



---

*Астрофизика*

---

## Радиоизлучение микровязаров

С.А. ТРУШКИН,  
доктор физико-математических наук  
САО РАН

---

Рентгеновские двойные звезды с релятивистскими струйными выбросами – микровязары – уже более 25 лет вызывают огромный интерес мирового астрономического сообщества. Главная интрига исследований последних лет состоит в том, что большинство микровязаров содержат черные дыры, вокруг которых образуется горячий аккреционный диск из вещества с нормальной звезды, образующей с черной дырой тесную пару. Часть падающего вещества навсегда исчезает за го-



ризонтом событий, но другая под влиянием магнитного поля извергается с огромными скоростями в двух противоположных струях

из полярных областей аккреционного диска. Где-то вблизи черной дыры происходит генерация самого высокоэнергетического излучения – гамма-лучей сверхвысоких энергий. Удаляясь на значительное расстояние от двойной системы, в веществе струй начинают излучать быстрые электроны, создавая картину, знакомую исследователям далеких галактик и квазаров, – радиострую, или радиоджет. Именно джеты изучают радиоастрономы.

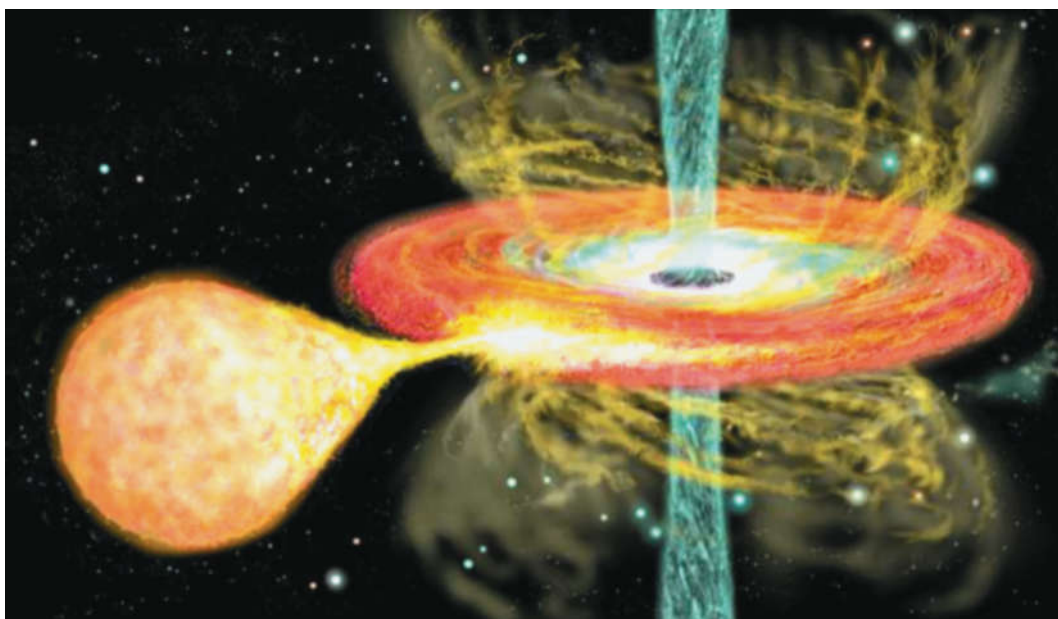
### НЕМНОГО ИСТОРИИ

По расчетам эволюции самых массивных звезд, 100 миллионов черных дыр (ЧД) должны существовать в нашей Галактике. Подавляющее число этих таинственных объектов, предсказан-

ных еще в начале XX в., не создают никакого излучения, так как выпадение межзвездного газа на ЧД не в состоянии создать достаточно яркий световой “ореол” вокруг них, чтобы его увидеть на наземных или космических телескопах. Ну-

жен более интенсивный источник падающего вещества. И он был найден в процессе исследований звездообразования.

Давно известно, что звезды часто рождаются гравитационно-связанными парами, и часть из них находится на столь близ-



*Так в представлении художника может выглядеть рентгеновская двойная система. Рисунок Р. Фендера.*

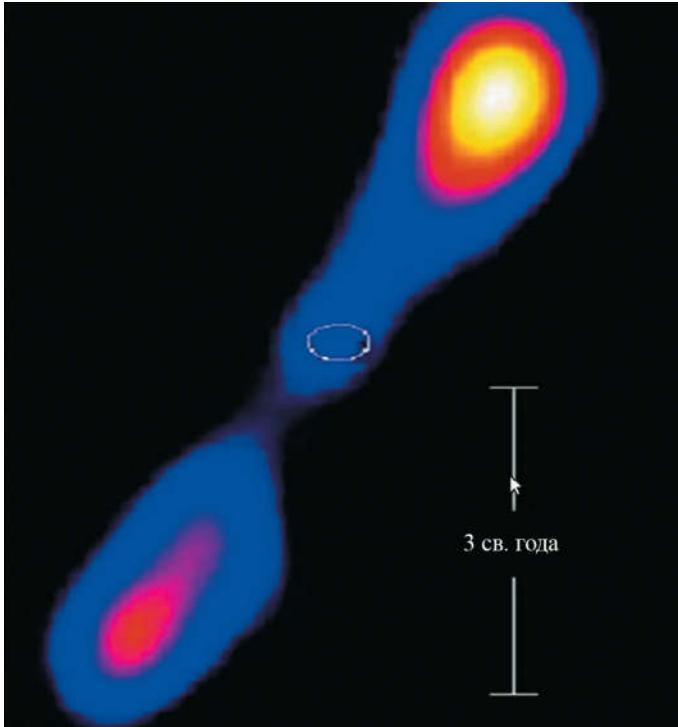
ких орбитах, что может происходить достаточно быстрый (по сравнению с их временем жизни) перенос вещества с одной на другую. Такую пару звезд называют тесной двойной системой. Это вещество, обладая заметным угловым моментом из-за орбитального движения, закручивается в аккреционный диск, прежде чем упасть в ЧД. Среди миллионов двойных звезд только в двух тысячах тесных систем содержатся нейтронные звезды (НЗ) или ЧД. Они представляют собой конечный продукт эволюции звезд с массой бо-

лее  $8 M_{\odot}$ . Такие тесные двойные системы с НЗ (или ЧД) были обнаружены еще в 1960-е гг. в пионерских рентгеновских исследованиях Рикардо Джакони, нобелевского лауреата по физике 2002 г., и стали первыми объектами рентгеновской астрономии (Земля и Вселенная, 2014, №№ 4 и 5). Такие тесные двойные системы получили название рентгеновские двойные (РДС). Их спектры настолько сильно отличались от рентгеновских спектров корон, что только необычным физическим явлением – аккрецией вещества на релятивистские звезды (ЧД и НЗ) – можно было объяснить эти спектры.

Обнаруженные объекты получали имена по названию своего созвездия и номера после буквы “X”

(например, один из ярчайших источников рентгеновского излучения Лебедь X-1 массой  $14,8 M_{\odot}$ ). Каталоги содержат около 350 РДС, причем половина их имеет массу нормальной звезды-донора  $M_n < 3 M_{\odot}$ , а другая половина – массу  $M_n > 3 M_{\odot}$ . Рентгеновские двойные с ЧД или НЗ могут попасть в обе группы. Высокий темп аккреции вещества за счет переноса массы с “донора” позволил астрономам исследовать таинственные ЧД, измерять их массу и спин (момент вращения). У почти 50 РДС обнаружено радиоизлучение, 15 самых “радиоярких” наблюдаются в ежедневном мониторинге с помощью радиотелескопа РАТАН-600.

