

Ультраяркие рентгеновские источники

С.Н. ФАБРИКА,
доктор физико-математических наук
САО РАН

Ультраяркие рентгеновские источники (Ultraluminous X-ray Sources, ULX) оказались настолько необычными для астрофизиков, что неслучайно их исследованию за последние 15 лет было посвящено около 1000 статей в научных журналах. Такие объекты были обнаружены в галактиках относительно недавно с помощью современных космических обсерваторий.



Эти объекты излучают в рентгеновском диапазоне в сотни и тысячи

раз сильнее, чем самые яркие черные дыры в Галактике. Считается, что это – самые лучшие кандидаты в черные дыры; но что они представляют собой на самом деле? В этой статье предлагается не только современное представление об ультраярких источниках, но и почти детективная история о том, как менялись о них представления астрофизиков.

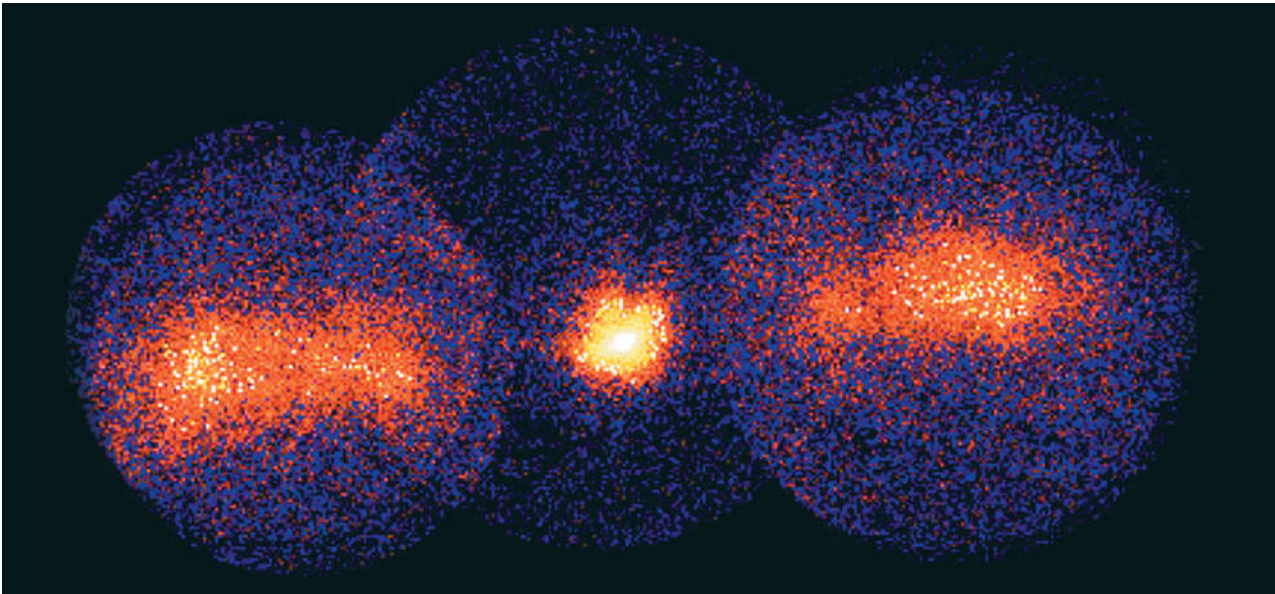
ЧТО ТАКОЕ ULX?

Менее 20 лет назад в галактиках были обнаружены первые ультраяркие рентгеновские источники. Например, ярчайший источник Галактики Лебедь X-1 с черной дырой излучает энергии в рентгеновском диапазоне в 10 тыс. раз больше, чем вся светимость

Солнца, а многие из ULX – в десятки миллионов раз. В оптическом диапазоне излучение ULX “слабенькое” – они светят в тысячи раз меньше, чем в рентгеновском диапазоне. Ярче ULX в рентгеновском диапазоне светят только сверхмассивные черные дыры (активные ядра галактик или квазары). Но массы

этих объектов – от миллионов до миллиардов масс Солнца, они и должны быть очень яркими объектами.

В 2000 г. на Генеральной Ассамблее МАС в Манчестере было объявлено об открытии нового типа объектов – ULX. Они были обнаружены с помощью уникальной космической рентгенов-



Две протяженные рентгеновские струи размером примерно 120 пк и объект SS 433 в его центральной части (SS 433 выглядит как точка). Релятивистские струи тормозятся и перегреваются, поэтому они излучают в рентгеновском диапазоне. Изображение создано Т. Котани (Технологический университет, Токио) на основе данных космической рентгеновской обсерватории “ASCA” (Япония).

ской обсерватории “Чандра” (Земля и Вселенная, 2000, № 4, с. 59–60), обладающей превосходным угловым (пространственным) разрешением. Конечно, эти объекты были видны в других галактиках и раньше, но разрешение предыдущих рентгеновских обсерваторий было в несколько раз хуже и невозможно было доказать, что это неактивные ядра галак-

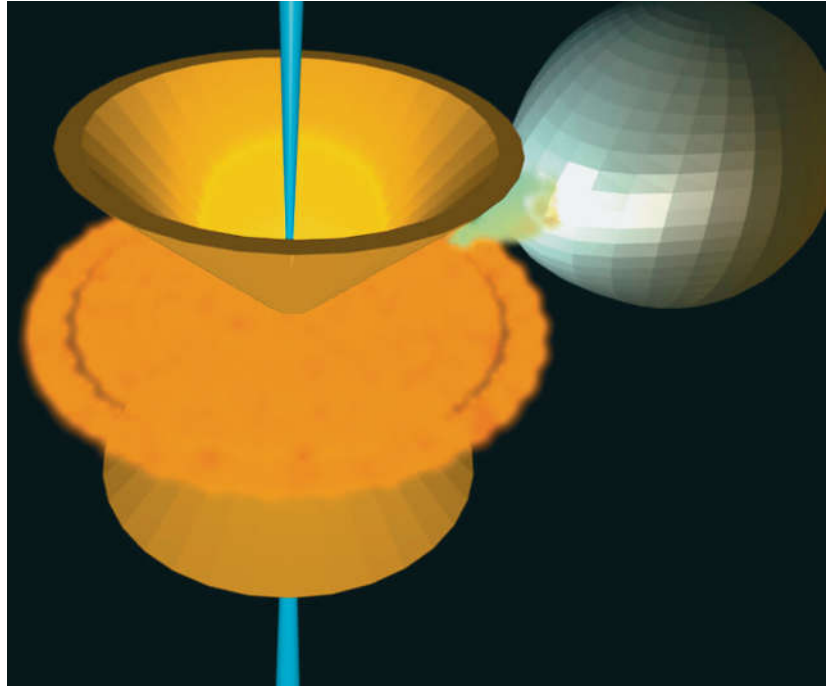
тик, которые всегда находятся в центрах галактик. В 1999 г. была опубликована статья американских астрофизиков Е. Колберта и Р. Машоцкого, где было сказано, что такие объекты не относятся к активным ядрам галактик (Земля и Вселенная, 2016, № 5). В той же статье им подсказал идею профессор Л.Г. Титарчук, предположивший, что эти объекты – черные дыры промежуточных масс (Intermediate Mass Black Holes, IMBH).

Сейчас известно только два типа черных дыр: звездных масс и сверхмассивные. Черные дыры звездных масс образуются в процессе эволюции массивных звезд. Например, открытая в нашей Галактике самая массивная черная дыра имеет массу примерно $15 M_{\odot}$, в соседних галактиках известны черные дыры с массой не более $30 M_{\odot}$.

Известны гигантские объекты массой от миллионов до миллиардов солнечных масс: сверхмассивные черные дыры (активные ядра галактик и квазары; Земля и Вселенная, 2010, №№ 1, 3). Почему нет черных дыр средних масс? Уже хорошо известны сценарии, по которым могли бы сформироваться IMBH, но явных свидетельств их существования пока нет.

В 2001 г. астрофизики – американский П. Мадау и английский М. Рис – опубликовали статью, в которой предположили, что ULX – это, скорее всего, черные дыры средних масс (IMBH), причем, они возникли из самых первых звезд. Первые звезды носят название “Население III”; они пока не обнаружены. Считается, что первые звезды были очень массивными – сотни и тысячи масс Солнца.

Модель двойной системы SS 433. Звезда-«донор» (справа) тонкой струей «поставляет» газ на внешний край аккреционного диска (в центре). Из внутренней области диска выбрасывается избыточный газ в виде ветра со скоростью около 1000 км/с, имеющего форму конуса. Из «ветровых» конусов вылетают релятивистские струи. В центре диска расположена черная дыра и очень яркий рентгеновский источник. Рисунок К. Атапина (ГАИШ МГУ).



