

Микроквазары

Участники:

Фабрика Сергей Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физики Звезд Специальной астрофизической обсерватории (САО РАН)

Сулейманов Валерий Фиалович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии Казанского Государственного университета

Обзор темы

SS433. Хорошо известный уникальный объект SS433 был выделен в обзоре звезд с эмиссией H α Стефенсона и Сандулека в 1977 году, содержащем 455 объектов плоскости Галактики. SS433 оказался переменным нетепловым радиоисточником и переменным рентгеновским источником. В первых спектрах этого объекта были обнаружены яркие и переменные линии непонятого происхождения. Bruce Margon с коллегами удалось отождествить эти эмиссии с линиями водорода и нейтрального гелия, которые были смещены на десятки тысяч км/с в красную и голубую сторону по паре линий на каждый переход. Наблюдаемые огромные смещения линий не могли возникнуть за счет Зеемановского расщепления линий, было очевидно, что смещенные линии возникали за счет эффекта Доплера в движущемся газе. Выяснилось, что смещенные линии водорода и HeI возникают в двух противоположно направленных струях газа, эти струи периодически меняют свое положение в пространстве ("прецессируют"), что приводит к "движению" линий по спектру. Так начались интенсивные исследования SS433, двойной системы с уникальными свойствами.

Основным отличительным свойством SS433, выделяющим его среди других двойных звезд с релятивистским объектом, является то, что в SS433 реализуется непрерывный (не транзиентный) режим сверхкритической аккреции газа на релятивистскую звезду. При этом формируется сверхкритический аккреционный диск и узкие струи газа, распространяющиеся из внутренних областей диска перпендикулярно к его плоскости с релятивистской скоростью 79000 км/с. Второй компонент системы, звезда-донор, очевидно, переполняет свою критическую полость Роша, что обеспечивает мощный, $\sim 10^{-4} M$ /год, и примерно непрерывный темп перетекания газа в область релятивистской звезды. Фактически, ответ на вопрос о причине уникальности SS433 среди других массивных рентгеновских двойных звезд (с черной дырой или нейтронной звездой) заключается в выявлении причин столь высокого темпа переноса массы в SS433.

Интересно, что до сих пор не найдено никаких явных наблюдательных свидетельств наличия в системе SS433 ни собственно аккреционного диска, ни "нормальной" или "оптической" звезды. Тем не менее, исследователи не имеют никаких сомнений в присутствии этих двух тел в SS433. Связано это не только с имеющимся опытом исследования десятков тесных двойных рентгеновских систем с нейтронными звездами или черными дырами в качестве релятивистской звезды системы. Существует множество косвенных свидетельств и проявлений этих двух объектов. Все основные свойства SS433 хорошо описываются в рамках

современных представлений о сверхкритическом режиме дисковой аккреции, впервые обсужденном Shakura and Sunyaev (1973).

Это тесная двойная, массивная, затменная система, орбитальный период равен $P_{or} = 13,1$ дня. Хорошо наблюдаются затмения обоих тел в оптическом и ближнем ИК диапазонах и затмения оснований релятивистских струй в рентгеновском диапазоне. Источник струй (аккреционный диск или объект в центре диска) существенно ярче второго компонента звезды-донора. Аккреционный диск SS433 прецессирует, то есть меняет свою ориентацию в пространстве с периодом $P_{or} = 162$ дня, струи повторяют прецессионное движение. Фактически в системе SS433 мы наблюдаем только плотный ветер, истекающий из аккреционного диска, две яркие области в центральной части диска, в местах выхода релятивистских струй. С наблюдательной точки зрения звезда в SS433 проявляется только как объект, который периодически затмевает аккреционный диск и газовые потоки, формирующие диск, отражает излучение ярких центральных областей, и возмущает ветер диска. Прецессия аккреционного диска кардинально меняет фотометрические свойства (орбитальную кривую блеска) и заметно меняет спектральные свойства системы. В дальнейшем мы будем пользоваться термином “аккреционный диск”, понимая под этим не только собственно диск, который там должен существовать, но и ветер диска, а также термин “оптическая” или “нормальная” звезда, несмотря на то, что об этой звезде известно очень мало.