Большая часть изолированных ЧД пока остается недоступной



Микроквазар 1E1740.7-2942 в центре нашей Галактики. Радиоизображение получено в 2000 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA (NRAO, США).

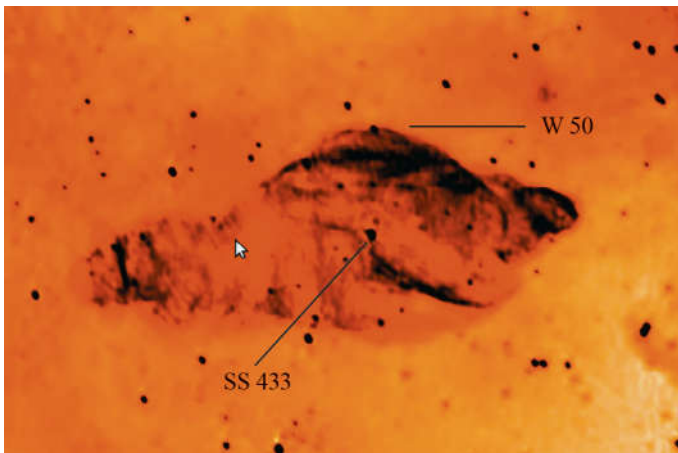
вызвать двойная система из ЧД и НЗ. Открытие даже одного такого объекта может стать “священным Граалем” для астрофизиков на долгие годы будущих исследований.

#### ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В центре нашей Галактики находится сверхмассивная черная дыра с массой около  $4 \times 10^6 M_{\odot}$ . В центрах всех – активных и нормальных галактик – находятся сверхмассивные ЧД, диапазон масс которых составляет  $10^4$ – $10^9 M_{\odot}$ . Обнаружение ЧД промежуточных масс ( $100$ – $1000 M_{\odot}$ ) в других галактиках – задача ближайших лет. Состав РДС остается удивительно пестрым: и крошечные карлики (M), и массивные звезды ранних спектральных классов (OB) могут быть звездами-донорами. Разнообразны

для изучения. Вероятно, успехи таких инструментов, как лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория LIGO (США), в открытии гравитационного излучения от слияния двух черных дыр

станут толчком в развитии новой гравитационной астрономии, главным объектом которой будут ЧД в составе кратных систем (Земля и Вселенная, 1972, № 5; 1982, № 1; 1985, № 1; 2010, № 3). Особый интерес может



Остаток сверхновой W50 рядом с рентгеновской двойной SS433 в созвездии Орла. Первое изображение на волне 140 МГц получено в 2016 г. с помощью нового европейского интерферометра LOFAR. По данным Д. Бродерика и др. (2016).

их орбитальные свойства – круговые, вытянутые, прецессирующие, быстрые собственные движения за счет несимметричного взрыва сверхновой, в процессе которой рождаются ЧД и НЗ. Вероятно, такие новые международные инструменты, как космическая обсерватория “Радио-астрон” и радиointерферометр нового поколения SKA, обнаружат сотни или тысячи РДС.

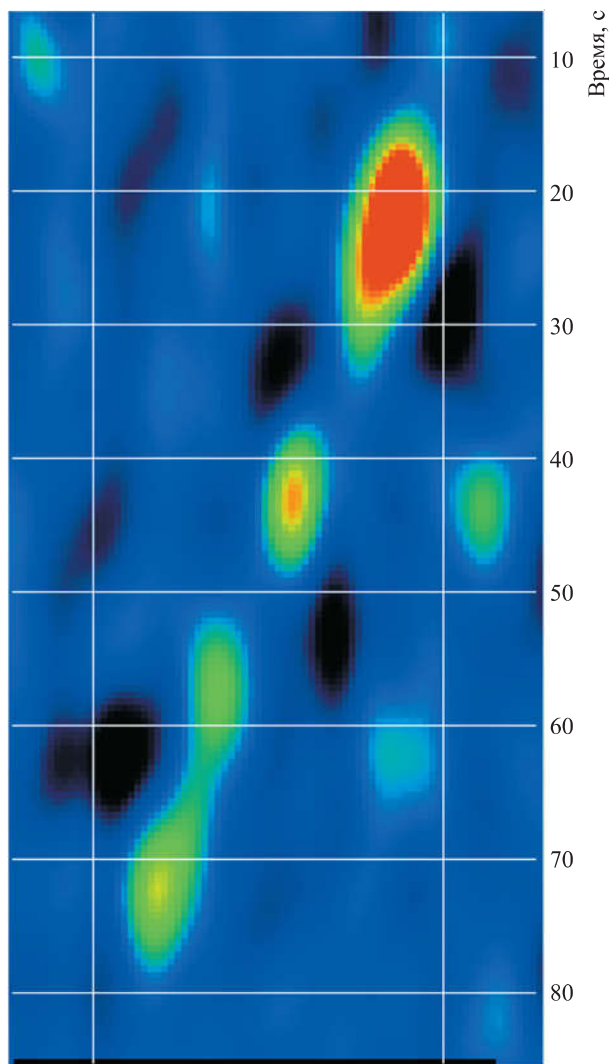
Рентгеновские двойные классифицируются по системе, основанной на свойствах рентгеновского спектра: считается, что если темп аккреции вещества на ЧД увеличивается, то двойная система совершает переход из жесткого (и часто спокойного) в мягкое состояние. Это видно по отношению потока на энергиях ниже (скажем, 10 кэВ) к потоку на более высоких энергиях: то есть существенно меняются свойства аккреционного диска и так называемой “горячей короны” вокруг него. Нетепловое излучение короны, которое образуется в результате обратного комптоновского рассеяния оптического излучения звезды на релятивистских электронах, может стать заметно ярче на высоких энергиях, чем тепловое излучение самого менее горячего диска. В мягком состоянии рентгеновский спектр действительно становится “чернотельным” (определялся формулой План-

ка) – характерным для вещества во внутренних областях оптически толстого аккреционного диска.

