим в галактиках ранних типов — эллиптических и линзовидных — тесные двойные системы как с черными дырами (самые яркие источники), так и с нейтронными звездами (менее яркие).

ГЛАВНАЯ ОСОБЕННОСТЬ АСТРОНОМИИ

У астрономии есть важная особенность. Из всех естественных наук она выделяется отсутствием прямых экспериментов с исследуемыми объектами. Лишь в Солнечной системе мы можем очень редко «потрогать руками» небесные тела, но эта часть астрономии уже практически выделилась в отдельную дисциплину, даже в несколько разных дисциплин, часто более близких к изучению Земли, чем к исследованию далекого космоса. Астрономия — наука наблюдательная. Поэтому основной прогресс в этой области исследования природы связан с появлением новых средств наблюдений и новых методов их обработки: телескопов, спутников и т.д.

В последние несколько лет много интересных результатов получено в рентгеновском диапазоне (прямое измерение сверхсильного магнитного поля у нейтронной звезды в источнике мягких повторяющихся гамма-всплесков, определение природы рентгеновского фона, новые результаты по скоплениям галактик, открытие структуры пульсарных туманностей, и

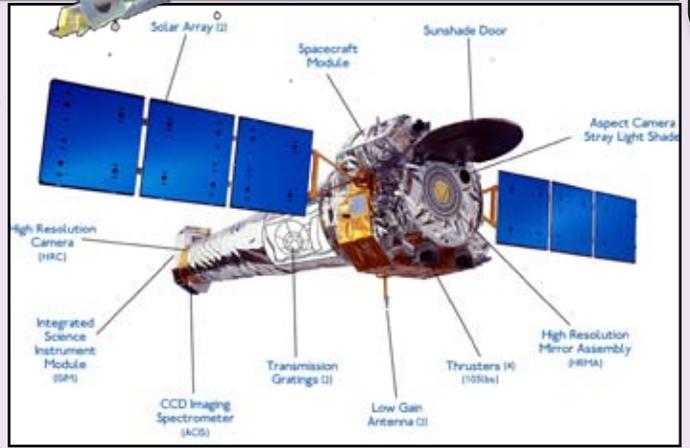


Рис. 1. Космическая обсерватория «Чандра». Спутник наблюдает в стандартном рентгеновском диапазоне от 0.1 до 10 кэВ. Основным достоинством является высокое угловое разрешение — лучше одной угловой секунды

многое-многое другое). Связано это с работой двух космических обсерваторий: европейской «ХММ-Ньютон» (запущена в декабре 1999 г.) и американской «Чандра» (запущена в июле 1999 г.), названной в честь С. Чандрасекара (см. рис. 1).

Оба эти спутника представляют большой шаг вперед в развитии рентгеновских наблюдений. При их создании был реализован принцип «в 10 раз»: как правило, увеличение возможностей прибора на порядок приводит к новым важным (в том числе и непредсказуемым) открытиям. При этом две одновременно запущенные рентгеновские обсерватории не дублируют, а дополняют друг друга, т.к. их создатели максимизировали разные параметры инструментов.

Благодаря рекордной для рентгеновской астрономии собирающей площади (аналог площади объектива у обычных оптических телескопов) «ХММ-Ньютон» может получать спектры очень высокого (для рентгеновского диапазона) качества. Это чрезвычайно важно, т.к. колъ в астрономии излучение (в первую очередь электромагнитное) является единственным источником информации, то нужно пытаться «выжать» из этого как можно больше, нужно «препарировать» излучение — т.е. исследовать

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОНАВИКА

спектры (кстати, свое имя спутник получил в честь Ньютона, потому что сэр Исаак был одним из пионеров спектроскопии). Например, наблюдая остаток сверхновой, ХММ-Ньютон может отдельно рассмотреть, где находятся разные элементы: кальций, сера, железо, кремний (см. рисунок 2).