Опишем **основные свойства релятивистских струй и аккреционного диска** - машины, генерирующей струи SS433 - известные на данный момент, причем, главным образом, касаясь результатов наблюдений и их интерпретаций. Основная масса наблюдательных данных по SS433 была получена в первые годы исследований, во время “бума SS433”. Основные идеи и модели, объясняющие поведение SS433, также были высказаны в первые годы исследований. Во многом эти идеи получали подтверждение в последующих наблюдениях. Поэтому известные опубликованные обзоры по SS433 весьма ценны и сейчас. Мы отсылаем читателя к этим обзорам не только за данными об истории исследований SS433, объекта, сыгравшего и играющего сейчас принципиальную роль в современной астрофизике, но и по существу этих обзоров. Это обзор Margon (1984), подводящий итог пятилетнему исследованию объекта, обзор результатов фотометрических исследований Черепашук (1988), обзоры моделей SS433 и теоретических представлений Milgrom (1981) и Katz (1986). Результаты новых наблюдений, особенно рентгеновских обсерваторий и радиоинтерферометрии, а также численных экспериментов, конечно, внесли фундаментальный вклад в понимание SS433.

Параметры SS433. SS433, это же переменная звезда V1343 Aquilae, расположен на расстоянии 5 кпк, примерно в галактической плоскости. Это относительно яркая красная звезда ее звездная величина в полосе $V=14.0$. SS433 испытывает очень сильное поглощение света, истинная светимость объекта при предположении изотропного излучения составляет $L_{bol} = 10^{40}$ эрг/с. Это одна из самых ярких звезд Галактики, максимум излучения SS433 приходится на ультрафиолетовый диапазон. В инфракрасном диапазоне имеется избыток излучения. Избыток связан со свободно-свободным излучением газа в непосредственной окрестности системы. В рентгеновском диапазоне светимость SS433 около $\sim 10^{36}$ эрг/с. Рентгеновское излучение в диапазоне 1-10 кэВ в основном определяется горячим ($\sim 10^8$ K) газом струй, появляющимся над фотосферой аккреционного диска.

В оптическом спектре SS433 кроме эмиссионных линий обеих струй, перемещающимися в соответствии с прецессионным и нутационным периодами, наблюдаются очень яркие и переменные “стационарные” линии водорода, HeI, HeII, CIII, NIII, а также более слабые эмиссии FeII. Последние, наряду с линиями HI и HeI, в определенные фазы прецессии показывают явные профили типа PCyg. Все эти линии формируются как в ветре, истекающем из аккреционного диска, так и в газовых потоках в системе. Линии нормальной звезды не были обнаружены вплоть до последнего момента, несмотря на неоднократные попытки исследователей, однако, самые последние данные показывают, что звезда-донор в SS433 является проэволюционировавшим сверхгигантом типа А.

Излучение SS433 весьма переменно во всех изученных диапазонах спектра. Кроме **спорадической переменности (вспышек)**, наблюдаются активные и спокойные состояния. В спокойных состояниях в оптике, ИК и рентгеновском диапазонах наблюдается переменность с орбитальным и прецессионным периодами. В активных состояниях, которые длятся от 30 до 90 дней, средний блеск объекта повышается примерно в 1,5 раза, на этом фоне наблюдаются мощные вспышки с характерным временем часы - дни, при этом SS433 “краснеет”, т. е. усиливается обмен и истечение газа из системы. Особенно наглядно активные периоды видны в радиоданных, где имеются длинные ряды наблюдений.

Струи SS433. Самое удивительное явление в SS433 - это струи. В зависимости от расстояния от источника, или от температуры струй, механизма излучения и, соответственно, методов наблюдений мы будем различать рентгеновские струи ($\sim 10^{10} - 10^{13}$ см), оптические струи ($\sim 10^{14} - 10^{15}$ см), радиоструи ($> 10^{15}$ см), наблюдаются также протяженные рентгеновские струи ($> 10^{17}$ см). Однако, это деление несколько условно, например, радиоизлучение струй наблюдается практически на всем протяжении оптических струй.