Активный поиск черных дыр в рентгеновских двойных системах продолжался 20 лет с помощью космических рентгеновских обсерваторий “Чандра”, “ХММ-Ньютон” и “Интеграл” (Земля и Вселенная, 2003, № 6; 2008, № 5; 2011, № 2). В 1989 г. запустили советско-французскую космическую обсерваторию “Гранат”, оснащенную телескопом SIGMA рентгеновского и гамма-диапазона, способную локализовать источники с беспрецедентной в то время точностью (Земля и Вселенная, 1989, № 3; 1993, № 6). Французский и аргентинский астрофизики Ф. Мирабель и И. Родригез пришли к выводу, что рентгеновские двойные будут испускать синхротронное радиоизлучение в случае ускорения частиц до высоких энергий в присутствии магнитного поля. На “Гранате” ученые выполнили наблюдения объекта 1E1740.7-2942 – источника из первого каталога, составленного в космической обсерватории “Эйнштейн”. Одновременно проводились исследования на радиointерферометре VLA (NRAO, США). Объект был выбран не случайно: его светимость, переменность и рентгеновский спектр точно соответ-

ствовали свойствам аккреционного диска вокруг такой же ЧД, как в Лебедь X-1, тогда считавшемся “лучшим кандидатом” в черные дыры. Микроквazar 1E1740.7-2942 оказался самым ярким жестким рентгеновским источником в центре нашей Галактики. Но самое замечательное было то, что в его жестком спектре обнаружили линию 511 кэВ как результат процесса аннигиляции электронов и позитронов. Самым подходящим местом рождения пар из-за взаимодействия гамма-фотонов можно считать внутренние области аккреционных дисков. Этот процесс эффективен тогда, когда размер источника мал – имеет радиус около 3–10 гравитационных радиусов ЧД звездной массы, что равно 30–100 км. В другом микроквazаре V404 Лебедя также была обнаружена линия аннигиляции в гамма-спектре после вспышки летом 2015 г. Вероятно, многие, если не все, микроквazары в активной фазе эволюции обладают способностью рожать позитроны, то есть антиматерию.

Радиоизображение 1E1740.7-2942 удивительно напоминало карты радиогалактик, к тому времени полученных с помощью различных интерферометров и РСДБ-систем (см. статью О.В. Верховданова и Ю.Н. Парийского в этом номере). Астрономы увидели вы-



Микроквazar 1E1740.7-2942. Радиоизображение получено в 2000 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA (NRAO, США). По данным Ф. Мирабеля и др. (1992).

ская новая GRS1915 + 105 в Орле, позже давшая имя всем подобным объектам микроквazarы, затем с помощью телескопа SIGMA определены координаты этого источника с невысокой точностью  $\pm 3,5'$ . Поэтому испанский астрофизик А. Кастро-Тирадо попросил Ф. Мирабеля провести на радиоинтерферометре VLA картографирование области вокруг GRS1915 + 105, и он обнаружил переменный относительно яркий радиоисточник. Его точные координаты позволили сделать однозначное его отождествление со звездой в ИК-диапазоне. Ф. Мирабель и И. Родригез наметили серию картографирований GRS1915 + 105 на VLA с целью "разрешить" объект на компоненты. Это удалось сделать весной 1994 г. во время яркой вспышки. Каково же было их удивление, когда они нашли видимое "сверхсветовое" расширение объекта! Кажущееся движение со скоростью больше скорости света есть следствие релятивистской теории, когда источник излучения движется со скоростью, близкой к ско-

бросы на расстоянии 6 св. лет по обе стороны от центрального компактного радиоисточника. Струи этого "великого аннигилятора" совсем не типичны для других микроквazarов, так как обычно их удается зарегистрировать на расстоянии не дальше 10 тыс. а.е. от двойной системы. Стоит заметить, что временные масштабы переменности ядер активных галактик

и микроквazarов различаются в сотни миллионов (если не миллиардов) раз, что отражает характерное соотношение масс объектов.

#### ПЕРВЫЙ МИКРОКВАЗАР

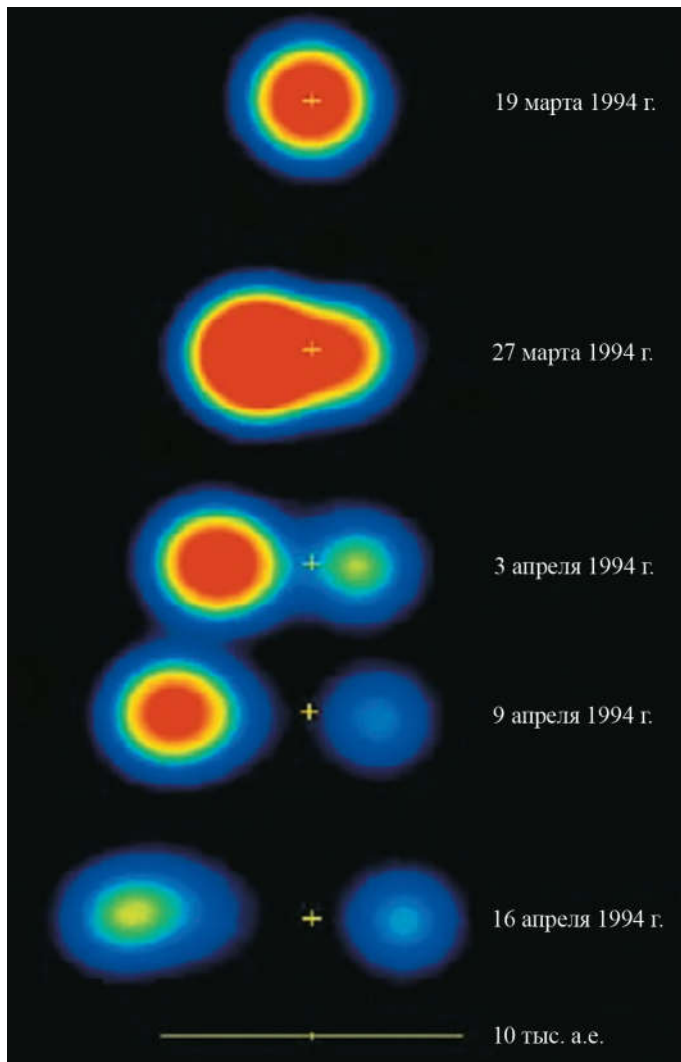
В августе 1992 г. с помощью рентгеновского монитора всего неба WATCH космической обсерваторией "Гранат" была открыта рентгенов-

След “сверхсветового” движения радиоконцентрации микроквара GRS1915 + 105 в созвездии Орла. Радиоизображение получено в марте–апреле 1994 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA (NRAO, США). По данным Ф. Мирабеля и И. Родригеса (1994).

рости света под малым углом к лучу зрения наблюдателя. Подобный эффект многократно наблюдался во многих активных квазарах и радиогалактиках (например, в 3C279 и 3C120). Теперь оказалось, что и в микрокварах возможны релятивистские скорости движения струй – джетов. Струи в GRS1915 + 105 разлетались со скоростью 0,92 от скорости света, а угол вектора скорости к лучу зрения был равен 70°. Кинетическая мощность струй составляла рекордную величину около  $10^{40}$  эрг/с. В более поздних измерениях, в конце 1997 г., на интерферометре MERLIN было также обнаружено видимое сверхсветовое расширение, но скорость была еще выше: 98% скорости света, когда угол луча зрения составлял 66°.