Звезды «Населения III» образовывались задолго до формирования галактик (красные смещения $z = 15-25$). Они быстро (не более, чем за миллион лет) превратились в ИМВН и далее «блуждали» по Вселенной, так как еще не было галактик. Первые галактики в астрофизике называются «галло»; они были в тысячи раз менее массивные, чем нынешний Млечный Путь. Эти молодые галактики захватывали ИМВН. Галло многократно сливались, набирали массу, и в них, как предполагается, уже были ИМВН. Почему вспомнили про ИМВН сразу после открытия ULX? – Это связано с пределом Эддингтона. Считалось, что предел Эддингтона нельзя превосходить: например, для черной дыры массой

$10 M_{\odot}$ этот предел составляет $1,3 \times 10^{39}$ эрг/с, а ULX – ярче в десятки раз.

Эддингтоновский предел зависит только от массы объекта – например, Земли, Солнца или квазара, но далеко не каждый объект может достичь до этого предела. Такое возможно в случае массивных или релятивистских звезд (черные дыры, нейтронные звезды). Известно, что сила гравитации (притяжение) и сила светового давления (отталкивание) обратно пропорциональны квадрату расстояния. Если светимость объекта больше предела Эддингтона, то материя не может падать на звезду, она будет с ускорением вырываться наружу за счет светового давления. Если газ падает на черную дыру (или нейтронную звезду), то вокруг черной дыры,

как правило, образуется аккреционный диск (Земля и Вселенная, 2016, № 6). Светимость такого диска напрямую зависит от того, сколько газа в него поступает. Называется это темпом аккреции; в астрофизике его принято измерять в граммах за секунду, или в массах Солнца в год. Когда темп аккреции достаточно большой, то аккреционный диск, окружающий черную дыру, будет очень ярким рентгеновским источником. Если же в аккреционном диске темп аккреции будет выше предела Эддингтона, то такой диск будет называться сверхкритическим. Примером такого объекта в нашей Галактике является объект SS 433.

Выделение энергии в диске зависит только от темпа аккреции и ни-

как не зависит от массы черной дыры. Это связано с тем, что при достижении горизонта событий черной дыры вещество разгоняется до скорости света, что есть постоянная величина. Светимость диска находится в прямой пропорциональной зависимости от темпа аккреции, а это примерно 10% от известной всем формулы $E = M \times c^2$, где M – в данном случае темп аккреции, c – скорость света, а E – светимость объекта. Предел Эддингтона зависит от массы объекта (например, черной дыры), причем, в прямой пропорциональности. Светимость ULX составляет от 10^{39} до 10^{41} эрг/с, нижняя граница этого интервала уже соответствует пределу Эддингтона для черной дыры (около $10 M_{\odot}$). Идея черных дыр средних масс предложена для того, чтобы не превышать предел Эддингтона. Но даже в случае IMBH для такой дыры нужна массивная звезда-соседка (в двойной системе она называется “донор”). Только массивная звезда может обеспечить требуемый темп аккреции – для того, чтобы получилась светимость, сопоставимая с ULX. Более того, в физике нет никакого запрета на предел Эддингтона. При его превышении избыточный газ будет выбрасываться из диска в виде мощного

ветра, что получило название сверхкритический (или сверх-эддингтоновский) диск.

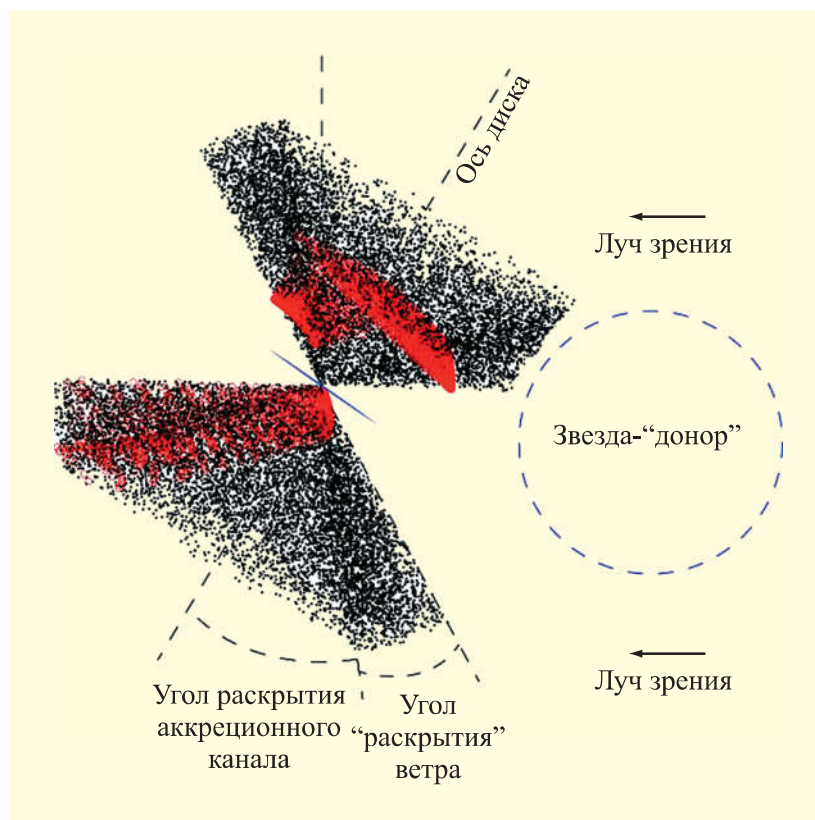
СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ

SS 433 – единственный известный в Галактике экзотический объект со сверхкритическим аккреционным диском вокруг черной дыры. Он расположен на расстоянии 5,5 кпк (18 тыс. св. лет) в созвездии Орла в центре необычной туманности. SS 433 исследовали сотни астрофизиков, на эту тему написано более тысячи публикаций. Например, в статье, опубликованной в 1986 г. американский астрофизик Дж. Кац заметил, что сверхкритический аккреционный диск в SS 433 – неяркий рентгеновский источник, потому что мы смотрим на этот диск сбоку, а не в канал диска. Другие подобные объекты (при определенной ориентации) будут чрезвычайно яркими рентгеновскими источниками. Они могут быть обнаружены и в других галактиках. В 2000 г. автор вместе с А.В. Мещеряковым (ИКИ РАН) опубликовали статью “SS 433 как новый тип внегалактических рентгеновских источников”, в которой точно указали, где и как такие объекты надо искать.

В 1973 г. впервые сверхкритические аккреционные диски были описаны

в классической статье отечественных астрофизиков Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева “Черные дыры в двойных системах. Наблюдательные проявления”. Статья в основном была посвящена обычным аккреционным дискам (сейчас они называются “стандартными”, или альфа-дисками), но в ней также содержалось описание дисков с темпом аккреции, превышающим предел Эддингтона. Это было первое и самое лучшее описание сверхкритической дисковой аккреции. Падающий на черную дыру газ формирует стандартный аккреционный диск, но на определенном расстоянии от нее (в зависимости от изначального темпа аккреции) диск становится сверхкритическим. По мере продвижения вещества в диске к черной дыре (“проседания”) – например, за счет вязкости в веществе – выделяется все больше и больше потенциальной энергии. Если изначальный темп аккреции в диске выше предела Эддингтона, то на некотором расстоянии от дыры (радиус сферизации диска) реализуется предел Эддингтона. Дальше вещество уже не может свободно “проседать” в диске, оно выбрасывается наружу из него за счет светового давления. Между черной дырой и радиусом

Компьютерная модель объекта SS 433. Изображена звезда-«донор» и два «ветровых» канала. По оси диска распространяются релятивистские струи. Наблюдатель смотрит на систему с правой стороны. Ветер сверхкритического диска показан черными точками, красным – фотосфера ветра (как ее «видит» наблюдатель справа). Модель рассчитана П. Медведевым (ИКИ РАН).



сферизации диска возникает сверхкритический режим аккреции. Выброшенный из диска газ вылетает в виде мощного ветра. Скорость ветра зависит от того же начального темпа аккреции, но вблизи черной дыры она достигает почти скорости света. Мало того, формируется ветровой канал (или конус), его ось совпадает с осью диска, а вершина конуса – с черной дырой. Например, в SS 433 размер канала (только его непрозрачной части) равен расстоянию от Солнца до Меркурия. Этот канал работает как прожектор, он геометрически коллимирует рентгеновское излучение сверхкритического диска. Если наблюдатель заглянет «в канал» – он будет во много раз более яркий, чем сверхкритический диск.

Мы были очень вдохновлены идеей Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева. Задолго до открытия ULX уже было ясно, что SS 433 – это сверхкритический диск; пусть даже он один в нашей Галактике, но, скорее всего, не один во Вселенной! Тогда было не очень ясно, как такие объекты могут выглядеть; впрочем, и параметры SS 433 в то время были малоизвестны (Земля и Вселенная, 1980, № 4). Как часто оказывается, открытие ULX привело астрофизиков в замешательство. Еще более необычным стало обнаружение итальянским астрофизиком Ф. Чиатти в 1978 г. самого объекта SS 433.