В оптических спектрах струи проявляются и “движущиеся” эмиссионные линии водорода, и HeI. Линии перемещаются по спектру, из-за изменения наклона струй к лучу зрения в связи с прецессией. Струи удивительно узкие, их раствор в том месте, где излучаются линии водорода (расстояние соответствует 1-3 дням полета), равен $1,^0 0 - 1,^0 5$. В оптических струях движутся облака газа с нормальной “астрофизической” температурой ~ 10000 °K. Для поддержания излучения газа в оптических струях необходим источник постоянного нагрева газа. Рентгеновские струи короткие (всего несколько сотен секунд полета), в них излучаются линии высокоионизованных, тяжелых элементов. Рентгеновское излучение струй формируется в горячем газе ($T \sim 10^8$ °K), охлаждающемся по мере распространения струи за счет расширения и излучения. Раствор рентгеновских струй равен $\approx 1^0.2$. Газ струй SS433 летит по строго баллистическим траекториям. Поток кинетической энергии или кинетическая светимость струй огромна, $L_k \sim 10^{39}$ эрг/с.

В радиодиапазоне на масштабах несколько угловых секунд наблюдается знаменитая картина прецессирующих струй. Светимость $10^{30} - 10^{31}$ эрг/с, механизм излучения синхротронный. На “масштабах VLBI” также хорошо видны струи вплоть до предела разрешения около 2 mas, где во внутренней области ~ 20 а.е. уже сильны эффекты самопоглощения радиоизлучения. Струи SS433 возбуждают радиотуманность W50, весьма похожую на остаток сверхновой. W50 вытянута в направлении оси прецессии струй с SS433 в центре, туманность простирается по обе стороны в этих направлениях до 50-70 пк. В этих же

направлениях распространяются протяженные рентгеновские струи, которые заканчиваются оптическими волокнами.

“Кинематическая модель” SS433 очень хорошо предсказывает положение струй в пространстве и положения линий по спектру. Это геометрическая модель прецессии струй. Кроме прецессионного движения струи совершают так называемые нутационные колебания малой амплитуды с периодом 6.28 дня, который равен половине синодического орбитального периода. Нутационные качания струй (аккреционного диска) вызваны периодическими приливными возмущениями диска гравитационным полем истекающей звезды, либо возмущениями аккреционного потока. При этом наиболее успешным сценарием прецессии в SS433 является вынужденная прецессия звезды-донора, ось вращения которой не совмещена с осью орбиты, и плавающий или “ведомый” аккреционный диск.

Сейчас было бы преувеличением сказать, что “загадка SS433” разрешена; во многих проблемах, особенно касающихся формирования струй и внутренней структуры центрального объекта, самые интересные работы, вероятно, еще впереди. Однако, прогресс в понимании SS433, уже достигнутый, удивляет не меньше, чем сам SS433. Этот объект оказал огромное влияние на астрофизику, как в понимании критических стадий эволюции тесных двойных систем, так и в понимании струй, выбрасываемых из молодых звезд, активных ядер галактик и микроквazarов. Последние являются самыми близкими родственниками SS433. Главным, но далеко не единственным, отличием SS433 от микроквazarов или некоторых рентгеновских новых, у которых возможны сверхкритические эпизоды аккреции в момент вспышки, является постоянный существенно сверхкритический режим аккреции на релятивистскую звезду. SS433 до сих пор единственный объект звездной массы, в котором мы можем непосредственно наблюдать работающий сверхкритический аккреционный диск, процесс выброса и распространения струй. Более того, этот диск (а также все газовые потоки в системе, ветер из диска и струи) постоянно разворачивается с периодом прецессии, затмевается с орбитальным периодом, это настоящий подарок для исследователей, уникальная лаборатория. Две струи SS433 должны быть тождественны друг другу, но часто выглядят весьма по-разному. Меняя свою ориентацию, струи также предоставляют замечательные возможности для исследований поведения газа на релятивистских скоростях и собственно релятивистских эффектов.

Микроквazarы. Кратко опишем свойства микроквazarов, как самых близких родственников SS433, а также других объектов - ультраярких рентгеновских источников во внешних галактиках, которые, вероятно, имеют непосредственное отношение к SS433 и микроквazarам. Заметим, что современная литература по микроквazarам весьма обширна.