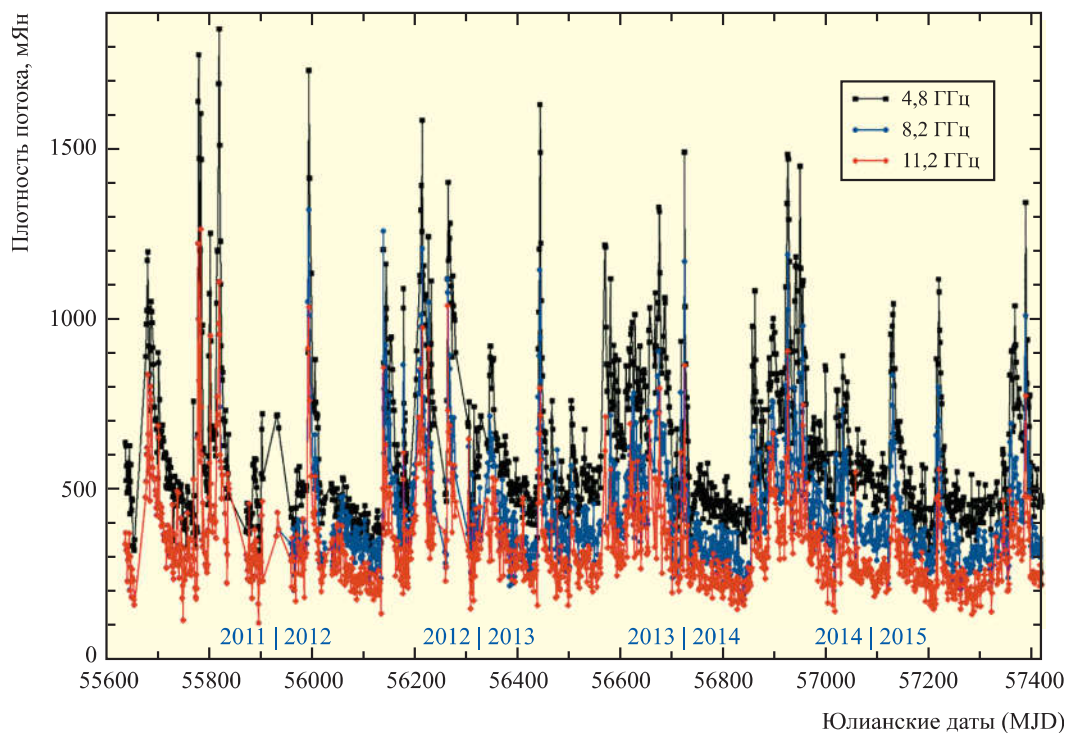
**МЕХАНИЗМ  
ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЙ**

В конце 1990-х гг. американские астрофизики Р. Бланфорд и Р. Знаек предложили механизм процесса формирования



струй – передавать вращательную энергию от керровской (обладающей угловым моментом) ЧД к струе. Создание и ускорение струи контролируется магнитным полем, в основании струи оно может достигать  $10^7$  Гс. Дальше эволюция радиоизлучения в струе определяется внутренними ударными волнами, которые ускоряют электроны (и, возможно, позитроны)

до таких энергий, когда они способны испускать синхротронное излучение в инфракрасном и радиодиапазонах. В рентгеновском, инфракрасном и радиодиапазонах наблюдались квазипериодические осцилляции потока в течение времени существования аккрецирующего вещества в диске на последней стабильной орбите. Ученые пришли к заключению,



что GRS1915 + 105 содержит ЧД массой около  $10 M_{\odot}$  и звезду F-класса массой  $M_{\odot}$ .

Как влияют темп аккреции и рентгеновские состояния (поток излучения в разных частях рентгеновского спектра) на формирование и эволюцию струй? Ответы на эти вопросы сформулированы в струйной парадигме, то есть в сцепке процессов формирования струй и аккреции вещества на релятивистский объект (ЧД). Очевидно, что исследования надо проводить одновременно в максимально широком диапазоне спектра – от радиоволн до гамма-излучения.

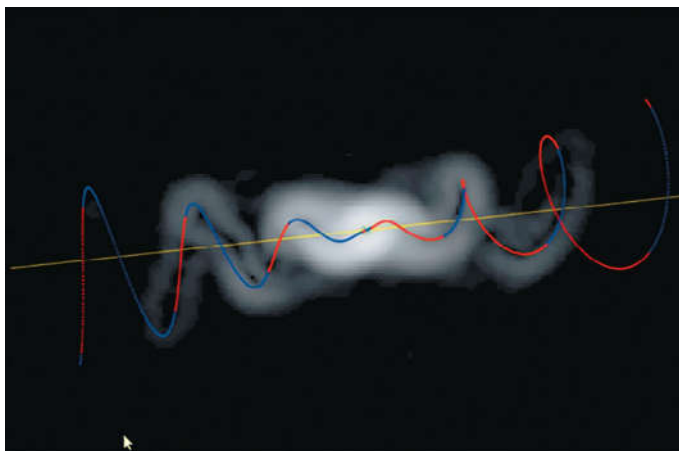
Автор со своими многолетними данными мо-

нитинга радиопотока на радиотелескопе РАТАН-600 участвовал во многих программах исследования GRS1915 + 105 и других микрокварзаров. В GRS1915 + 105 детектированы яркие радиовспышки, коррелирующие с повышением потока в мягком рентгеновском диапазоне. Внутри системы обязательно формируются релятивистские струи; именно в них происходят мощные радиовспышки – это разлетающиеся облака синхротронно-излучающих релятивистских частиц. Короткие (менее 60 а.е.) компактные струйные выбросы, вероятно, существуют в объекте почти постоянно, и их мы

*График кривых блеска SS433 на трех частотах, измеренных на РАТАН-600 в 2013–2016 гг. Источник показал множественную вспышечную активность разной яркости и продолжительности. CAO РАН.*

видим как оптически толстый источник по спектру полного потока в радиодиапазоне. Если в джете развиваются внутренние ударные волны, то и скорость его движения, интенсивность радиоизлучения и линейная поляризация быстро (в течение нескольких часов) вырастают в несколько раз, а спектр излучения становится оптически

Рентгеновская двойная система SS433 в созвездии Орла. Радиоизображение получено в 2006 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA с применением специального увеличивающего контраст деталей фильтра (NRAO, США). На снимок нанесена кинематическая модель движения струй. По данным К. Бландел и М. Болера (2003).



тонким. Причина генерации внутренних ударных волн не совсем понятна, но, вероятно, она связана с нестационарным потоком вещества, попадающего в джеты из аккреционного диска. Процессы в близкой к керровской черной дыре области крайне неустойчивы: часть вещества “проваливается” под горизонт событий и навсегда исчезает для внешнего наблюдателя, а часть вещества устремляется в струи, и там создаются условия ударного взаимодействия.

Новые тонкие расчеты внутренней структуры диска и сравнение временных параметров рентгеновского излучения позволили оценить спин черной дыры в GSR1915 + 105:  $a = 0,98$ . Какой физический процесс привел к экстремальной раскрутке столь массивной ЧД? Напрашивается единственный ответ: этот угловой момент “приобретен” в момент рождения

ЧД при коллапсе массивной звезды. Но тогда и она должна обладать очень высокой скоростью вращения. Альтернативным объяснением служит довольно длительный процесс медленной аккреции вещества на ЧД; в результате раскрутки старого радиопульсара в двойной системе возникает миллисекундный пульсар.