ОБЪЕКТ SS 433

Эта двойная система с массивной звездой-«донором» и черной дырой оказалась массой около $10 M_{\odot}$. Самым необычным открытием стали ее оптические спектры: три системы линий водорода и гелия, одна – «стационарная» (как потом выяснилось, это и есть сверхкритический диск). Две другие системы линий «разъезжались» по спектру в разные стороны: одна удалялась со скоростью 50 000 км/с, вторая приближалась со скоростью 35 000 км/с. Как может одна и та же звезда двигаться в разные стороны с такими немислимыми скоростями, да еще и «стоять» на месте?

Как потом выяснилось, ими оказались две релятивистские струи. Аккреционный диск и его струи прецессируют с периодом в 162 дня, поэтому линии движутся (сдвигаются) по спектру за счет эффекта Доплера. Очень узкие релятивистские струи диаметром всего 1° были обнаружены не только в оптическом диапазоне, но еще и в рентгеновском; их настоящая скорость равнялась четверти скорости света.

Даже после того, как разобрались со струями и их геометрией и была найдена кинематическая модель струй, осталось непонятным — как такое могло произойти (Земля и Вселенная, 1986, № 1; 1991, № 4)? И вдруг появилось волшебное слово “сверхкритический диск”. Все встало на свои места. Конечно, многое надо было еще обнаружить и изучить, но это уже можно назвать технической работой. В тесной системе SS 433 от звезды-“донора” на внешний край аккреционного диска перетекает колоссальный объем вещества, буквально “затапливая” черную дыру. Темп аккреции, выраженный в эддингтоновских темпах аккреции для SS 433 (дыра массой $10 M_\odot$), составляет примерно 500 в безразмерных единицах. Ближе к черной дыре светимость диска

становится эддингтоновской (диск сферизуется); почти весь газ, изначально поступавший на внешний край диска, выбрасывается из внутренних частей диска со скоростью около 1000 км/с . Попадает в дыру такое количество вещества, которое равно пределу Эддингтона — но на самом деле немного больше, за счет специфических эффектов в аккреционных дисках. Газ ускоряется и вылетает за счет светового давления очень яркого диска, излучающего на пределе Эддингтона. Этот газ, названный “ветром”, полностью покидает диск и двойную систему. Место размером около $20 R_\odot$, где мы “видим” раскаленный до $5\text{--}7 \times 10^4 \text{ К}$ ветер сверхкритического диска, называется “фотосферой ветра”.

Размер фотосферы ветра настолько большой, что ветер из сверхкритического диска вполне имитирует горячий сверхгигант; получается, что мы видим две горячие звезды — фотосферу ветра и звезду-“донор”. По оси сверхкритического диска формируется ветровой канал такого же размера, как и фотосфера ветра. Это можно сравнить с арбузом, с двух сторон которого по оси вырезали два конуса, и вершины конусов сходятся в центре: там “прячется” черная

дыра. Поверхность “арбуза” — горячая фотосфера ветра, из внутренней поверхности двух вырезанных конусов (полный раствор каждого — примерно 100°) выходит рентгеновское излучение: по оси конусов-каналов вылетают релятивистские струи.

В SS 433 мы не видим конусов (так как не можем заглянуть в центр канала, чтобы рассмотреть черную дыру) и даже не можем увидеть внутренние части канала — такова ориентация SS 433 со стороны наблюдателя. Мы смотрим на этот объект “сбоку”, и ось двух каналов расположена для нас примерно в картинной плоскости. Струи и канал покачиваются (прецессируют) в обе стороны на угол 20° . Когда мы немного глубже “заглядываем” в канал, то SS 433 становится в несколько раз ярче в рентгеновском диапазоне, но все равно мы замечаем только краешек канала. Что бы было, если бы мы увидели весь канал — тогда бы перед нами появился ULX!

ЕЩЕ
О СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ
АККРЕЦИИ

При падении материи на черную дыру в виде рентгеновских лучей излучается огромное количество световой энергии (примерно 10% от массы

покоя вещества $M \times c^2$). Самый яркий объект в системе SS 433 – сверхкритический диск; вторая звезда-“донор” малозаметна на фоне диска. Но диск наблюдается не в рентгеновских лучах, а в ультрафиолетовых. Такая же ситуация наблюдается в любой звезде (например, на Солнце). При термоядерных реакциях, за счет которых “живет” Солнце, выделяются рентгеновские и гамма-лучи, но светит наше Солнце в приятном для глаз оптическом диапазоне. Сверхкритический диск также изначально вырабатывает рентгеновское излучение, но оно не может быстро покинуть эту систему. Оказываясь в непрозрачной среде, излучение запутывается и многократно рассеивается, первичное рентгеновское излучение термализуется (температура излучения станет примерно равной температуре газа). В недрах Солнца первичный квант выходит наружу через миллионы лет, в сверхкритическом диске – всего за несколько минут. Скорее всего, основная часть энергии сразу выходит из канала без термализации. В SS 433 мы канала не видим из-за его ориентации: “заглянуть” в него и “увидеть” сам сверхкритический диск с черной дырой мы не можем, поэтому мы “видим”

только термализованное излучение.

Рентгеновский источник SS 433 выделяет микроскопическую часть светимости от своей полной энергии. В рентгеновских лучах мы наблюдаем только его вылетающие релятивистские струи, раскаленные до рентгеновских температур (десятки миллионов градусов), очень быстро остывающие (всего за две минуты). Мы видим также внешний ободок канала, который отражает излучение внутренних частей канала с черной дырой. Почему SS 433 и ULX очень схожи? В рентгеновском диапазоне это – совершенно разные объекты. Все зависит от ориентации, от того – с какой стороны посмотреть на сверхкритический диск.

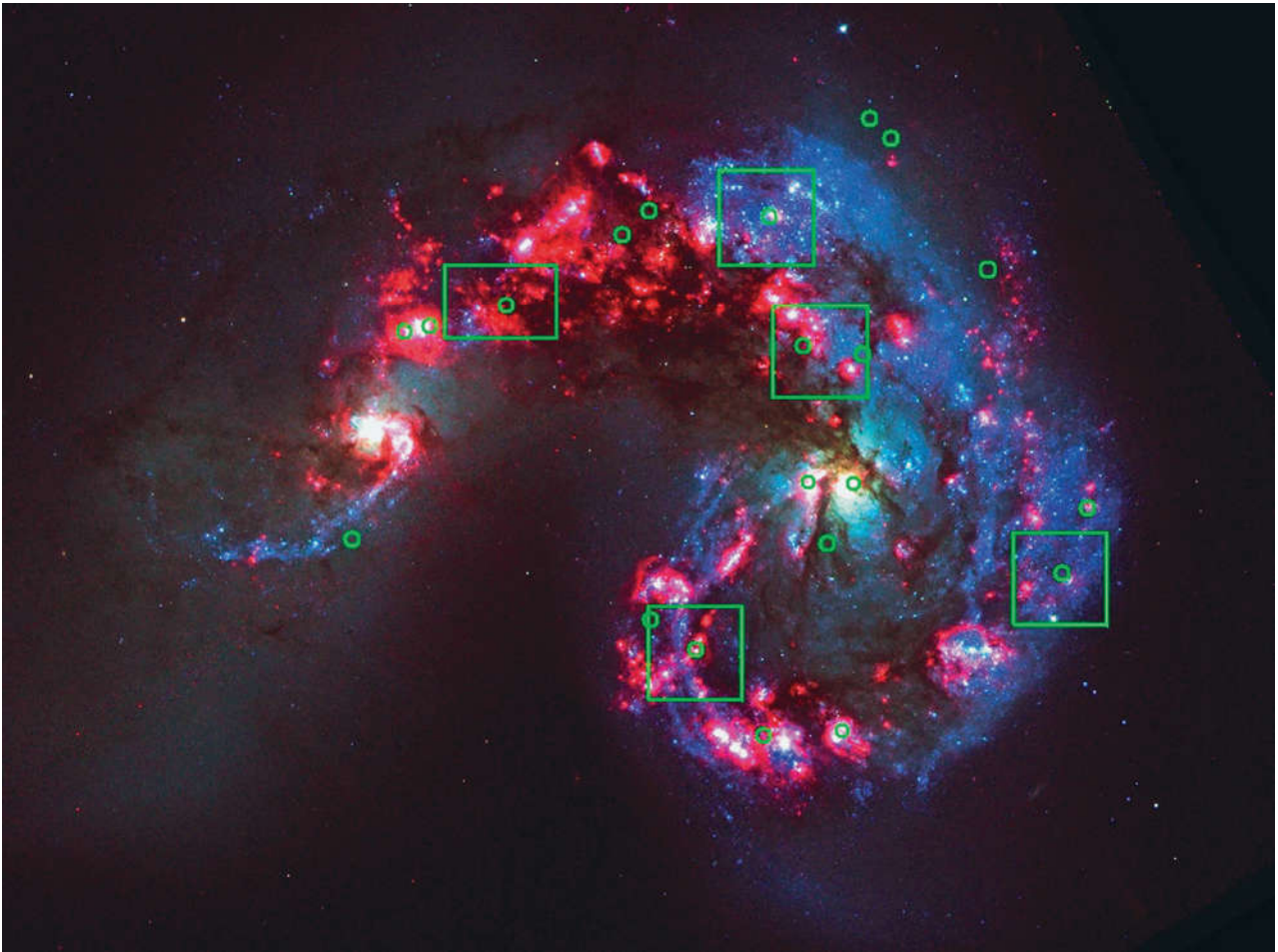
ДВЕ МОДЕЛИ ULX

Мы описали две модели, предложенные для ULX, – это черные дыры средних масс (IMBH), массой в сотни и тысячи масс Солнца. Рентгеновская светимость объектов не превосходит предел Эддингтона; их можно рассматривать как стандартный “диск Шакуры–Сюняева”, который был описан выше. По второму сценарию – это сверхкритические диски, то есть черные дыры звездных масс от $5 M_{\odot}$ до $30 M_{\odot}$. В обоих сценариях черные дыры

должны быть в двойной системе: не в обычной, а в такой, где звезда-“донор” находится на критической стадии эволюции, для того, чтобы обеспечить большой поток массы и, соответственно, огромную рентгеновскую светимость.