Микроквazarам считаются рентгеновские двойные звезды с релятивистскими струями. Прототипом микроквazarов, вероятно, следует считать SS433, так как впервые, у этого объекта были обнаружены релятивистские струи. Однако, название “микроквazar” впервые было применено к рентгеновской двойной ScoX-1, имеющей радиоструи. Радиоизображения некоторых рентгеновских двойных с релятивистскими выбросами и радиоярких квazarов (и радиогалактик) настолько подобны, что без дополнительных данных их невозможно отличить. Поэтому сам термин “микроквazar” в первую очередь должен был подчеркнуть морфологическое подобие радиоструктур этих объектов. Массы черных дыр в микроквazarам составляют несколько солнечных масс, что в миллионы, десятки миллионов раз меньше массы квazarов (сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик).

Под микрокварами, как правило, понимаются рентгеновские двойные с нейтронными звездами или черными дырами, у которых обнаруживается струйная радиоактивность. Этот класс сейчас включает чуть менее 20 объектов классифицируемых как микроквара, и около десятка кандидатов. Например, известная массивная рентгеновская двойная CygX-1 также является микрокваром. Считается, что с аккреционной активностью всегда связана струйная активность, однако разнообразие объектов несколько размывает сам класс микрокваров.

Можно говорить о “классических” микрокварах - GRS1915+105 и GROJ1655-40. Обе рентгеновские двойные содержат черные дыры с массами, соответственно, $\sim 14 M$ и $\approx 7 M$. Классические микроквара являются “сверхсветовыми” синхротронными радиоисточниками. Скорость струйных выбросов в них 0.92-0.98 скорости света. Они являются **транзистными объектами, т.е. струи выбрасываются в определенные моменты активности, время жизни радиовыбросов в струях составляет от нескольких дней до нескольких недель.** В активных состояниях рентгеновская светимость существенно повышается. Весьма вероятно, что струи в этих микрокварах лептонные (в отличие от SS433), т. е. непосредственно во внутренних областях вокруг черной дыры происходит ускорение и коллимация релятивистских частиц. В момент формирования релятивистского выброса (на интервале времени несколько минут) наблюдается инфракрасное синхротронное излучение. Это, а также особенности поведения рентгеновского излучения во вспышке говорит о том, что в отличие от SS433 сама область генерации струи вполне открыта для наблюдений. **Возможно, будет обнаружено оптическое синхротронное излучение при образовании струи.**

Во всей совокупности микрокваров скорость струйных выбросов весьма разнообразна (0.1-0.9 скорости света). Однако почти во всех случаях скорость струй невозможно определить более или менее точно, т. к. не известны расстояния до объектов и ориентация струй. Наблюдательные проявления микрокваров, как уже говорилось, чрезвычайно многообразны, особенно хорошо изучена переменность рентгеновского блеска и квазипериодические осцилляции.

Несмотря на большое количество данных, пока не было замечено значительных различий в струйной активности микрокваров, содержащих нейтронные звезды и черные дыры. Это обстоятельство весьма примечательно, казалось бы, в выбросе струй принимают участие самые внутренние области, где различие между нейтронной звездой и черной дырой становится принципиально важным.

Известно, что для формирования радиоизлучающих струй необходимо, чтобы релятивистская звезда не имела большого магнитного поля ($< 10^{10}$ Гс) и чтобы был высокий темп аккреции ($> 0.1 L_{crit}$), а также, что в момент образования струй происходит кардинальные изменения в аккреционной структуре. В случае рентгеновских двойных с нейтронными звездами магнитное поле не должно быть сильным, чтобы аккреционный поток не был канализирован полем вплоть до внутренних областей.