#### SS433 и ДРУГИЕ МИКРОКВАЗАРЫ

Объект GSR1915 + 105 исключительно интересен для астрофизиков, но есть другие объекты с отличительными признаками микроквazarов. В 1970-е гг. английские астрофизики Д. Кларк и П. Мурдин искали звездные остатки взрывов сверхновых звезд. Они обнаружили, что объект A1910 + 04 вблизи центра остатка сверхновой W50 в созвездии Орла является переменным рентгеновским и радиоисточником,

а его оптический спектр казался очень необычным. Почти сразу стало ясно, что это А-звезда под № 433 из каталога ярких эмиссионных звезд (LS) Б. Стефенсона и Н. Сандулека (1977) и радиоисточник из 4С-каталога (четвертый Кембриджский радиообзор на волне 178 МГц), опубликованный в 1967 г. Оптический спектр с “подвижными” эмиссионными линиями водорода и нейтрального гелия удалось объяснить с помощью модели двойного выброса — когда оптическое излучение идет из прецессирующих струй, движущихся от двойной системы со скоростью 78 тыс. км/с. Впервые астрономы столкнулись с возможностью природы ускорить сгустки вещества до субрелятивистских скоростей.

В статье в журнале “Nature”, опубликованной в конце 1978 г., нобелевский лауреат по физике (1974), британский астрофизик М. Райл с колле-

гами сформулировали идею о том, что затменная рентгеновская двойная система SS433 с ЧД (расположена в 5 кпк от нас; Земля и Вселенная, 1980, № 4) – это новый тип радиозвезд. Она очень напоминает внегалактические объекты, подобные знаменитому блазару BL Lac в созвездии Ящерицы (принадлежащий к ядрам активных галактик,  $z = 0,069$ ). Важно было бы найти в Галактике полный аналог BL Lac – микроблазар (источник, струя которого направлена точно в сторону Земли). Такой источник показывал бы очень высокую яркость за счет релятивистского усиления потока, а сама яркость менялась бы в масштабе нескольких секунд. Как показывают расчеты с применением формул специальной теории относительности, принимаемое излучение от источника синхротронного излучения, который движется на наблюдателя, будет усиливаться вследствие эффекта Доплера – подобно тому, как меняется частота гудка от приближающегося поезда. И, действительно, во многих источниках джет, направленный на нас, выглядит ярче, чем джет, направленный от нас. И, хотя в некоторых микрокварах эффект “биминга” проявляется в высокой степени асимметрии яркости струй в направлении

наблюдателя, но микроблазары пока не обнаружены, так как струи в них сильно коллимированы – то есть развернуты на угол  $1-3^\circ$ . Вероятность обнаружить такой объект со струей, направленной прямо на нас, в выборке и без того редких объектов крайне мала.

В 1981 г. выдающимся американским радиоастрономом Р. Джелмингом был впервые картографирован SS433 с помощью интерферометра VLA. Радиокарты SS433 определенно выявили меняющую яркость структуру джета, прецессирующую с периодом в 164 сут. Впервые в галактическом объекте – рентгеновской двойной – были открыты струйные выбросы.

Американским астрофизиком Б. Маргоном с коллегами была предложена кинематическая модель прецессирующих струй, в которых движется “изучающее подвижные эмиссионные линии” вещество.

Модель удивительным образом точно соответствовала общей картине всех наблюдений. В 1988 г. Р. Джелминг написал обзор “Радиозвезды” в классическом сборнике сотрудников NRAO “Галактическая и внегалактическая радиоастрономия”, где он в деталях описал не только наблюдательные данные о рентгеновских двойных, но и привел теоретические выкладки по

механизмам радиоизлучения радиозвезд и рентгеновских двойных. В том же году Р. Джелминг и К. Джонсон предложили численную модель радиоизлучения струй в SS433, основанную на генерации синхротронного излучения релятивистских частиц внутри движущихся по баллистической траектории сгустков. Картина настолько хорошо соответствовала изображениям SS433, полученным на VLA в 1981 г., что эта модель полых расширяющихся (в начале расширения оптически толстых, а потом оптически тонких) прецессирующих струй стала рабочей моделью и для SS433, и микроквараз. РДС нельзя увидеть как изображение двух звезд с аккреционным диском вокруг ЧД/НЗ; это представление – только следствие теории, согласованной со множеством наблюдательных фактов. Радиоструи, действительно, видны на изображениях SS433 и других микроквараз, полученных методами радиоинтерферометрии с разрешением – от одной угловой миллисекунды до одной угловой секунды.

#### ПАТАН-600 И МИКРОКВАРАЗЫ

В 1979 г. на радиотелескопе ПАТАН-600 начаты первые наблюдения SS433. Глубокий обзор “Холод” Ю.Н. Парийский решил прово-

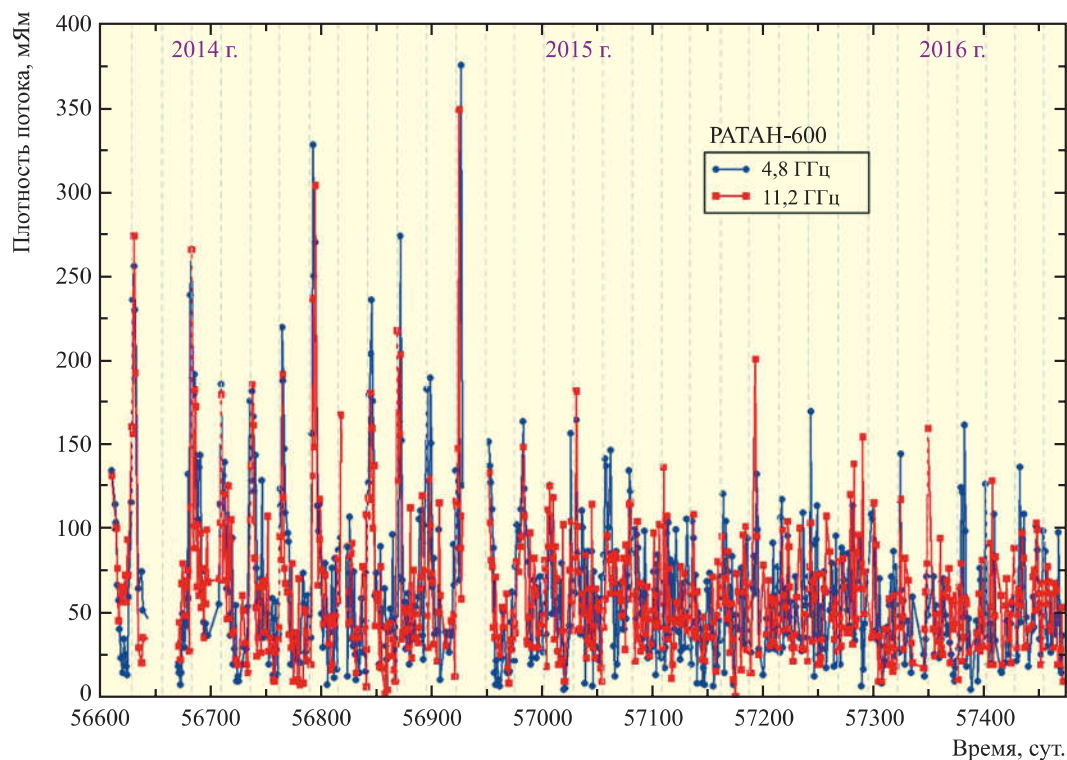


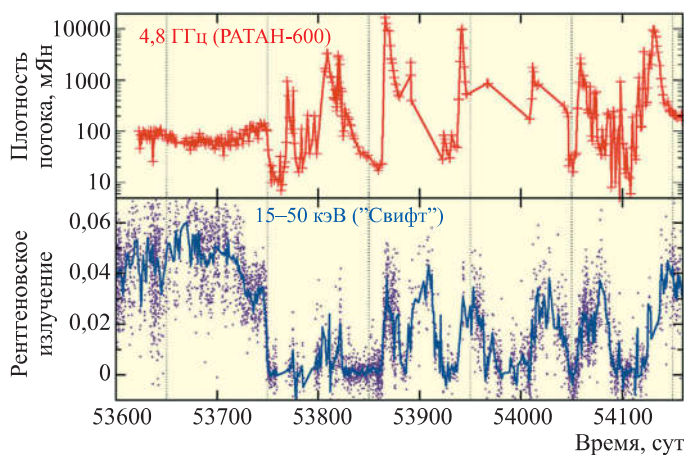
График кривой блеска микроквара LSI + 61d303, измеренный в 2013–2016 гг. на ПАТАН-600 (САО РАН). Отмечены фазы 0,6-орбитального периода, когда обычно происходят радиовспышки.