«Чандра», в свою очередь, обладает угловым разрешением, невиданным доселе в области высоких энергий. Именно поэтому результаты американского спутника более известны — их легче представить в наглядной форме: «картинки» (конечно, на спутнике есть и спектральная аппаратура). Взаимодополняемость двух спутников была недавно продемонстрирована на примере исследования Кастора А и В (см. рис. 3). «Чандра» — единственный спутник, который может разрешить эту звездную пару и даже разглядеть третий компонент (на самом деле Кастор — шестикратная система, каждый из трех компаньонов в свою очередь является тесной двойной системой, но для рентгеновской аппаратуры это пока недоступно). Однако, получить хорошие спектры каждой звезды в отдельности спутник не смог. Именно обработка совместных наблюдений «Чандры» и ХММ-Ньютона помогла «вытянуть» хорошие рентгеновские спектры обеих звезд и изучить некоторые другие их свойства.

Благодаря своему высокому угловому разрешению и высокой проникающей способности «Чандра» впервые предоставил возможность детально исследовать популяции рентгеновских источников за пределами Местной группы. В данной статье речь пойдет об исследованиях аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр в тесных двойных системах с маломассивным компаньоном в галактиках ранних типов (эллиптических и линзовидных).

Маломассивная тесная рентгеновская двойная — это звездная система, где аккретором является нейтронная звезда или

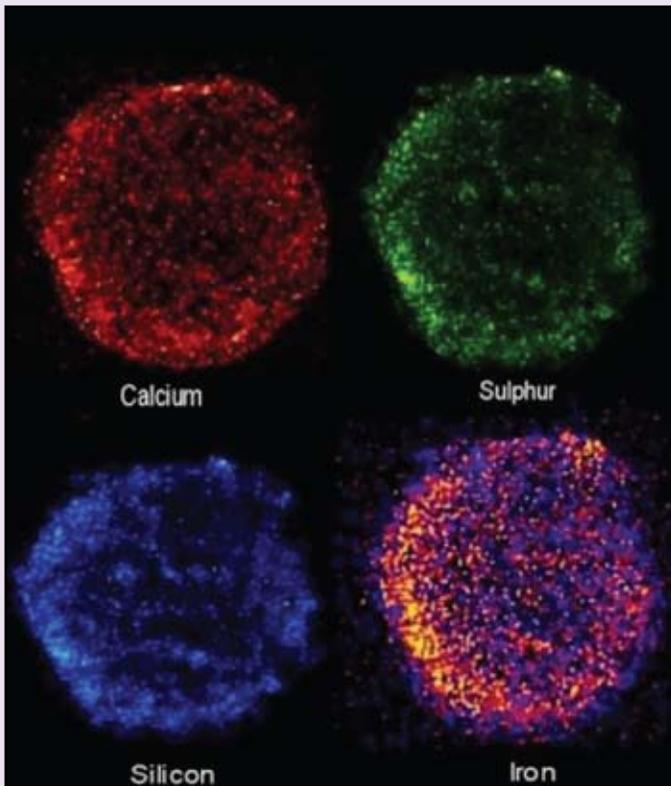


Рис.2. Остаток сверхновой Тихо, взорвавшейся более 400 лет назад. Показано четыре изображения (в условных цветах), соответствующих линиям четырех элементов. Спектрально разрешение спутника ХММ-Ньютон позволяет не только узнать из чего состоит остаток, но и как распределены разные элементы (фото: ESA)