В знаменитой вспышке микроквара GRS1915+105, произошедшей 9 сентября 1997 г. на фоне мощных коротких (~ 50 sec) осцилляций рентгеновского излучения произошло значительное ослабление рентгеновского потока за время, сравнимое с временным масштабом осцилляций. При этом рентгеновский спектр стал более жестким. В это же время, более плавно слабело инфракрасное и радиоизлучение. Примерно через 7-8 минут рентгеновского ослабления возник резкий изолированный рентгеновский всплеск. Этот момент считается моментом

выброса струи. Далее начинают возрастать инфракрасный и рентгеновский потоки (опять появляются осцилляции), чуть позже инфракрасной появляется радиовспышка. Вся история от начала до конца развивается за 30-40 минут. Это рентгеновское поведение интерпретируется как быстрое пропадание (опустошение) и последующее восстановление внутреннего аккреционного диска.

В массивной рентгеновской двойной CygX-3, которая, как считается, вероятно, включает нейтронную звезду в очень тесной паре (орбитальный период 4.8 часа) со звездой Вольфа-Райе, а также в самом SS433 перед мощными радиовспышками также заметно ослабляется радиоизлучение. Выброс струй происходит, вероятно, в момент внезапного угасания жесткого и радио излучений.

Поведение рентгеновского излучения во вспышках микроквазаров может определяться излучением появившегося струйного выброса - синхротронное излучение релятивистских электронов и обратное Комптоновское (рассеяние внешнего света на этих электронах), а также опустошением внутренних частей аккреционного диска. Возможно, что корреляция рентгеновского и радиопотоков, резкое ослабление рентгеновского излучения, возрастание жесткости в рентгеновском минимуме классических микроквазаров, - все эти явления обязаны появлению дополнительного поглощения рентгеновского потока при запуске струй. В этот момент активности происходит резкое увеличение темпа поступления газа во внутренние области или резкая перестройка газовых потоков.

В классических микроквазарах (GRS1915+105) характерные времена развития вспышек составляют минуты. Возможно, что в классических микроквазарах мы наблюдаем “голый” релятивистский объект? Точнее, все процессы там мы наблюдаем “в реальном времени”. Поэтому данные наблюдений микроквазаров рассматриваются как прямые тесты для физики черных дыр. В CygX-3 (и тем более SS433) такое невозможно, поглощение окружающим газом (аккреционными потоками) существенно более сильно, поэтому внутренние области скрыты от наблюдателя.

Сверхкритические транзиенты. Есть свежие исследования (2002 года) распределения по светимостям (функции светимости) рентгеновских двойных нашей Галактики по данным RXTE All-Sky Monitor. В основном рентгеновская светимость зависит от темпа аккреции газа на релятивистскую звезду, что, в свою очередь, определяется темпом потери газа донором. Поэтому ожидается непрерывное, в общем случае степенное, распределение рентгеновских двойных по светимостям вплоть до критической светимости L_{Edd} , соответствующей массе нейтронной звезды или несколько большей ($\sim 2 \cdot 10^{38}$) erg/s. Поскольку аккреционная светимость не может заметно превысить Эддингтоновский предел, в области критической светимости возможно “накопление” объектов, а при больших светимостях ожидается излом функций светимости.

При “умеренных” транзиентных превышениях критических темпов аккреции, $\dot{M} \leq 10 - 100 \dot{M}_{Edd}$, конечно, возможно появление примерно или слегка super-Eddington источников. Темп потери массы звездой-донором и темп захвата массы релятивистской звездой зависит от многих причин. В частности, повышение темпа истечения может быть реакцией донора на аккреционную активность, но в общем случае темп потери массы донором не связан со вторым компонентом (совершенно не связан с наличием Эддингтоновского предела светимости). Резкое усиление обмена массой может быть следствием внутренних процессов в атмосфере донора, особенностей истечения, возможных прецессионных движений, прохождения компонентов через периастр и проч.

При значительных транзистентных увеличениях темпа аккреции массы на короткое время возникнет **синдром SS433** - резкое ослабление рентгеновского потока из-за поглощения излучения в ветре из аккреционного диска. Материя выбрасывается из системы за счет светового давления. Кроме того, могут возникнуть мощные **дископодобные потоки**, затемняющие центральный объект или даже всю систему. Переработка формирующегося в центре рентгеновского излучения в мощном ветре должна привести к появлению пекулярного объекта весьма слабого в рентгеновском диапазоне, но яркого в УФ и оптическом диапазонах. В спектре такого объекта в этот момент ожидается появление широких эмиссий, формирующихся в ветре со скоростью несколько тысяч км/с. Очевидно, ожидается появление струй, резкое повышение радиоизлучения. Кроме того, вполне возможно, что в эти сверхкритические моменты жесткое излучение объекта становится коллимированным в направлении перпендикулярном диску.