дить на склонении SS433 (см. статью О.В. Верхованова и Ю.Н. Парийского в этом номере). Стоит отметить, что, хотя SS433 – сильно переменный радиоисточник и его поток может меняться в несколько раз, в 100-дневном цикле “Холод-1” SS433 был удивительно стабилен. Эту особенность SS433 мы неоднократно наблюдали позже – активные и спокойные состояния объекта мо-

гут длиться 50–200 сут. В кривых спокойного радиоблеска автор нашел слабую модуляцию потока – и с орбитальным периодом 13,1 сут, и с периодом 6,5 сут. Очевидно, что эта модуляция связана с покачиванием струй из-за нутационных движений звезд в системе.

Рост чувствительности радиометров ПАТАН-600 позволил расширить исследования менее ярких микроквараз. Автор наблюдал микроквар LSI + 61d303 в Кассиопее – объекте, на который первыми обратили внимание канадские радиоастрономы Р. Грегори и А. Тейлор в 1984 г., когда они проводили обзор плоскости Галактики на

90-м телескопе NRAO на частоте 4,8 ГГц с целью обнаружить новые переменные радиоисточники, которые можно было бы связать с объектами, подобными SS433. Действительно, ученым удалось найти переменный источник GT0236 + 61 (GT – имя каталога по фамилиям авторов обзора), отождествленный со звездой LSI + 61d303, в состав которой входит Ве-звезда. Он оказался не только ярким рентгеновским источником и оптической звездой, но был единственным радиоисточником с периодическими вспышками, которые следовали с орбитальным периодом 26,5 суток.



Графики кривых блеска рентгеновской двойной Лебедя X-3 в период активности микроквара, измеренные в диапазоне на волне 4,8 ГГц на RATAN-600 (САО РАН) и космической обсерваторией "Свифт" в диапазоне 15–50 кэВ в 2008 г. Видна корреляция вспыхивающего рентгеновского и радиоизлучения, обусловленная формированием струйных выбросов и переизлучением оптических квантов звезды Вольфа – Райе в рентгеновские кванты.

Когда удалось определить параметры орбиты РДС, то стало ясно, что эти вспышки происходят после прохождения периастрона (точки максимального сближения) Ве-звезд и релятивистского объекта. Видимо, в процессе сближения происходит бурная аккреция вещества на ЧД (или НЗ), после чего формируются струйные выбросы, которые мы видим как периодические вспышки. Из-за трудностей определения угла наклона орбиты системы до сих пор не удалось точно определить массу компактного компонента, поэтому существуют альтернативные модели – и с ЧД, и с НЗ. Жаркие споры разгорелись по интерпретации радиокарт, полученных на интерферометре VLBA (США) в течение одной орбиты. По мнению американского радиоастронома В. Давана, большая ось распределения радиояркости объекта всегда была направлена в сто-

рону оптической звезды, что скорее напоминало ориентацию хвоста кометы, чем обычный для микроквazarов струйный выброс.

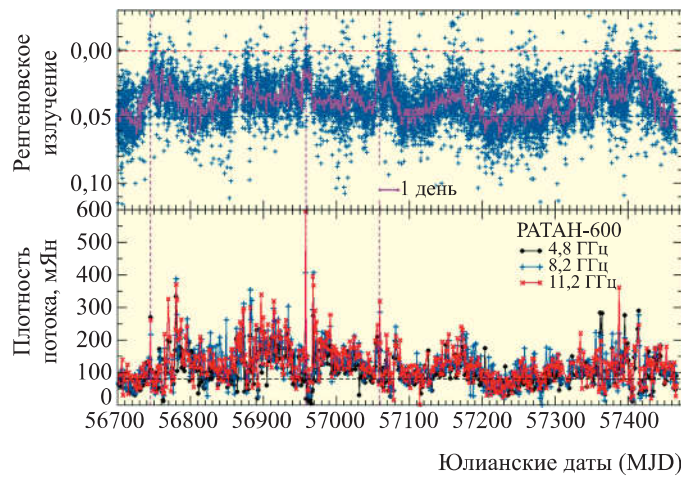
Немецкий астрофизик М. Масси придерживается точки зрения, что релятивистские быстро прецессирующие струйные выбросы создают основной узор и мы имеем дело с типичной для микроквazarов картиной образования струй в процессе аккреции на ЧД или НЗ. Если первая точка зрения, скорее, предполагает взаимодействие пульсарного ветра или магнитосферы НЗ с дисковым ветром Ве-звезды, то М. Масси настаивает на образовании струй во время периодически возникающей из-за сильной вытянутости орбиты системы аккреции вещества на ЧД. Весь спор сильно "подогревает" открытие гамма-излучения высокой энергии – от LSI + 61d303. На примере этой РДС астрофизики поняли, что микроквара-

ры могут быть мощными источниками излучения самых высоких энергий, измеряемых в тераэлектронвольтах (!).

Начиная с 2013 г., автор проводит почти ежедневные наблюдения системы на двух частотах, чтобы полностью покрыть измерениями один орбитальный период. Уже измерены кривые блеска в течение более 30 орбитальных периодов, то есть получены данные на частоте 4,8 ГГц по 30 радиовспышкам от LSI + 61d303. Свойства вспышек заметно менялись с изменением фазы открытого Б. Грегори 4,6-летнего периода, однако мы подтвердили стабильность орбитального периода:  $26,5 \pm 0,02$  суток.

Другим источником постоянного мониторинга является не менее интересная рентгеновская двойная Лебедь X-3, состоящая, скорее всего, из ЧД и находящейся на орбите звезды Вольфа – Райе (29 тыс. св. лет от

Графики кривых блеска рентгеновской двойной Лебедь X-3 в спокойный период микроквазара, измеренные в 2013–2016 гг. на РАТАН-600 (САО РАН) и с помощью космической обсерватории "Свифт" в диапазоне 15–50 кэВ. Обнаружена высокая степень (0,9) антикорреляции рентгеновского и радиоизлучений. Ось рентгеновского потока для наглядности направлена вниз.