Недавно стало ясно, что IMBH могут образовываться в звездных скоплениях. В отличие от звезд “Населения III”, которые сформировались в незапамятные времена, весьма маловероятно, что IMBH из “Населения III” смогут “захватить” массивную звезду, возраст которой всего несколько миллионов лет. В молодых скоплениях звезд могут образовываться собственные IMBH, а массивных звезд там предостаточно.

Когда формируется скопление звезд, то в первые несколько миллионов лет наиболее массивные звезды “опускаются” в центр. При этом в самом центре, размером не более 0,2 пк, собирается несколько сотен массивных звезд. Далее, в результате трех-четырёхкратных столкновений (не прямых, но тесных сближений) массивные звезды выбрасываются из скопления. Молодое скопление может потерять до половины (и даже больше) своих массивных звезд! При этих столкновениях появляются (“лепятся”)

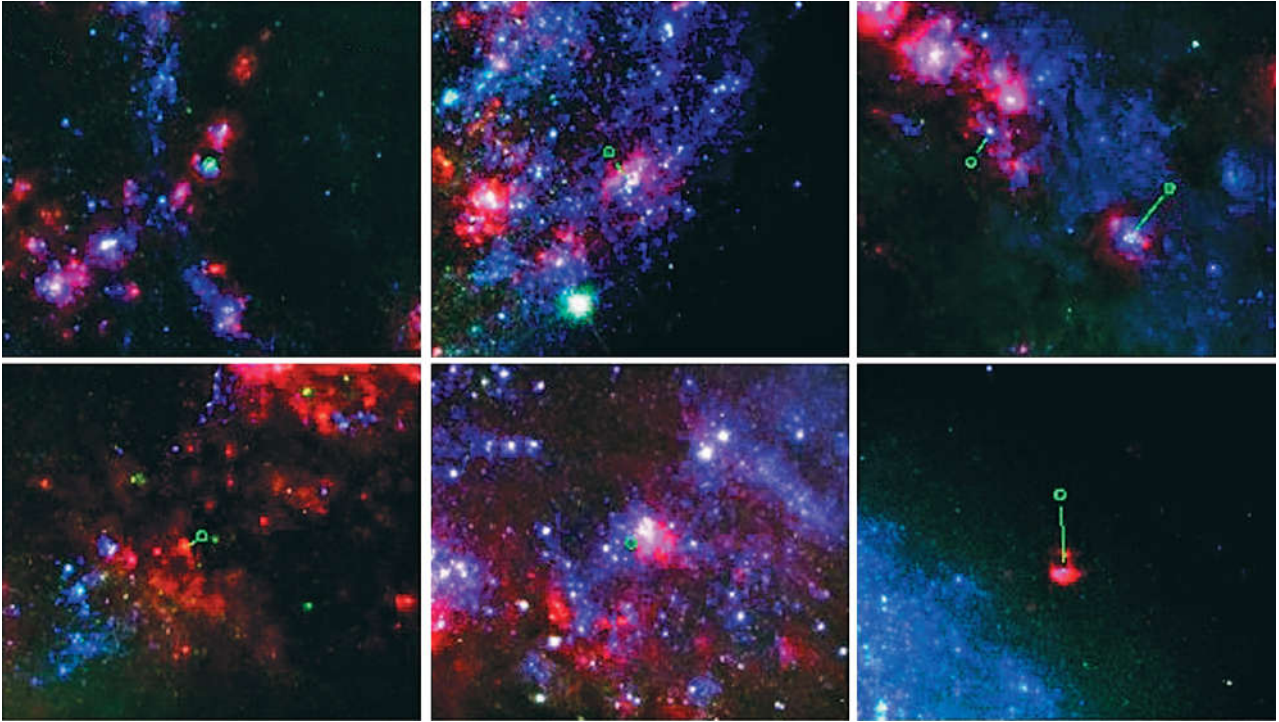


Галактика Антенны – это взаимодействующие галактики NGC 4038 и NGC 4039 (расстояние 60 млн св. лет). Красным цветом показано излучение газа в линии водорода H_{α} , голубым – молодые массивные звезды, коричневым – пыль в этих галактиках, из которой со временем появятся массивные звезды; два ярких белых пятна – ядра сливающихся галактик; яркие голубые точки – молодые скопления звезд; зеленые кружки – рентгеновские источники. Пять зеленых прямоугольников – это области панорамных спектров, полученных 8-м телескопом VLT Европейской Южной Обсерватории (Чили). Изображение получено Космическим телескопом им. Хаббла. Фото NASA.

и выбрасываются, как правило, тесные двойные звезды. А вот самая массивная звезда (ее называют очень массивная звезда; Very Massive Star, VMS) остается в скоплении; она набирает все больше массы за счет газа от пролетающих рядом звезд и даже за счет прямых столкновений. Эта звезда эволюционирует в течение всего 1–2 млн лет и превращается в ИМВН. Итак, при формировании молодого скопления звезд в центре может оказаться ИМВН, а вокруг скопления будут разбросаны массивные звезды.

Много ULX найдено в галактиках Антенны

(NGC 4038 и NGC 4039, расстояние 60 млн св. лет), а также в галактике NGC 3256 (расстояние 100 млн св. лет); в них наблюдается достаточно молодых и массивных скоплений. Это – взаимодействующие, или сливающиеся галактики; у них даже хорошо различаются два ядра. Идет интенсивное звездообразование: в десятки раз превышающее темпы, чем в таких массивных галактиках, как наш Млечный Путь или Туманность Андромеды. Звездообразование прямо связано с количеством массивных звезд, а также рентгеновских источников и ULX. Пол-



ной неожиданностью стало обнаружение всех ULX в этих галактиках рядом с молодыми скоплениями возрастом менее 5 млн лет – не внутри скоплений, а именно рядом, на расстояниях до 200 пк (650 св. лет). Открытие было сделано нами совместно с финским астрофизиком Ю. Поутаненом. Вероятность того, что ULX не связаны со скоплениями, оказалась ничтожно малой – следовательно, они принадлежат к молодым скоплениям. Если это – IMBH, то такие черные дыры должны оставаться в скоплениях, поскольку они очень массивные и вылететь из скопления не смогут. Следовательно, ULX – это вылетевшие из скоплений двойные системы.

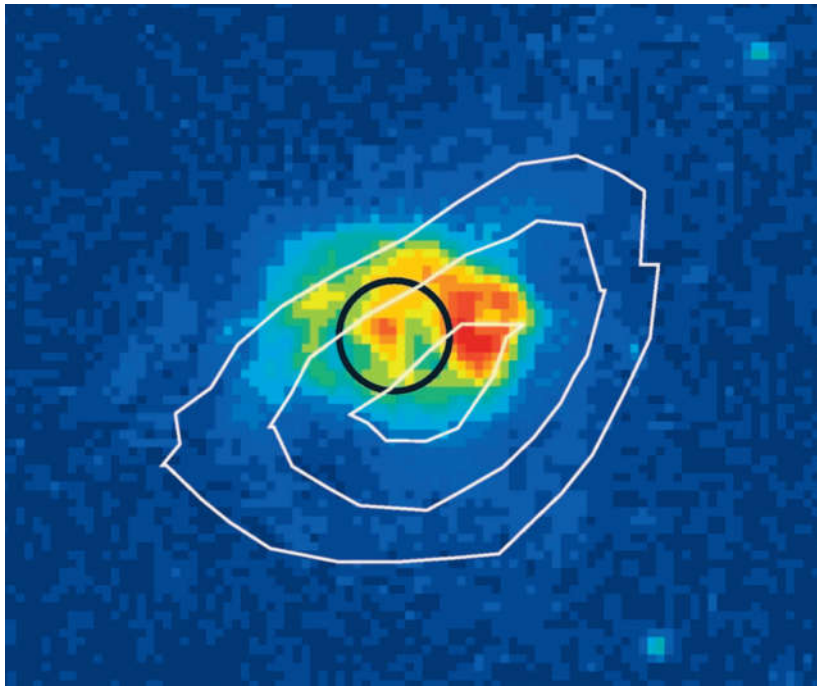
Если оценивать скопления в этих галактиках

по возрасту эволюции звезд, то ULX должны иметь массы около $100 M_{\odot}$, поскольку звезда такой массы эволюционирует примерно 3 млн лет. ULX могли родиться как две звезды массой 50–100 M_{\odot} . Если среднее расстояние между ULX и скоплением разделить на время эволюции скопления, то получается, что ULX выбрасываются из скоплений со скоростью около 80 км/с. Это – одно из верных доказательств того, что объекты ULX не есть IMBH; они должны быть сверхкритическими аккреционными дисками с черными дырами звездных масс.