Знаменитую гигантскую вспышку сентября 1999 года необычно быстрого транзистента V4641Sgr (“звезда Горанского”, релятивистский объект - черная дыра) объясняют как сверхэддингтоновский взрыв в этой системе. Необычно быструю и сильную вспышку транзистента C1Cam (нейтронная звезда или черная дыра в паре с B[e]-сверхгигантом) так же объясняется как сверхкритический эпизод аккреции. В обоих случаях короткое время рентгеновской вспышки связано с появлением ветра и поглощением рентгеновского излучения. При этом соответствующие оптические вспышки были необычно яркими. Максимум болометрического излучения таких вспышек должен приходиться на оптический или УФ диапазон. В обоих случаях наблюдались широкие эмиссионные линии в оптических спектрах, указывающие на формирование ветра из внутренних областей аккреционной структуры.

Появлялись ли во вспышках V4641Sgr и C1Cam “тяжелые и холодные” струи типа как у SS433? Сообщений о необычных линиях во вспышках этих объектов не было, однако сами спектры были весьма сложными и быстро эволюционировали. Можно предположить, что появление холодных струй в эпизоде сверхкритической аккреции маловероятно, так как для коллимации струи и удержания холодных облаков газа в струях требуется канал и развитый уже сформировавшийся ветер из диска.

Образовывалось ли во вспышках 4641Sgr и C1Cam коллимированное излучение? На этот вопрос тем более ответа нет. Возможно, в относительно недалеком будущем мы дождемся сверхкритической вспышки рентгеновского транзистента, ориентированного “face-on”. Если раствор телесного угла канала во сверхкритической вспышке Ω_c , то на $2\pi/\Omega_c$ сверхкритических транзистентов придется один, когда мы зарегистрируем ярчайший ($L_x \sim 10^{40}$ erg/s) рентгеновский транзистентный источник.

Face-on SS433 и ультраяркие рентгеновские источники в галактиках. Рентгеновская светимость всей нашей Галактики по сумме рентгеновских источников в диапазоне 2-10 keV составляет $\sim 2-3 \cdot 10^{39}$ erg/s. Причем полная светимость определяется в основном несколькими наиболее яркими объектами. Примерно такая же картина наблюдается в галактике M31, ее полная светимость в диапазоне 2-20 keV составляет $\sim 5 \cdot 10^{39}$ erg/s. Ярчайшие рентгеновские источники в нашей Галактике и в Местной группе имеют рентгеновские светимости $\sim 10^{38}$ erg/s, некоторые микроквазары в пике вспышки достигают светимости $3 \cdot 10^{39}$ erg/s. Следует заметить, что во внешних галактиках встречаются существенно более яркие объекты, это ультраяркие рентгеновские источники (ULXs). Количество XLFs в галактиках существенно зависят от эффективности

звздообразования. Они встречаются в тех галактиках, где много молодых массивных звезд.

Сейчас стало ясно, что ультраяркие источники ($L_x > 1 \cdot 10^{39} - 5 \cdot 10^{39}$ erg/s) в галактиках являются отдельным классом объектов. В принципе, можно несколько “повысить” Эддингтоновский предел светимости (за счет эффектов геометрии или специфического химического состава) в попытке избежать противоречий с огромной светимостью ULXs. Однако совокупность наблюдательных данных по ULXs рентгеновским источникам в галактиках все равно заставляет искать “кардинальные” методы решения этой проблемы. Либо эти объекты а) не сверхкритические аккреционные диски, а являются черными дырами промежуточной массы ($10^2 - 10^4 M$) между черными дырами звездной массы и сверхмассивными черными дырами, - так называемые intermediate-mass black holes (IMBHs); либо эти объекты б) ориентированные face-on сверхкритические аккреционные диски в двойных системах (SS433, микроквazarы), излучение которых может быть как коллимировано за счет геометрии канала, так и усилено за счет релятивистских эффектов движения излучателя в направлении близком к лучу зрения.