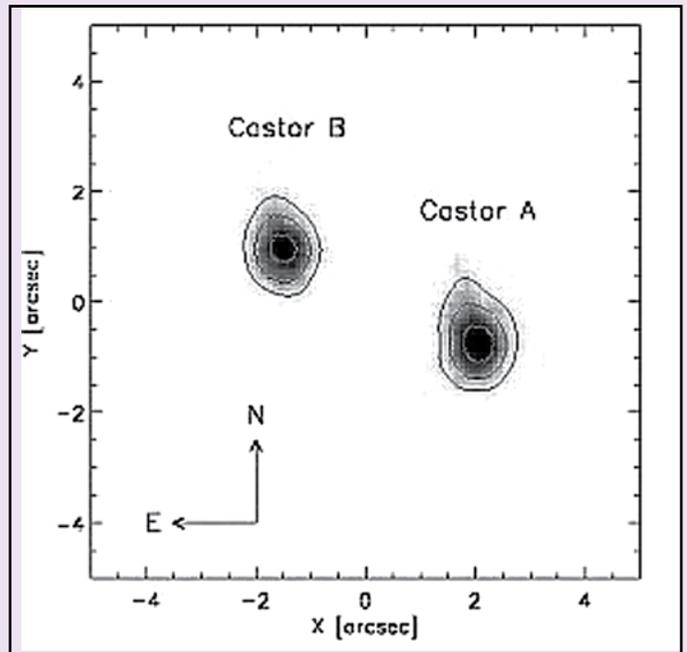


Рис. 3. Кастор А и В в рентгеновских лучах. Наверняка многие читатели видели эту пару звезд в свои любительские телескопы. Для того, чтобы рассмотреть их по отдельности в рентгеновском диапазоне, понадобилась одна из самых совершенных на сегодняшний день космических рентгеновских обсерваторий — «Чандра». А для того, чтобы получить хорошие спектры каждой из звезд, понадобилась вторая обсерватория — ХММ-Ньютон. Звезды излучают в рентгеновском диапазоне благодаря активности их корон. (Из работы Штельцер Б., Бурвиц В.)

черная дыра, а донором — маломассивная нормальная звезда. Важно определить, что является критерием «массивности». В массивных двойных системах источником вещества обычно является звездный ветер. Это довольно широкие пары, где когда-то хватало места двум массивным звездам (пока первая — более массивная — не взорвалась). Часто аккреционный диск не образуется: вещество квазисферически падает на компактный объект. Время жизни таких систем как ярких рентгеновских источников невелико (менее миллиона лет), т.к. невелико время жизни звезды-донора, и соответственно все ее эволюционные стадии будут очень короткими. Обычно масса звезды-донора больше 10 масс Солнца. Совсем другая ситуация в маломассивных двойных. Это очень тесные системы. Вещество перетекает с нормальной звезды на черную дыру или нейтронную звезду, образуя аккреционный диск. Перетекание вещества в таких системах идет долго (сотни миллионов — миллиарды лет). Источники в маломассивных двойных могут быть весьма мощными (светимость определяется темпом аккреции, а он в случае диска может быть очень большим). Как правило, масса звезды-донора меньше одной солнечной.

Внимательный читатель должен спросить: «А что же с системами, где массы нормальных компонент лежат между 1 и 10 массами Солнца?» Такие системы конечно же есть, но, не вдаваясь в детали, скажем лишь, что увидеть рентгеновский источник в такой паре непросто. Есть некоторые эффекты селекции, которые делают число наблюдаемых (доступных нам) систем промежуточных масс небольшим. В таких парах нормальная звезда недостаточно массивна, чтобы давать сильный звездный ветер, а эпизод дисковой аккреции обычно оказывается очень скоротечным (тысячи лет). Тем не менее мы знаем несколько галактических источников, которые относят к системам с нормальным компонентом промежуточной массы: Геркулес X-1, Лебедь X-2 и V404 Лебеда.

То, что именно они видны в эллиптических и линзовидных

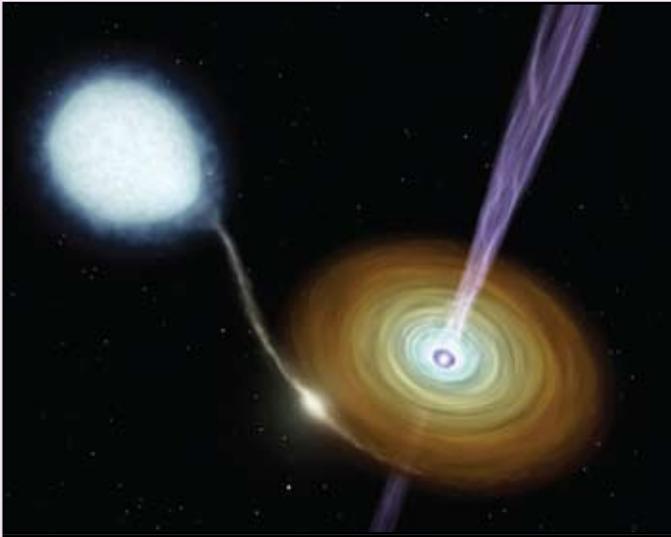


Рис. 4. Дисковая аккреция на черную дыру. Вещество с маломассивной звезды перетекает на компактный объект, образуя т.н. аккреционный диск. Аккреционный диск обычно дает основной вклад в светимость всей системы. Часть вещества может выбрасываться в виде двух струй — джетов. Из-за большого гравитационного потенциала вблизи компактного объекта скорость вещества в джетах может достигать релятивистских значений