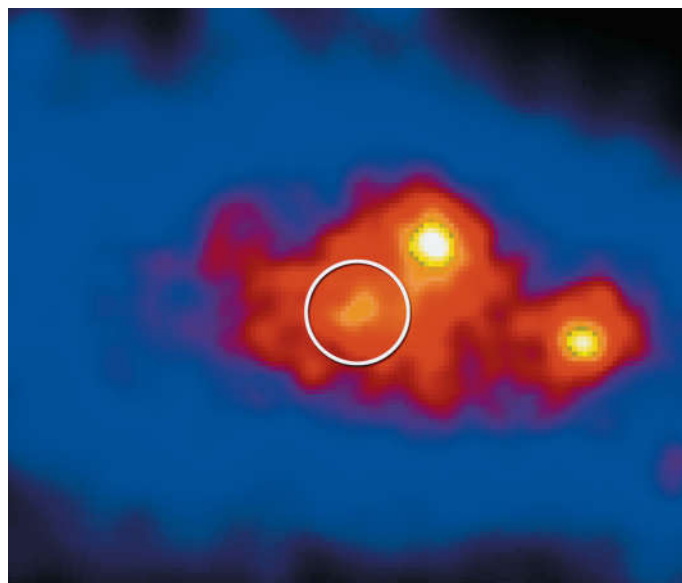
нас). Летом 2009 г. во время мощной радиовспышки нам с помощью итальянского научного спутника "AGILE" удалось обнаружить гамма-излучение от РДС Лебедь X-3 на энергиях выше 0,5 ГэВ. Таким образом, еще один микроквазар показал способность излучать кванты самых высоких энергий. С момента драматического открытия в 1972 г. Б.Р. Грегори серии гигантских радиовспышек, когда поток вырос от 0,1 Ян до 22 Ян, микроквазар стал третьим по яркости радиоисточником в на-

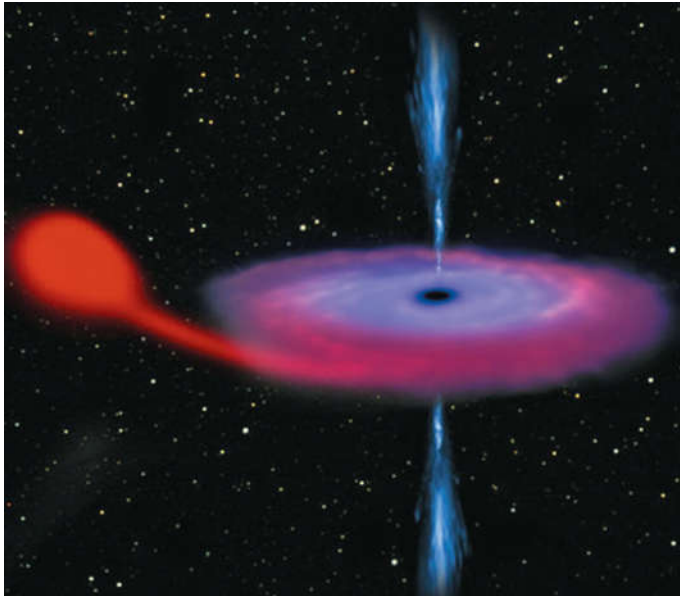
шей Галактике после остатков исторических сверхновых Крабовидной туманности и Кассиопеи А (Земля и Вселенная, 2008, № 1).

С тех пор источник несколько раз вспыхивал до подобного уровня потока, и многие вспышки были измерены на РАТАН-600. Во всех случаях мощные вспышки

можно интерпретировать как кратковременную (в течение 1–3 сут) генерацию облака релятивистских электронов внутри быстро расширяющегося струйного выброса вещества. Работает численная модель движущихся с релятивистской скоростью отдельных струйных сегментов, излучающих и поглощающих

Область гамма-излучения вокруг микроквазара Лебедь X-3 (обведена кружком), состоящего из черной дыры и звезды Вольфа – Райе. Самые яркие источники гамма-излучения, как правило, – РДС. Изображение получено 26 ноября 2009 г. с помощью телескопа LAT на космической гамма-обсерватории "Ферми". Фото NASA.





*Художественное представление рентгеновской двойной V404 Лебеда. Источник включает нормальную звезду, от которой под действием гравитации течет вещество на черную дыру, закручиваясь в тонкий диск и постепенно разогреваясь до температуры теплового рентгеновского излучения. Яркие струи образуются, если темп аккреции приближается к критическому, обусловленному пределом Эддингтона.*

синхротронное излучение, предложенная испанским астрофизиком Х. Марти с коллегами в 1992 г. На основе этой модели во всех вспышках движение вещества в струе считается умеренно релятивистским, обладающим скоростью, равной 0,3–0,6 скорости света.

Следует упомянуть диаграмму эволюции рентгеновского излучения (HID): “жесткость – светимость”. Оказалось, что все микроквазары с ЧД в рентгеновском диапазоне ведут себя одинаково – активность начинается с жесткого низкого состояния, переходит в высокое, сдвигается в сторону мягкого и высокого, затем совершает несколько возвратных движений в промежуточном состоянии (при этом возможны яркие радиовспышки – формирование релятивистского джета); нако-

нец РДС возвращается в исходное состояние. Британский астрофизик Р. Фендер с коллегами построил логически связанный сценарий, в котором все стадии эволюции определяются соотношением темпа аккреции, геометрией короны и диска и формированием струй. Удалось связать эту картину с эволюцией излучения (активности) ядер активных галактик и квазаров, у которых существуют подобные фазы эволюции. В очередной раз для аналогии квазары–микроквазары нашлось физическое обоснование.

В изучении свойств аккрецирующих черных дыр во всем спектре масс, светимостей, типов объектов и струй принимали участие многочисленные группы ученых. Возникла идея нанести на один график “светимость дже-

та – рентгеновская светимость” все активные источники с аккрецирующими ЧД. Оказалось, что они – от РДС, центральной ЧД в Млечном Пути, к далеким радиогалактикам – подчиняются одной зависимости, получившей название “фундаментальная плоскость”. В результате можно говорить о том, что существует таинственный механизм, который объединяет все аккрецирующие ЧД. Оказалось, что светимость джета (радиосветимость) пропорциональна рентгеновской светимости диска в степени 0,7 (если все величины нормировать на единицу массы аккрецирующей ЧД).