Для удачливого наблюдателя, который мог бы непосредственно видеть центральные части канала SS433 этот объект предстал бы ультраярким рентгеновским источником, светимость которого была бы $L_x \sim 10^{40} - 10^{42}$ эрг/сек, т. е. до $\sim 10^4$ раз ярче CygX-1. Рентгеновский поток SS433, ориентированного face-on, менялся бы с характерным временем прохождения струи через канал $\sim 0.1 - 10^2$ сек. Ориентация SS433 не позволяет нам непосредственно изучать канал (однако, ее нельзя назвать неудачной, т. к. благодаря затмениям мы можем эффективно исследовать саму двойную систему и аккреционный диск). Объекты, подобные SS433 в других галактиках могут проявить себя как экстремально яркие рентгеновские источники.

Как правило, ULXs находятся в спиральных и иррегулярных галактиках, в спиральных ветвях и в ядерных областях, т. е. в областях активного звездообразования. Это соответствует предположению, что ULXs принадлежат молодому звездному населению. В нашей Галактике известен только один SS433. Расчеты моделей эволюционного синтеза также предсказывают наличие единичных объектов такого типа в спиральной галактике подобной нашей. Однако, в молодых областях звездообразования плотность наиболее массивных звезд (из которых мог образоваться SS433) повышается в сотни раз по сравнению со средней плотностью по галактике. Fabrika and Mescheryakov (2001) предположили, что объекты ULXs есть объекты типа SS433 или микроквazarы, ориентированные face-on. В последние годы объекты ULXs исследуются весьма активно на космических аппаратах. Их основные свойства (светимость, спектр, переменность) не противоречат гипотезе, что в ULXs мы наблюдаем сверхкритические аккреционные диски, ориентированные так, что луч зрения близок к оси диска.

Практически все хорошо исследованные ULXs показывают значительную переменность рентгеновского потока. Это является весьма сильным аргументом в пользу того, что ULXs - ориентированные face-on сверхкритические аккреционные диски. Даже такая хорошо исследованная звезда как SS433, будучи ориентированной face-on, превращается в “гипотетический объект”, свойства которого (например, спектр) известны очень плохо.

Частота встречаемости ULXs в галактиках примерно близка к ожидаемой, если это сверхкритические аккреционные диски. Это примерно один объект на 20 галактик. Такая частота встречаемости количественно могла бы быть понята так,

что в каждой галактике находится один объект типа SS433, причем полный раствор конуса коллимированного излучения этого объекта $30^{\circ} - 40^{\circ}$, и ориентация этих объектов случайна. По спектрам (индексы жесткости) выделенные объекты являются в среднем жесткими источниками.

В самое последнее время ULXs были выделены также и в эллиптических галактиках, где, как считается, нет молодых звезд. Это не противоречит интерпретации ULXs как микроквазаров, ведь среди микроквазаров много так называемых двойных низкой массы, а двойные низкой массы присутствуют в эллиптических галактиках.

Спектры ULXs весьма напоминают спектры рентгеновских двойных, иногда они хорошо описываются так называемой моделью многоцветного диска, но часто требуется более сложное описание спектра. ULXs так же как и рентгеновские двойные с черными дырами могут совершать переходы “мягкое/высокое - жесткое/низкое” состояния спектра. Переменность рентгеновского потока, весьма значительна, она может достигать фактора 2 за время около часа. Исследования переменности на коротких временах ограничены, вероятно, только чувствительностью современных детекторов.

Весьма важны оптические отождествления ULXs, так как именно они могли бы дать надежный ответ о природе этих источников. ULXs, если и отождествляются, то с весьма слабыми объектами 20-25 звездных величин, часто в туманностях. Обычно это голубые объекты, которые, впрочем, могли бы быть и молодыми скоплениями.