галактиках, а также в балджах дисковых, неудивительно. Массивных двойных там быть не должно, т.к. последние миллиарды лет темп звездообразования в таких системах был очень низким: массивных звезд в галактиках ранних типов просто нет. А вот компактные остатки их эволюции есть! Миллиарды лет назад, когда в этих галактиках шло активное формирование новых звезд, образовывались и массивные. Затем они, пройдя свой эволюционный путь, взорвались, оставив компактный объект — нейтронную звезду или черную дыру.

Если массивная звезда вошла в пару со звездой много меньшей массы, и если система не распалась после взрыва сверхновой, то через сотни миллионов или даже миллиарды лет может появиться рентгеновский источник. Кроме того, маломассивная двойная может образоваться просто в результате захвата: компактный объект и нормальная звезда, жившие до этого отдельно друг от друга, в результате гравитационного взаимодействия могут образовать пару. Как правило, нужно, чтобы во взаимодействии участвовала и третья звезда. Такая ситуация вполне возможна в шаровых скоплениях, и мы позже это обсудим. Но пока поговорим о наблюдательных данных.

ПРИСТАЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД «ЧАНДРЫ»

Рентгеновская обсерватория «Чандра» может видеть в десятки раз более слабые источники по сравнению с предшествующими инструментами и имеет очень высокое для рентгеновского диапазона угловое разрешение. Поэтому даже в галактиках, расположенных на расстояниях в десятки Мпк, спутник различает десятки отдельных источников, со светимостями выше 10^{38} эрг/с (на расстоянии, соответствующем скоплению в Деве, этот предел будет еще ниже).

Например, в известной галактике М84 в скоплении в Деве спутник рассмотрел около сотни отдельных источников, являющихся маломассивными двойными (см. рис 6). В NGC 4697 — около 90, из которых маломассивные двойные составляют примерно 90 процентов (см. рис. 7). В линзовидной галактике NGC 1553, находящейся на расстоянии почти 25 Мпк от нас, видно полсотни дискретных источников (см. рис. 8), и это считается неудачным сеансом наблюдения!

Получить спектр отдельного источника (за исключением самых ярких) не удастся. Поэтому приходится изучать всю популяцию в целом. И здесь была обнаружена интересная особенность...

В астрономии очень часто строят такое распределение: по горизонтальной оси откладывается светимость объектов, а по вертикальной — число источников, со светимостью выше данной. При этом обычно используют не сами величины, а их логарифмы (см. рис 9). Если нарисовать такую картинку для маломассивных рентгеновских двойных в галактиках ранних типов, то мы увидим, что данные хорошо описываются двумя прямыми линиями. Т.е. есть излом в распределении, приходящийся примерно на $(2-4) \cdot 10^{38}$ эрг/с. Объяснять этот излом можно по-разному. Рассмотрим два возможных варианта.

ЧТО НАМ СВИТИТ В ВЫШИНЕ ...