Рентгеновские спектры ULX совсем не похожи на “ступенные” спектры обычных рентгеновских источников с черными дырами – они

Области в галактиках Антенны с молодыми скоплениями, рядом с которыми находятся рентгеновские источники ULX (зеленые кружки; черточками того же цвета показано направление на скопление). Объекты ULX, как правило, были “выброшены” из скоплений. Голубым показаны массивные звезды, рожденные в скоплениях; их родные скопления уже распались. Изображение получено Космическим телескопом им. Хаббла. Фото NASA.

“двугорбые”. Один “горб” в спектре напоминает стандартный диск (что похоже на рентгеновские источники), но в этом диске как будто “вырезали” внутреннюю часть – окружающую черную дыру – или чем-то ее “закрыли”. Второй “горб” очень похож на комптонизированное



Туманность, принадлежащая ULX в галактике NGC 6946 (расстояние 18 млн св. лет). Примерно в центре черного круга (координаты рентгеновского источника) находится красная звезда 23^m – это оптический двойник ULX. Белыми контурами отмечено положение радиотуманности, образовавшейся, вероятно, за счет мощных струй от ULX. Красным цветом показано свечение в линиях водорода H_α и серы, желтым – в линиях кислорода. Изображение создано П. Аболмасовым (САО РАН) по данным Космического телескопа им. Хаббла. Фото NASA.

излучение, когда электрон сталкивается с фотоном и при этом фотон приобретает энергию, а электрон теряет. В таком случае электрон должен быть достаточно “горячим”: то есть иметь энергию выше определенного порога. Это совсем не похоже на стандартный “диск Шакуры–Сюняева”. Внутренняя часть диска чем-то закрыта, – видимо, “шапкой” из этих же “горячих” электронов: они перерабатывают излучение закрытых внутренних частей (комptonизируют) в более высокие энергии – во второй “горб”. Рентгеновские спектры не могут быть надежным доказательством сверх-эддингтоновской аккреции в ULX; это не более чем красивая модель.

Как правило, вокруг ULX мы видим туманности – газовые

образования, связанные с ULX. На российском телескопе БТА САО РАН мы наблюдали туманности, окружающие ULX. Оказалось, что они не только связаны с ULX, но и образовались и светят за счет этих объектов. В них происходят динамические процессы: газ туманностей разлетается со скоростями (у каждого ULX по-разному) от 20 до 500 км/с. Такое может произойти за счет струй или мощных ветров, которые выбрасывают ULX; то есть это – сверхкритические аккреционные диски.

Туманности, связанные с ULX, обнаружены в галактиках NGC 6946, Holmberg II, Holmberg IX, а также в нашей Галактике, где мы видим радиотуманность W50, окружающую объект SS 433. Туманность в галактике NGC 6946 (расстояние 18 млн св. лет) – одна

из самых компактных, ее размер равен 50 пк (150 св. лет). В ней мы видим характерные круги, образованные за счет струй и сильных ветров, истекающих по оси аккреционного диска. Туманность в галактике Holmberg II – более крупная, ее размер составляет примерно 100–120 пк (более 320 св. года). Одна из самых больших туманностей, непосредственно связанная с ULX, находится в галактике Holmberg IX размером 300 пк (около 1000 св. лет). Туманность W 50, которая окружает SS 433, лучше всего видна в радиодиапазоне; ее трудно различить в оптическом свете из-за огромного межзвездного поглощения – 8^m . У всех этих туманностей (как у ULX, так и у SS 433) видны круги или спирали, что характерно для струйных выбросов.

В карликовой пекулярной галактике *Holmberg II* (расстояние около 10 млн св. лет) находится оптический двойник ULX, расположенный рядом со скоплением горячих массивных звезд. Он окружен яркой подковообразной туманностью (слева) размером 100–120 пк, которая светит в линии H_{α} (красный цвет). Изображение создано А. Винокуровым (САО РАН) по данным Космического телескопа им. Хаббла. Фото NASA.

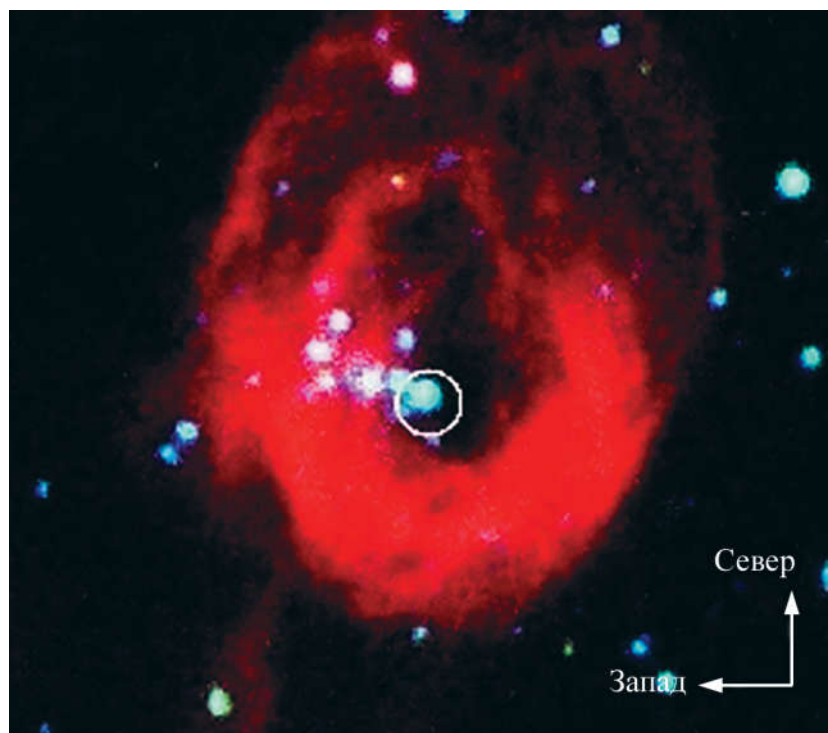


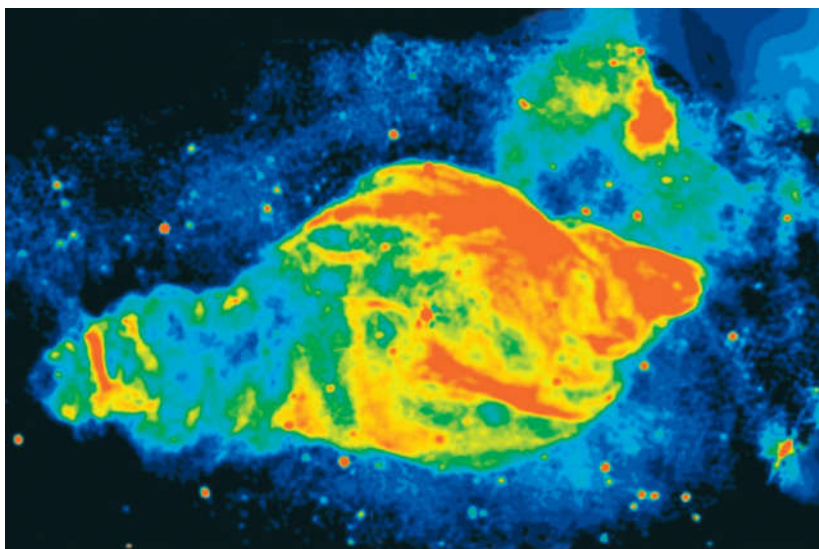
Когда космическая обсерватория “Чандра” выполнила довольно много наблюдений близких галактик с рентгеновскими источниками, то астрофизики начали строить рентгеновские функции светимости. Функция светимости – это зависимость светимости объекта (в данном случае рентгеновская) от

количества объектов данного типа. Первым по результатам “Чандры” рентгеновские функции светимости начал строить доктор физико-математических наук М.Р. Гильфанов (ИКИ РАН) с соавторами. Оказалось, что количество рентгеновских источников с массивными звездами находится в прямой

пропорции с темпом звездообразования в галактиках. Это даже не зависит от массы галактики: чем больше “масс Солнца в год” производит галактика – тем больше там массивных звезд (и, соответственно, рентгеновских источников с массивными звездами). Рентгеновские функции светимости прямо

Оптический двойник ULX в карликовой неправильной галактике *Holmberg IX* (расстояние 12 млн св. лет) находится внутри рентгеновского “кружка ошибок”. С ним связана одна из самых больших туманностей размером 300×500 пк. Красным цветом показано излучение в линии водорода H_{α} . Снимок получен М. Пакуллем (Франция) на 8,2-м телескопе “Subaru” Национальной астрономической обсерватории Японии (Гавайи).