Альтернативной моделью для ULXs являются IMBHs с массами $\sim 10^3 M_{\odot}$, которые могли быть сформированы из самых первых звезд Вселенной (так называемое население III) или в шаровых скоплениях. Такие черные дыры могут аккрецировать межзвездный газ и становиться яркими рентгеновскими источниками только в случае если окружающий газ достаточно плотный, а скорость движения IMBHs относительно газа очень мала. Последние два условия существенно ограничивают количество IMBHs, доступных для наблюдений.

Какие критерии для выбора между двумя альтернативными моделями ULXs могут быть предложены? При исследовании туманностей, окружающих эти источники следует искать свидетельства динамического воздействия струйных выбросов объекта на межзвездный газ. По аналогии с SS433 на масштабах в десятки парсек можно ожидать возмущений межзвездной среды с амплитудой в десятки км/с. Такие особенности вокруг ULXs легко могут быть зарегистрированы даже в наземных наблюдениях в галактиках до расстояний ~ 10 Мpc. С другой стороны, IMBHs могут только ионизовать межзвездный газ, но никак не могут возмутить его динамически. Радиус захвата межзвездного газа черной дырой с массой 1000 солнечных масс, движущейся со скоростью 10 км/сек составит всего 0.1 парсек.

Как уже говорилось, одним из возможных тестов может служить переменность блеска. Черные дыры не способны произвести сильную переменность блеска на временах значительно короче чем $0.01(M_{BH} / M_{\odot})$ сек. Если считать, что черные дыры в ULXs излучают на Эддингтоновском пределе, то можно сказать, что переменность блеска черных дыр весьма маловероятна на временах $< 1L_{40}$ sec, где рентгеновская светимость выражена в единицах 10^{40} erg/sec. Для детального исследования переменности ULXs на таких коротких характерных временах необходимо дождаться следующего поколения рентгеновских телескопов.

В 2002 году на 6-метровом телескопе БТА с помощью мультиспектрального спектрографа были проведены наблюдения ULXs в галактике Holmberg II. Вокруг

ULXs была обнаружена туманность, излучающая в линии в “горячей” линии HeII λ 4886, то есть эта туманность возбуждена самим рентгеновским источником. Туманность состоит из двух горячих пятен, которые разлетаются из общего центра со скоростью 50 км/сек. Такое динамическое воздействие на межзвездную среду могут оказать только струи микроквазара, но никак не ИМВН.

Библиография

- Липунов В.М. В мире двойных звезд. М., 1986
- Черепашук А.М. Объект SS433. Физика космоса (маленькая энциклопедия). М., 1986
- Черепашук А.М. Данные фотометрических наблюдений SS433 и их интерпретация // Итоги науки и техники. Сер. Астрономия. 1988. Т. 38
- Fabrika S.N. The Supercritical Accretion Disk of SS 433 // *Astrophys. Space Sci.* 1997. V. 252
- Fabrika S., Mescheryakov A. Face-on SS433 stars as a possible new type of extragalactic X-ray sources // *Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions: IAU Symposium № 205 / Ed. by R.T. Schilizzi.* 2001
- Gies D.R., Huang W., McSwain M.V. The Spectrum of the Mass Donor Star in SS 433 // *Astrophys.* 2002. V. 578
- Grimm H.-J., Gilfanov M., Sunyaev R. The Milky Way in X-rays for an outside observer. Log(N)-Log(S) and luminosity function of X-ray binaries from RXTE/ASM data // *Astron. and Astrophys.* 2002. V. 391
- Katz J.I. SS433 - Another view // *Comments Astrophys.* 1986. V. 11
- Margon B. Observations of SS433 // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1984. V. 22
- Milgrom M. Review of the theories on SS433 // *Vistas Astron.* 1981. V. 25
- Mirabel I.F., Rodriguez L.F. Sources of Relativistic Jets in the Galaxy // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1999. V. 37
- New Views on Microquasars, the Fourth Microquasars Workshop / Ed. by Ph.Durouchoux, Y.Fuchs, J.Rodroquez. Kolkata (India): Center for Space Physics, 2003
- Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astrophys.* 1973. V. 24
- <http://www.sao.ru>
- <http://jet.sao.ru>

Тема № 323(111)

Эфир 27.11.03

Хронометраж 40:07