Одно из возможных объяснений заключается в том, что источники до и после излома родились в разное время, т.е. в результате двух эпизодов звездообразования. Один эпизод дал одно распределение источников по светимостям, другой — другое. Например, более яркие источники родились в недавнем эпизоде, а более слабые соответствуют этапу формирования звезд, имевшему место некоторое время назад — яркие объекты, образовавшиеся в то время, уже погасли. Мы

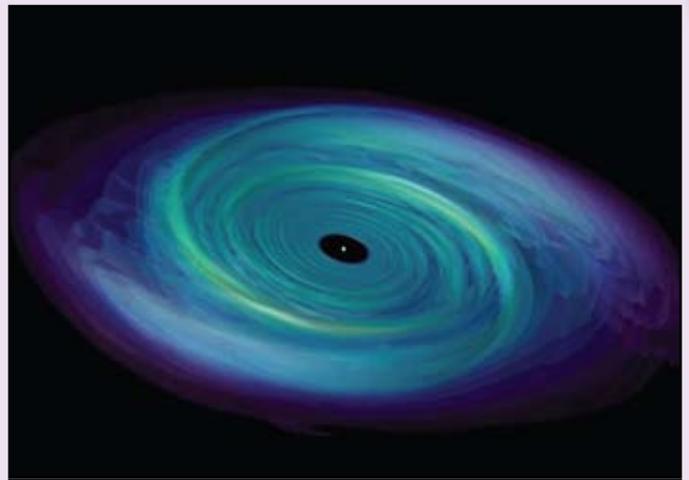


Рис. 5. Результат моделирования аккреционного диска в тесной двойной системе (из работы М. Оуэна и Д. Блондина [Michael Owen, John Blondin], по материалам *Астрономической картинки дня*). Вещество перетекает с нормальной звезды (на рисунке не показана) на компактный объект (яркая точка в центре). Авторам удалось промоделировать трехмерную структуру диска с учетом неустойчивостей. Отметим, однако, что задача эта очень сложная, и последнего слова в расчетах структуры реальных аккреционных дисков еще не сказано

видим сумму вкладов двух эпизодов, которая выглядит как изломанная прямая.

Другое объяснение, которое мы рассмотрим более подробно, сводится к тому, что источники до излома (менее яркие) являются нейтронными звездами, а объекты с более высокой светимостью содержат аккрецирующую черную дыру. Такая идея связана с тем, что для светимости аккрецирующего объекта есть предел, называемый Эддингтоновским. Он возникает из-за того, что при большом темпе аккреции мощный поток излучения начинает «выдувать» часть падающего вещества (помните, что «свет давит»). Светимость в первом приближении прямопропорциональна темпу, с которым вещество течет на нейтронную звезду или черную дыру. Но если вещества слишком