МИКРОКВАЗАР V404 ЛЕБЕДЯ

Удивительная способность микроквазаров испускать кванты от радио-

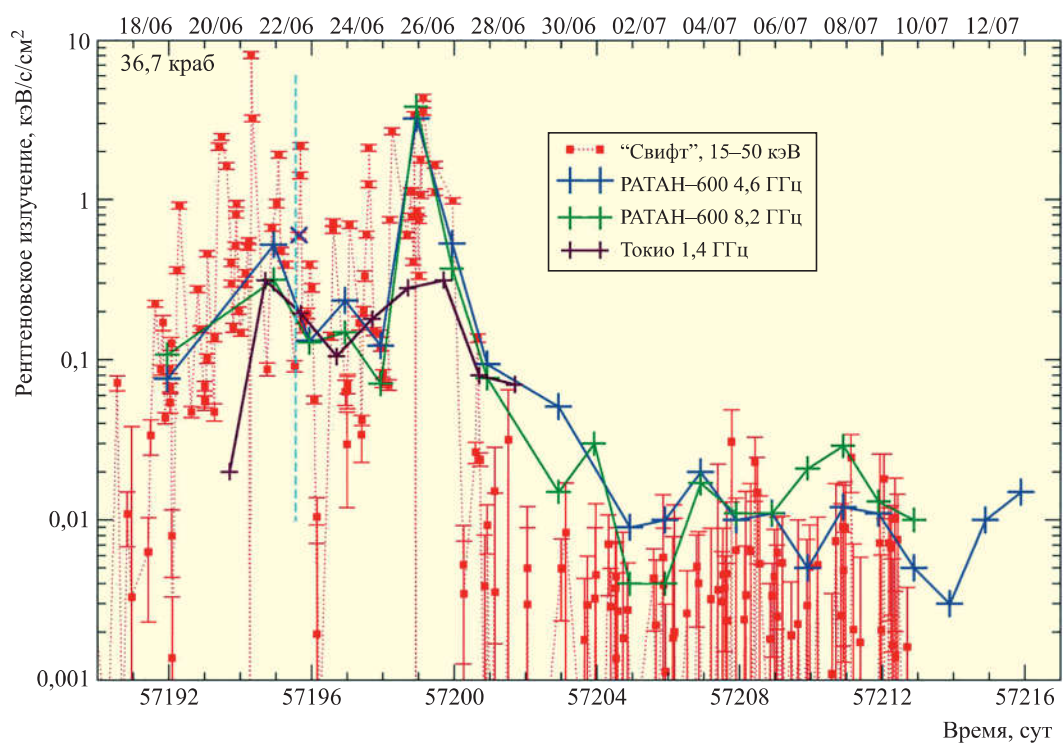


График кривой блеска рентгеновской новой V404 Лебедя в течение вспышечного состояния, измеренный в июне 2015 г. на РАТАН-600 (САО РАН) и с помощью космической обсерватории "Свифт" в диапазоне 15–50 кэВ.

частот и гамма-лучей привела к тому, что изучение этих объектов входит в ключевые программы всех крупных космических обсерваторий и многих наземных телескопов. Только так можно зарегистрировать необычные явления сразу на многих телескопах.

Летом 2015 г. произошло важное событие в астрофизике микроквazarов – после 26-летней спячки "проснулся" ми-

кроквazar V404 Лебедя (GS2023 + 338). Рентгеновская маломассивная двойная звезда GS2023 + 338 была открыта во время вспышки 22 мая 1989 г. с помощью японской космической обсерватории "Гинга" ("Ginga"). Рентгеновский поток достигал 17 крабов, то есть в 17 раз превосходил поток от знаменитой Крабовидной туманности в диапазоне энергий 10–35 кэВ. Тогда оптический объект увеличил свою яркость почти на 7<sup>m</sup>, достигая яркости 11,6<sup>m</sup> в фильтре V, то есть объект можно было наблюдать в любительский телескоп. Он оказался повторной новой V404 Лебедя (переменная звезда), которая уже вспыхивала в 1938 г.

и 1956 г. В 1990-е гг. система была динамически разрешена в оптических спектроскопических измерениях. На расстоянии 7400 св. лет от Земли на орбите с периодом 6,5 сут в двойной системе находятся два звездных объекта: ЧД массой около 11 M<sub>☉</sub> и оранжевый субгигант – звезда класса K0 массой 0,3–0,5 M<sub>☉</sub> и температурой фотосферы 4700 К. По-видимому, это РДС, в которой субгигант, заполняя свою полость Роша, передает вещество на ЧД, в результате образуется горячий аккреционный диск, который постепенно заполняется для того, чтобы стать достаточно вязким и разогреться настолько, что система

становится хорошо видна в рентгеновском диапазоне. Расстояние было определено по измерениям годичного параллакса радиоизлучения от V404 Лебеда с помощью американской интерферометрической системы VLA + VLBA + GBT. В этой РДС нерегулярно возникают релятивистские выбросы вещества из внутренних частей около ЧД.

15–26 июня 2015 г. рентгеновский поток от V404 Лебеда в диапазоне 15–50 КэВ достигал 40 крабов; по измерениям российско-европейской космической обсерватории «Интеграл» (60–300 кэВ) был даже ярче – поток доходил до 50 крабов, то есть в несколько тысяч раз превышал спокойное состояние, которое продолжалось 26 лет. В указанные дни автор ежедневно регистриро-

вал радиоизлучение на пяти частотах – 2,3, 4,6, 8,5, 11,2 и 21,7 ГГц – с помощью радиотелескопа РАТАН-600 на уровне 50–500 мЯн. 26 июня, спустя несколько часов после яркого рентгеновского всплеска, радиопоток V404 Лебеда вырос в 30–40 раз: от 0,05 янских (в предыдущий день) до 4 янских, что в несколько раз превышает максимальный уровень потока вспышки 1989 г. Он оказался исключительно высоким из всех микрокварзаров.

Нам посчастливилось зарегистрировать сам момент формирования релятивистского струйного выброса вещества из полюсов аккреционного диска вокруг черной дыры. Во время ярких рентгеновских вспышек V404 Лебеда в его гамма-спектре была зафиксиро-

рована аннигиляционная линия на энергии 511 кэВ; это говорит о том, что и этот источник является поставщиком антиматерии в МЗС.

Итак, микрокварзары (объекты с ближайшими к нам ЧД) представляют непреходящий интерес как для астрофизиков, так и для физических лабораторий, в которых на основе огромного потока данных можно проверять очень глубокие релятивистские теории, связанные с физикой черных дыр. Эти объекты удивительно напоминают ядра обычных галактик и квазары, поэтому возникла счастливая возможность на основе менее длительных исследований микрокварзаров в нашей Галактике проследить эволюцию и взаимодействие вещества вокруг сверхмассивных ЧД в других галактиках.

## Информация

### **«Юнона» вышла на орбиту Юпитера**

4 июля 2016 г. американская АМС «Юнона» («Juno», «Jupiter Polar Orbiter»), стартовавшая 5 августа 2011 г. с мыса Канаверал, вышла на орбиту вокруг Юпитера, преодолев 2,8 млрд км (18,7 а.е.), чтобы исследовать его происхождение и эволюцию (Земля и Вселенная, 2011, № 6, с. 31).

В ноябре 2016 г. намечено включение научной аппаратуры станции. В течение года «Юнона» сделает 33 оборота вокруг планеты, будет наблюдать самые мощные в Солнечной системе полярные сияния и антициклон (Большое Красное Пятно), пролетая над южным и северным полюсами Юпитера. Станция займется изучением атмосферы, гравитационного и магнитного полей, внутреннего строения планеты-гиганта. На ней установлено 9 научных приборов (микроволновый радиометр определит динамику и строение слоев атмосферы, магнитометр и

прибор для регистрации положения относительно магнитного поля, детектор ионов различных элементов в атмосфере, спектрометр и УФ-спектрометр для регистрации полярных сияний). Для защиты от радиации инструменты АМС помещены в титановый корпус. Кроме того, она оснащена трехцветной неподвижной видеокамерой разрешением 3–15 км, и общественность будет иметь возможность выбирать, какие снимки делать с ее помощью.

По плану «Юнона» завершит свою миссию в 2018 г.

Пресс-релиз NASA,  
4 июля 2016 г.