Радиотуманность W50 размером около 120 пк (расстояние 18 тыс. св. лет); точка в самом центре круга – объект SS 433. Туманность W50 похожа на “ракушку”, по бокам которой распространяются и тормозятся релятивистские струи; в результате там возникает очень мощное радиоизлучение (более яркие области показаны красным). Изображение получено радиотелескопом NRAO (Грин-Бэнк, США).

связаны с ULX: там где заканчиваются рентгеновские источники (самые яркие из них выделяют энергию примерно 10^{39} эрг/с), появляются ULX со светимостью от 10^{39} до 10^{41} эрг/с.

Рентгеновские функции светимости, необычные рентгеновские спектры, существование ULX-туманностей, окружающих ULX, с выбросами вещества – все это свидетельства сверхкритической аккреции; у черных дыр средних масс (IMBH) такого быть не должно. Однако все эти свидетельства – косвенные. Главное доказательство было получено с помощью оптической спектроскопии, ведь это самый информативный метод в астрофизике.

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ULX

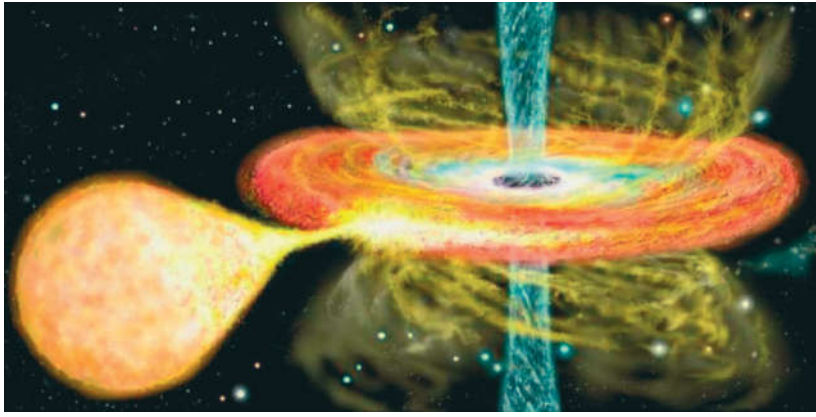
Получение оптического спектра ULX – очень сложная задача; она может быть выполнена только с помощью круп-

ных телескопов и при очень хороших погодных условиях. Самые яркие в оптическом диапазоне ULX (то есть те, которые находятся в близких галактиках) – это объекты 22^m . В более далеких галактиках они еще слабее. За всю 15-летнюю историю изучения ULX оптические спектры были получены только для 10 (!) таких объектов. Спектры четырех ULX были сняты на 8-м телескопе “Subaru” (Гавайи), один – на 10-м телескопе Кеэк (Гавайи), три – на 8-м телескопе VLT (Чили) и два – на 6-м телескопе БТА.

Спектры всех 10 объектов ULX (как и SS 433) оказались очень схожими. Только в спектре одного ULX найдены релятивистские линии, подобные SS 433. В спектрах других ULX релятивистских линий найдено не было; но “стационарный” спектр сверхкритического диска (как в SS 433) – такой же, как у всех ULX. Получается,

что это – однородный класс объектов? Это действительно так, поскольку Вселенная однородна: наша Земля, Солнце и Галактика ничем не выделяются во Вселенной. Мы случайно “попадаем” на ближайшие к нам ULX. Еще один вывод, который можно сделать благодаря оптической спектроскопии: ULX – это сверхкритические диски!

Тип спектра ULX очень редкий; он наблюдается у ярких голубых переменных звезд (Luminous Blue Variables, LBV), но только находящихся в “горячей фазе”. Звезды LBV обладают массой более $50-60 M_{\odot}$, их эволюция длится всего несколько миллионов лет. Возможно, все массивные звезды проходят стадию LBV. На этой же стадии вполне может произойти взрыв звезды, то есть мы увидим Сверхновую. Она может появиться немного позднее, когда звезда LBV превратится



Так художник представляет черную дыру в двойной системе. В центре аккреционного диска – внутренние его части, излучающие в рентгеновском диапазоне; в середине диска – излучение в линии ионизованного He II; во внешних – в линии водорода (показано красным). Со звезды-“донора” (звезды-“компаньона”) тонкой струей вытекает вещество на край аккреционного диска. По оси диска выбрасываются две струи; из диска дует ветер (показан в виде струй желтого цвета). Рисунок.

в звезду Вольфа – Райе (WR; Земля и Вселенная, 1994, № 2). Эта проблема – превращаются ли звезды LBV в звезды WR – сейчас активно обсуждается. Здесь важно выяснить, почему спектр ULX и SS 433 очень похожи на спектр LBV-звезд в их “горячей фазе”.

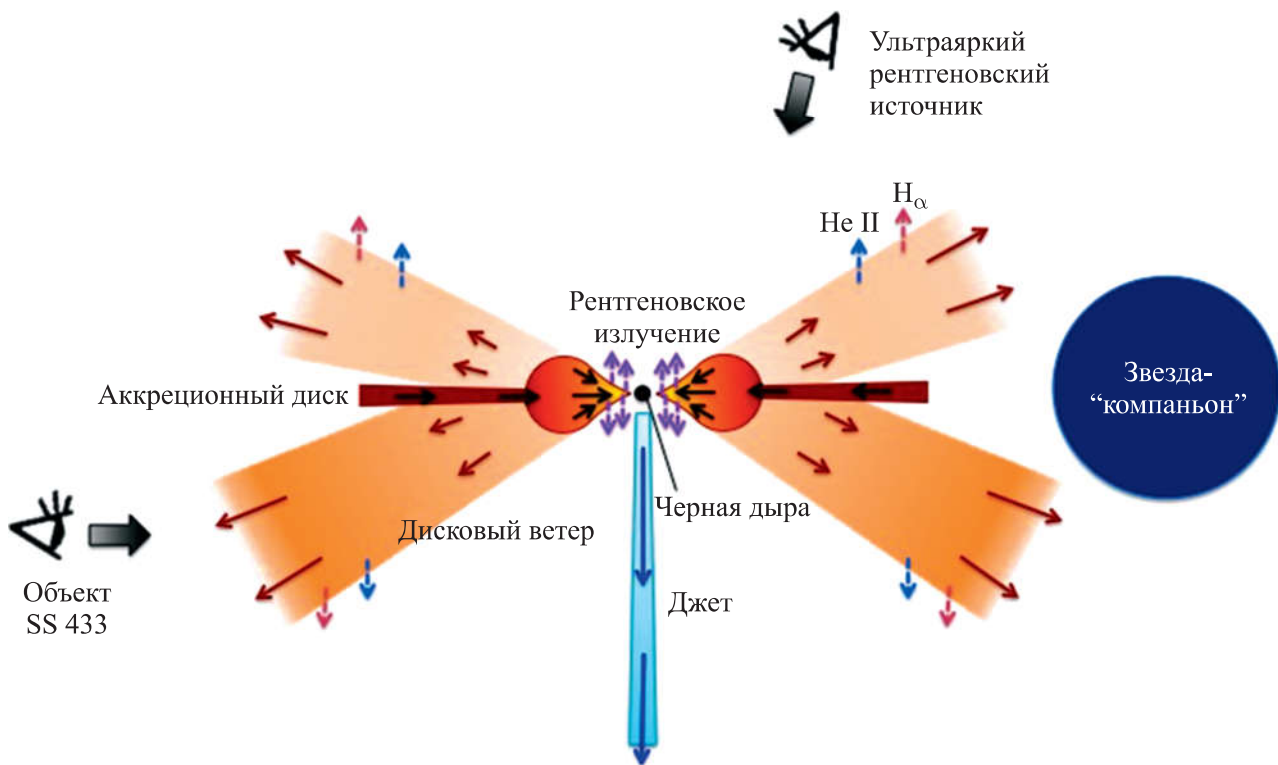
Когда массивная звезда проходит стадию LBV, то ее атмосфера неустойчива: звезда расширяется в несколько десятков раз, при этом она становится холоднее, ее атмосфера остывает примерно до 8000 К (“холодная фаза”). Потом, через месяцы или годы, звезда сжимается – вероятно, приходит в свое нормальное состояние, достигнув температуры примерно 45 000 К (“горячая фаза”). Астрофизики пока не

могут объяснить причину такой переменности, однако идеи есть. Спектры ULX и SS 433 похожи на спектры LBV в их “горячей фазе” потому, что во всех этих объектах фиксируем горячий ветер. Это может быть ветер от сверхкритического диска (SS 433), а может быть и ветер от горячей звезды (LBV); скорость ветра у всех этих объектов – 1000–2000 км/с.