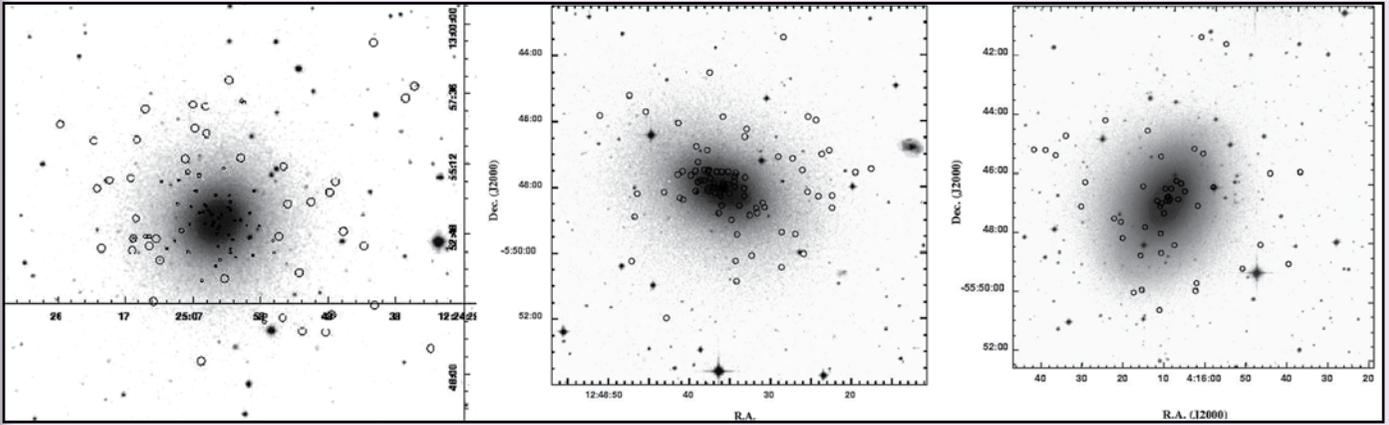


Рис. 6. (слева). Эллиптическая галактика M84. На оптическое изображение, полученное в Цифровом обзоре неба, наложены рентгеновские источники, зарегистрированные спутником «Чандра». (Из работы Финогонов А., Джонс К.)
 Рис. 7а. (центр). Эллиптическая галактика NGC 4697. На оптическое изображение (Цифровой обзор неба) наложены рентгеновские источники, зарегистрированные спутником «Чандра». (Из работы Сарацин К. и др. Astrophysical Journal)
 Рис. 8а. (справа). Линзовидная галактика NGC 1553. На оптическое изображение (Цифровой обзор неба) наложены рентгеновские источники, зарегистрированные спутником «Чандра». (Из работы Блантон Э. и др. Astrophysical Journal)

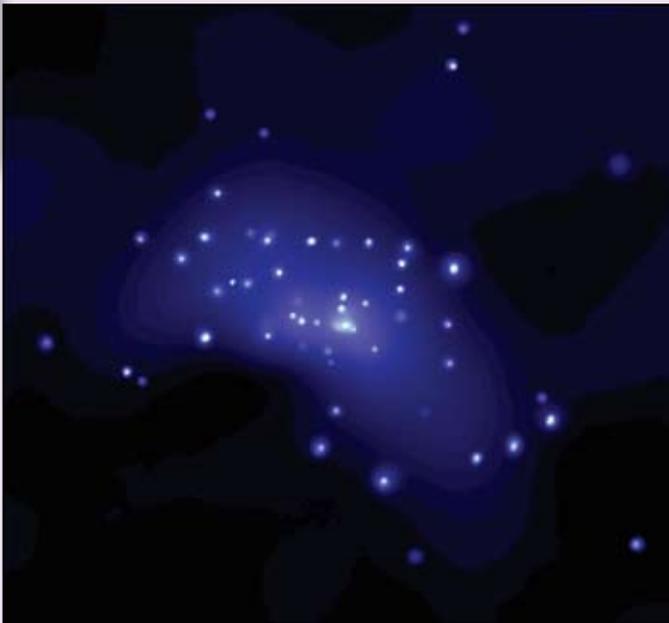


Рис. 7б. Галактика NGC 4697. На изображении видны точечные источники и диффузное излучение горячего газа

ком много, то эта простая зависимость нарушается: вы кидаете все больше вещества, а светимость не растет. Просто часть вещества может быть выброшена из системы. На компактный объект попадет лишь доля, примерно соответствующая полной эддингтоновской светимости, поэтому при очень больших темпах аккреции большая часть падающей материи будет выброшена в виде двух струй — джетов. Такие образования наблюдаются у очень многих объектов, например, у знаменитого SS433.

Разумеется, из-за того что мы рассматриваем баланс двух сил, одной из которых является гравитация, в формулу для предела входит масса аккретора. Эддингтоновский предел равен $1.3 \cdot 10^{38}$ М/Мо эрг/с. Соответственно, чем больше масса аккретора, тем выше предел. Например, в центре квазара находится сверхмассивная черная дыра. Массы таких объектов в сотни миллионов раз больше массы Солнца. Значит, предел будет порядка 10^{47} эрг/с. И действительно, мы не видим квазаров со светимостью под 10^{49} эрг/с. Это является дополнительным подтверждением того, что активность ядер галактик порождается аккрецией на черные дыры больших масс.

Как видно, для нейтронных звезд, массы которых заключены в достаточно узком интервале вблизи 1.4 массы Солнца, пре-

дел будет как раз равен $(2-3) \cdot 10^{38}$ эрг/с. Чтобы получить большую светимость, надо поместить в двойную систему более массивный объект — черную дыру (нейтронные звезды не могут быть тяжелее 2-3 масс Солнца).

Массы черных дыр в двойных системах могут быть довольно разными: от 3-4 масс Солнца до примерно 20-30. Типичным значением является 7-10 солнечных масс (массы черных дыр известны не очень хорошо). Значит, аккрецирующая черная дыра в двойной системе может наблюдаться как источник со светимостью до 10^{39} эрг/с и даже немного выше.