Оказалось, что примерно такой же тип спектра наблюдается и у рентгеновских транзиентных источников (Земля и Вселенная, 2010, № 3). В нашей Галактике известно несколько рентгеновских транзиентов: это – тесные двойные системы с черной дырой. Когда в звезде-“доноре” постепенно увеличива-

ется темп аккреции в диске (причины этого известны) при этом возникает неустойчивость, резко увеличивается темп аккреции на черную дыру. Мы видим рентгеновский транзиент – за короткое время поток рентгеновского излучения возрастает в тысячи и даже миллионы раз. Вращающееся вещество – аккреционный диск – “проседает” приближаясь к черной дыре, высвобождается огромное количество потенциальной энергии. Рентгеновское излучение возникает вблизи черной дыры, обжигая свой же аккреционный диск. При этом появляется ветер из диска – виден характерный оптический спектр, похожий на ULX.

В спектрах ультраярких рентгеновских источников и транзиентов, ярких голубых переменных и SS 433 мы видим линии самых распространенных элементов во Вселенной – водорода и ионизованного гелия. Линии ионизованного гелия в спектрах рентгеновских транзиентов имеют дисперсию скоростей больше, чем линии водорода; это связано с эффектом Доплера: газ в аккреционном диске вращается. Чем ближе к черной дыре – тем с большей скоростью в диске вращается газ, тем больше дисперсия скоростей. Линии



Модель ультраяркого рентгеновского источника (сверху) и объекта SS 433 (снизу). В обоих случаях это – тесная двойная система с черной дырой, сверхкритическим аккреционным диском и звездой-“донором” (справа). Из-за ориентации в пространстве мы наблюдаем SS 433 “сбоку”, поэтому заметны только релятивистская струя и очень мощный ветер. Рентгеновское излучение от SS 433 намного слабее, чем в случае с ULX (там мы “видим” канал в сверхкритическом диске). Рисунок М. Шидатсу (Университет Киото).

гелия образуются в более горячем газе – ближе к черной дыре, линии водорода – в более холодном (значит – дальше от дыры).

В сверхкритическом диске (а также в звездах LBV и SS 433) ситуация обратная: здесь

линии водорода указывают на большую дисперсию скоростей, чем линии гелия. Это классический пример для всех горячих звезд с ветрами: линии гелия формируются ближе к фотосфере звезды (или сверхкритического диска), они еще не успели набрать достаточной скорости. В областях, дальше от фотосферы – где тот же самый газ ускоряется сильнее и уже охлаждается, формируются линии водорода. В рентгеновских транзиентах мы непосредственно “видим” вырывающийся из диска ветер; в сверхкритических дисках сам диск не виден, так как полностью закрыт газом. В ULX (как в LBV и SS 433) мы “видим” очень плотный ветер, который распространяется на большие расстояния.

Различия моделей SS 433 и ULX состоят в следующем: в SS 433, как и в ULX, мы не “видим” аккреционного диска, поскольку ветер очень мощный, он полностью его покрывает; но в SS 433 ветер еще более плотный, чем в ULX. Конечно, в отличие от SS 433, из-за удобной для нас ориентации ULX, мы полностью “видим” канал сверхкритического диска, черную дыру и все исходящее от объекта рентгеновское излучение. Такая модель отличается от модели рентгеновских транзиентов (диска с черной дырой): там “видна” вся поверхность аккреционного диска. В сверхкритических дисках мы наблюдаем только ветер, формируются линии ионизованного гелия (He II)

и линии водорода (например, H_{α}).

К настоящему времени получено достаточно доказательств того, что ULX – это сверх-эддингтоновские диски в двойных системах с черной дырой; это – черные дыры обычных звездных масс, находящиеся в тесных двойных системах. Как были предсказаны такие объекты на основе SS 433 – так их и открыли. Немного времени прошло с момента их предсказания.

И вдруг, в 2014 г., в близкой галактике M82 (NGC 3034 в Большой Медведице) с уже известными ULX с помощью новой космической обсерватории “NuSTAR” (Земля и Вселенная, 2012, № 6, с. 35) был открыт ультраяркий рентгеновский пульсар. Период его вращения – 1,37 с. Когда проверили все остальные хорошо известные ULX (их около 15), то выяснилось, что они не пульсируют; значит, остальные ULX – все-таки черные дыры?

Проверили еще несколько ULX. В конце сентября 2016 г. обнаружили еще один ультраяркий пульсар с периодом вращения 0,42 с, причем оптический спектр этого ULX-пульсара был получен ранее: это – один из 10 ULX. Этот второй пульсар был обнаружен в галактике NGC 7393 в созвездии Водолея, расположенной на Южном небе. Через три дня после открытия второго

ультраяркого пульсара был открыт третий, еще более яркий. Период третьего пульсара оказался равным 1,43 с. Используя более старые данные космических обсерваторий, выяснилось, что за 10 последних лет наблюдений этот пульсар “ускорился” (от 1,43 с до 1,1 с). Это какое количество массы должно было упасть на нейтронную звезду, чтобы ускорить ее вращение всего за 10 лет? Третий пульсар назвали “гиперярким”. Это – чудесные открытия!

Нейтронная звезда тоже может обладать сверхкритической аккрецией, здесь неважно, что это за объект; главное – сколько на него падает вещества. Тем не менее, в отличие от черной дыры, куда вещество “проваливается”, унося с собой всю свою энергию – как тепловую, так и энергию излучения, в нейтронной звезде все остается на поверхности. На фотосфере нейтронной звезды энергия вещества обязательно “высветится”. Однако в случае нейтронной звезды есть больше сценариев и моделей; появились хорошие модели: например, рентгеновский пульсар со сверхсильным магнитным полем (магнетар; Земля и Вселенная, 2005, № 6). Другая модель еще более красивая: это тоже нейтронная звезда с сильным магнитным полем, но она работает в режиме “про-

пеллера”: в аккреционном диске вещество вращается вокруг нейтронной звезды; “подходя” ближе к ней, мощное магнитное поле пульсара “ломает” аккреционный диск и разбрасывает газ диска на большие расстояния.

Исследования сверхкритической дисковой аккреции только начнутся. Особенно эффективно сейчас развиваются работы в области моделирования таких дисков в связи с быстрым развитием компьютеров. Если раньше мы знали только про SS 433, то недавно выяснили, что объекты ULX также имеют сверхкритические диски. Сейчас мы уже знаем, что быстрый рост квазаров – накопление массы сверхмассивной черной дыры – невозможен без сверхкритической аккреции. Менее чем за миллиард лет после рождения Вселенной квазары уже накопили массу около $10^9 M_{\odot}$. Это открытие также оказалось неожиданным для астрофизиков. Действительно, самые ранние квазары обнаружены через 600 млн лет после рождения Вселенной, их массы такого же порядка – более миллиарда масс Солнца! Даже “работая” почти на пределе Эддингтона, квазары не смогли бы “нарастить” такую массу; здесь нужны существенно сверхкритические темпы аккреции.

Российский ученый удостоен медали КОСПАР

В августе 2016 г. вице-президент РАН, председатель Научного совета по физике Солнечной системы, член Совета РАН по космосу, директор ИКИ РАН академик Л.М. Зелёный решением Международного комитета по исследованию космического пространства (КОСПАР/COSPAR) был награжден за выдающийся вклад в космические исследования и деятельность, значительно способствовавшую развитию международного научного сотрудничества. В приветственном адресе Президент КОСПАР профессор Л.А. Фиск отметил, что Лев Матвеевич Зелёный является признанным лидером в мировой космической науке в области солнечно-земной физики. Он начал свою научную карьеру в качестве теоретика в области физики плазмы, получив важные результаты для понимания разрывной неустойчивости и процессов пересоединения. Вся его профессиональная жизнь связана с Институтом космических исследований АН СССР – в 1970–1980-х гг. одного из немногих центров международного сотрудничества в Советском Союзе.

В качестве теоретика Л.М. Зелёный сотрудничал с различными научными

группами по всему миру, в том числе с учеными Калифорнийского университета и Института солнечно-земной физики Общества им. Макса Планка (Германия), где он работал в группе моделирования физических процессов в космосе. Результатом совместных работ стали несколько десятков международных публикаций, посвященных различным аспектам физики плазмы и физики космоса. После основания Международного института космических исследований (ISSI; Берн, Швейцария) Л.М. Зелёный активно участвовал в различных проектах в составе группы ученых в качестве члена Научного комитета и Попечительского совета. Во многом благодаря его усилиям российские ученые стали активными участниками международных коллективов ISSI.

Начиная с 2003 г., Л.М. Зелёный возглавляет совместную российско-французскую лабораторию “Геоплазма”, итогом работы которой стали более 60 совместных публикаций. В 2006–2014 гг. Л.М. Зелёный входил в Бюро КОСПАР, координировал работу многочисленных сессий по основным разделам магнитосферной физики. Он был одним из организаторов 40-й Научной ассамблеи КОСПАР в Москве в 2014 г. (Земля и Вселенная, 2015, № 1). Л.М. Зелёный был научным руководителем весьма успешного проекта “Интербол” (1995–2001) по изучению взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром, в котором сотрудничали ученые из 18 стран,



ставшего частью Международной программы по солнечно-земной физике (Земля и Вселенная, 1997, № 3). В настоящее время Л.М. Зелёный руководит приемником “Интербола” – проектом “Резонанс”; в его ходе будет изучаться взаимодействие волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли. Он также руководит российской лунной программой на 2016–2025 гг. и российской частью программы “ЭкзоМарс” (Роскосмос, ESA) по исследованию Марса в 2016–2022 гг. (Земля и Вселенная, 2016, № 3). Вклад Льва Матвеевича в международное сотрудничество в космосе признан во всем мире. Л.М. Зелёного избрали иностранным членом Болгарской и Украинской академий наук, наградили офицерским крестом за заслуги в установлении научных контактов между Россией и Польшей и медалью “За достижения в области космической науки”.

Редколлегия и редакция журнала “Земля и Вселенная” поздравляют Льва Матвеевича Зелёного с заслуженной высокой наградой.

“Ферми” открыла редкую гамма-двойную

Используя данные космической гамма-обсерватории “Ферми” (“Fermi”; Земля и Вселенная, 2008, № 5, с. 58; 2015, № 3), международная группа ученых обнаружила первую в другой галактике самую удаленную и мощную гамма-двойную систему LMC P3. Она находится в расширяющемся раскаленном газовом облаке, образовавшемся от взрыва сверхновой DEM L241, вспыхнувшей в карликовой галактике Большое Магелланово Облако (созвездие Золотой Рыбы) в 163 тыс. св. лет от нас. Система LMC P3 является самой яркой из бинарных систем излучающих в гамма-, рентгеновском, радио- и видимом диапазонах из всех обнаруженных на данный момент. В структуру LMC P3 входят звезда массой 25–40 M_{\odot} и оголенное ядро звезды-“компаньона”; температура оболочки ядра нагрета до 33000 К. При коллапсе звезды-“компаньона” ее верхние слои с огромной скоростью разлетелись, несколько тысяч лет назад образовав облако ионизованного водорода HII; после этого осталось оголенное ядро звезды. Оно, скорее всего, представляет собой нейтронную звезду радиусом 10–20 км и массой 2 M_{\odot} .

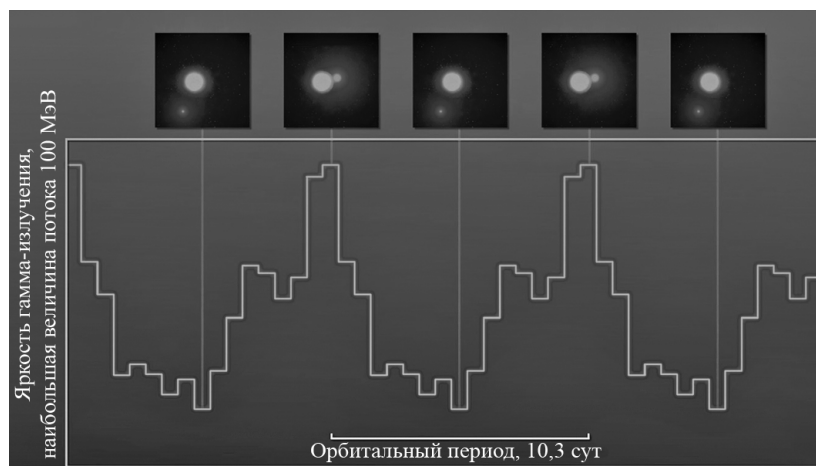


График зависимости всплесков гамма-излучения с амплитудой в 10,3 дня от положения на орбите нейтронной звезды при взаимодействии бинарной системы LMC P3 в Большом Магеллановом Облаке. Гамма-излучение максимально в момент приближения к нам нейтронной звезды (второе и четвертое положения), минимально — при ее удалении (первое, третье и пятое положения). По данным космической обсерватории “Ферми”, NASA.

В результате взаимодействия этой пары звезд возникает циклический поток гамма-лучей наибольшей энергии. Наблюдения с помощью 1,9-м телескопа Южно-африканской астрономической обсерватории показали, что скорость вращения массивной звезды меняется: она делает полный оборот вокруг нейтронной звезды за несколько десятков дней.

На основе нескольких снимков, полученных космической обсерваторией “Чандра” и 8,2-м телескопом VLT Европейской Южной обсерватории, а также данных обзоров неба MCELS и DSS, составлено изображение системы LMC P3 (см. стр. 2 обложки, вверху). На нем заметно ярко светящееся в рентгеновском диапазоне горячее облако ионизованного водорода HII.

Космическая обсерватория “Ферми”, начиная с 2008 г., обнаружила только 5 подобных двойных систем в нашей Галактике. Всплески гамма-излучения, идущие от них, значительно изменяются в процессе каждого из оборотов звезд. Это позволяет астрономам с уникальной точностью изучать многие процессы, характерные для других источников гамма-излучения.

В 2012 г. с помощью космической рентгеновской обсерватории “Чандра” (“Chandra”; Земля и Вселенная, 2000, № 4, с. 59–60) был замечен мощный источник рентгеновского излучения в соседней галактике Большое Магелланово Облако. Данные показали, что он находится на орбите горячей молодой звезды, массой во много раз превышающей по массе Солнце. Тогда исследователи пришли

к выводу, что компактный объект – это нейтронная звезда (или черная дыра) и классифицировали систему как рентгеновская двойная большой массы. В 2015 г. были зафиксированы 10,3-дневные циклические изменения гамма-излучения вблизи одного из нескольких точечных источников в Большом Магеллановом Облаке. Был ли он тем же объектом, что

зафиксировала “Чандра”? Для того, чтобы это выяснить, ученые провели наблюдения бинарной системы в рентгеновских лучах, в видимом и радиодиапазонах, которые отчетливо продемонстрировали такой же 10,3-дневный цикл выбросов гамма-лучей, подтвердив, что это “работает” система LMC P3.

До запуска “Ферми” гамма-двойные системы счита-

лись наиболее распространенными во Вселенной, на самом же деле их чрезвычайно мало. Ученые связывают это с тем, что обнаруженные телескопом гамма-бинарные системы содержат редкий тип нейтронных звезд с исключительно быстрой скоростью вращения.

*Пресс-релиз NASA,
28 сентября 2016 г.*

Информация

“Розетта”: конец космической одиссеи

Первая в истории науки программа “Розетта” продолжительностью 12 лет и стоимостью около 1,5 млрд долларов завершилась 30 сентября 2016 г. 14-ти часовым спуском АМС “Розетта” к поверхности кометы 67P/Чурюмова–Герасименко, это проводился сбор информации (см. стр. 2 обложки, внизу). На Землю были переданы последние данные о комете, причем радиосигнал от станции шел в течение 40 мин.

Напомним, что в 1993 г. Европейское космическое агентство одобрило программу “Розетта”. Цель этой миссии – исследование происхождения и эволюции Солнечной системы на примере изучения комет, представляющих собой

замерзшие фрагменты вещества, из которого образовались планеты 4,5 млрд лет назад. Состав вещества комет не претерпел с тех пор значительных изменений, в отличие от вещества планет и астероидов. АМС “Розетта” со спускаемым аппаратом “Филы” стартовала в марте 2004 г. В течение 10 лет станция сделала несколько гравитационных маневров между Марсом и Землей, пролетела более 6 млрд км и в августе 2014 г. достигла кометы 67P/Чурюмова–Герасименко. Затем АМС “Розетта” вышла на орбиту вокруг ее ядра, высадила роботизированную лабораторию – спускаемый аппарат “Филы” – на ее поверхность и в течение двух лет исследовала поверхность кометы (Земля и Вселенная, 2015, №№ 1, 4).

В 2015 г. “Розетта” зафиксировала 34 выброса вещества массой 60–260 т с поверхности ядра кометы 67P/Чурюмова–Герасименко в виде коротких мощных вспышек. Они возникали в течение трехмесячного

периода наивысшей активности кометы – до и после ее максимального сближения с Солнцем, состоявшегося 13 августа 2015 г. Эти высокоэнергетические события происходили наряду с регулярными выбросами струй пыли и газа, а также потоков вещества из ядра кометы. Выбросы, длившиеся 5–30 мин, были синхронизированы с периодом вращения кометы и определялись ростом (или снижением) количества солнечного тепла, попадавшего на определенную часть поверхности кометы.

Наблюдавшиеся “Розеттой” выбросы материала с поверхности кометы ученые разделили по форме на три категории: узкие струи, струи с широким основанием и промежуточного типа. Согласно гипотезе, все три типа выбросов могут относиться к этапам сложного процесса ее формирования. На первом этапе вещество нагревается, затем накапливается его определенное количество и в результате –



Мощные вспышки с выбросами вещества, зафиксированные на поверхности кометы 67P/Чурюмова–Герасименко в период ее наивысшей активности. Снимки получены в июле–сентябре 2015 г. АМС “Розетта”. Фото ESA.

с большой скоростью извергается узкой струей, состоящей из газов и пыли. Вещество падает на ядро

кометы, оно модифицирует ее поверхность, расширяется в этом месте и в конечном счете полностью

трансформируется в более широкую струю выбросов.

*Пресс-релиз ESA,
1 октября 2016 г.*