Интересно, что видят и более мощные источники, т.н. «сверхмощные» (ultraluminous). Если использовать формулу для

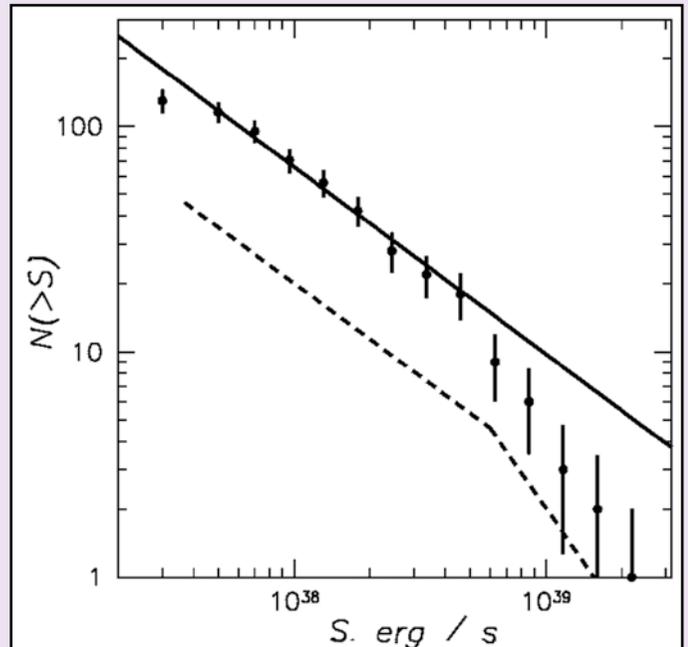


Рис. 9. Распределение числа маломассивных рентгеновских двойных, зарегистрированных в галактике M84, по светимости. Светимость отложена по горизонтальной оси (в эргах в секунду). Точки соответствуют наблюдательным данным. Сплошная линия описывает слабые источники (возможно, это нейтронные звезды). Штриховая линия описывает возможный вклад фоновых источников (например, далеких галактик), не имеющих отношения к M84. Хорошо виден «излом» в распределении на светимости примерно $(3-4) \cdot 10^{38}$ эрг/с. (Из работы Финогонов А., Джонс К. Astrophysical Journal)

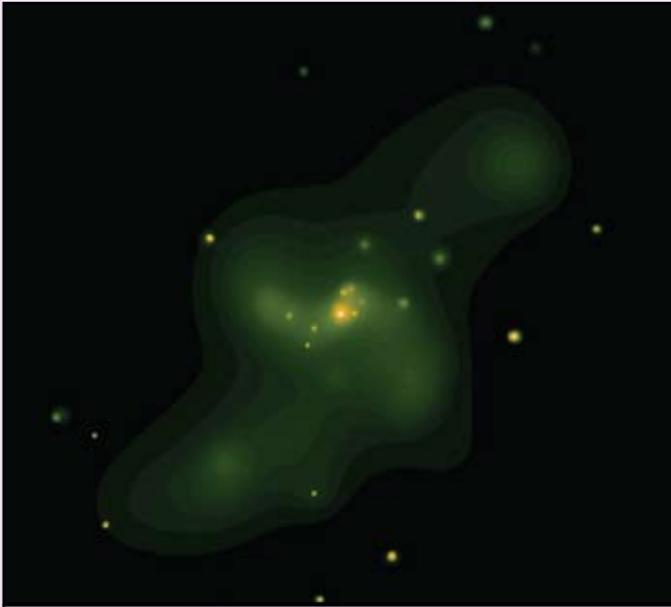


Рис. 8b. Линзовидная галактика NGC 1553. На изображении видны точечные источники и диффузное излучение горячего газа. В центре, возможно, находится сверхмассивная черная дыра. Однако источник, связанный с ней, будучи самым ярким на снимке, не является очень мощным по внегалактическим меркам. Т.е. галактика не относится к числу активных

Эддингтоновского предела светимости, то мы получим для них массы компактных объектов в несколько десятков масс Солнца! Например, в эллиптической галактике NGC 720 обнаружено 9 таких объектов. Это могут быть действительно массивные черные дыры. Однако, теория не предсказывает существование большого числа черных дыр со столь большими массами. Возможно, что источник просто излучает несимметрично. Тогда, переводя наблюдаемый поток в светимость, мы завышаем ее, если предполагаем сферически-симметричное излучение. При наличии выделенного направления излучения (джетов) источник с обычной черной дырой звездной массы может выглядеть очень ярким, если наблюдатель смотрит в самое «жерло». В любом случае сверхмощные источники наверняка содержат черные дыры.

МАЛЫЕ РОДИНЫ МАЛОМАССИВНЫХ СИСТЕМ

Наблюдения показывают, что хотя количество маломассивных рентгеновских двойных обычно больше у больших (более массивных) галактик, однако, эта корреляция является не очень хорошей. Могут быть две галактики с одинаковым количеством звезд (а значит, с одинаковой массой и оптической светимостью), но число маломассивных систем будет заметно отличаться. Зато, если мы подсчитаем количество шаровых скоплений в этих галактиках, то увидим, что их больше там, где больше маломассивных двойных.

Это не является неожиданным результатом. В нашей Галактике 20 процентов маломассивных рентгеновских двойных находятся в шаровых скоплениях, притом что на скопления приходится лишь 0.1 процента звезд. Это значит, что образование таких звездных пар в шаровых скоплениях идет гораздо более эффективно, например, в нашей Галактике (см. числа выше) маломассивные системы образуются в шаровых скоплениях в 200 с лишним раз эффективнее, чем в галактическом диске! Учитывая этот факт, мы можем прийти к выводу, что практически все маломассивные двойные образовались в скоплениях, но потом по той или иной причине покинули их (например, скопление могло распасться или система была выкинута из-за взаимо-

действия с другими звездами и т.д.). Более высокий темп формирования маломассивных двойных объясняется тем, что при большой плотности звезд достаточно часто случаются столь тесные сближения, что происходит захват звезды.

В эллиптических галактиках обычно много шаровых скоплений, а потому неудивительно, что наблюдается много рентгеновских источников, связанных с тесными двойными звездами. Современная техника позволяет непосредственно определить, что источник в далекой галактике находится в шаровом скоплении. Так, в галактике NGC 720 около 10 источников находятся в скоплениях.

ЭПИЛОГ: МНОГОЕ СДЕЛАНО, НО МНОГОЕ ЕЩЕ ПРЕДСТОИТ

Современные рентгеновские телескопы позволяют рассмотреть отдельные источники в далеких галактиках. Наблюдения галактик ранних типов на спутнике «Чандра» показали наличие большой популяции маломассивных рентгеновских двойных систем. Вероятно, большинство из них образовалось в многочисленных шаровых скоплениях. Самые яркие источники со светимостью более примерно $3 \cdot 10^{38}$ эрг/с, по всей видимости, являются аккрецирующими черными дырами — нейтронные звезды слишком легкие, чтобы породить стационарные сферически-симметричные источники с такой мощностью. Видят в эллиптических галактиках и сверхмощные источники, также связанные с черными дырами.



Рис. 10. На рисунке показано шаровое скопление M15. В таких объектах за счет тесных сближений происходит очень активное формирование тесных двойных систем с нейтронными звездами и черными дырами

Таким образом, в жестком диапазоне мы видим компактные остатки массивных звезд, когда-то светивших в эллиптических галактиках. Впервые стало возможным рассуждать о количестве черных дыр и нейтронных звезд в галактиках ранних типов на основе количественных наблюдательных данных, что важно для теоретиков, изучающих эволюцию двойных звезд.

К счастью, развитие науки не стоит на месте, и от каждого поколения инструментов (будь то рентгеновский диапазон или любой другой) мы можем ожидать новых открытий. Хочется думать, что когда-нибудь станет возможным видеть в далеких галактиках радиопульсары или молодые горячие нейтронные звезды, а может быть, даже и одиночные компактные объекты, аккрецирующие вещество межзвездной среды.

