

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
(САО РАН)

УДК 520; 523.3; 523.9; 524
№

УТВЕРЖДАЮ

Директор САО РАН



В.В. Власюк

«15» декабря 2016 г.

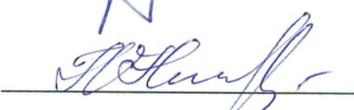
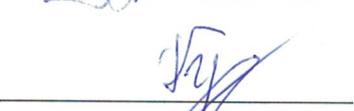
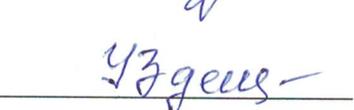
КРАТКИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ОТЧЁТ

о ходе выполнения научно-исследовательской работы по теме
«РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СТРУИ МИКРОКВАЗАРОВ В МНОГОЧАСТОТНОМ
МОНИТОРИНГЕ ВСПЫШЕЧНОГО ПЕРЕМЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ»
Программы ОФН-17
«Межзвездная и межгалактическая среда: активные и протяженные объекты»
ЗА 2016 ГОД

Отчет принят на заседании ученого совета САО РАН «13» декабря 2016 года
(протокол №351).

Нижний Архыз
2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы Зав.лаб. РА, д.ф-м.н.		С.А. Трушкин (введение, раздел 1, заключение)
Исполнители темы зав.лаб. РК, к.ф-м.н.		Н.А. Нижельский (раздел 1)
с.н.с. лаб. РК		П.Г. Цыбулев (раздел 1)
с.н.с. лаб. РА		Н.Н. Бурсов (раздел 1)
вед. инженер САО РАН		Г.В. Жеканис (раздел 1)
ст. техник		И.Е. Кривлина (раздел 1)
Нормоконтролер		Узденова Ш.А.

РЕФЕРАТ

Отчет 12 с., 1 прил.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕЛЕСКОПЫ, СВЕТОПРИЁМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА КОСМОЛОГИЯ, ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, БАЗЫ ДАННЫХ

Цель работы - осуществление научной и научно-технической деятельности, в том числе проведение фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, в области астрономии и смежных с ней наук.

В рамках проведения этапа были выполнены интенсивные исследования выборки микроквazarов — рентгеновских двойных систем с релятивистскими струйными выбросами вещества из центральных областей вокруг аккрецирующей черной дыры.

Тема включает мониторинг выборки микроквazarов с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в диапазоне частот от 2 до 22 ГГц с целью более ясного определения природы струйной активности и связи ее с процессами аккреции на релятивистские компоненты. Наблюдения выполнялись почти ежедневно (около 320 дней - с 9 января по 30 декабря 2016 года) на радиометрах 2.3, 4.6, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц и на трех антеннах телескопа «Северный сектор», «Южный сектор» и «Южный сектор с перископом». С 10 ноября 2016 года был восстановлен радиометр на частоте 30 ГГц в штатном комплексе широкополосных радиометров. Наблюдения на «Южном секторе» выполнены на трех-частотном комплексе радиометров «Эридан» (4.7, 11.2 и 21.7 ГГц).

Были исследованы микроквazarы SS433, GRS1915+105, Cyg X-1, Cyg X-3, LS5039, V4641 Sgr и LSI+61d303. Для точной калибровки и сравнительного анализа исследовались несколько ярких квazarов с плоскими спектрами (J2007+40, J2015+37, J0014+61, J0244+62), которые тоже являются источниками с релятивистскими струями. В почти ежедневном режиме наблюдались несколько вторичных калибраторов (3C286, 3C48, 3C161, 3C138, NGC7027 и др.).

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	9
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	10
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	10

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

LOFAR - европейский радиоинтерферометр метрового диапазона, который разработан для исследований широкого класса космических источников

РАТАН-600 - рефлекторный радиотелескоп Российской академии наук, входящий в состав крупных телескопов САО РАН

SMA — субмиллиметровая антенная решетка, расположенная на Гавайях

FERMI - космическая обсерватория, работающая в гамма-диапазоне

Swift/BAT -- космическая обсерватория Свифт оснащен телескопом алертных событий, работающий в диапазоне 15-50 кэВ, и на котором проводится постоянный мониторинг нескольких сот космических источников.

MAXI - рентгеновский монитор на борту МКС.

АЯГ - ядра активных галактик

НЗ - нейтронная звезда

ЧД - черная дыра

ВВЕДЕНИЕ

Исследования переменного радиоизлучения рентгеновских двойных систем с релятивистскими струями дает уникальную возможность найти взаимосвязь процессов аккреции вещества на релятивистский компонент (черную дыру или нейтронную звезду), перетекающей с нормальной звезды. Процессы образования струйных выбросов до сих пор не определены однозначно, хотя существует несколько теоретических моделей, применимых и для звездных и для внегалактических объектов. Радиоизлучение является хорошим индикатором периодических или спорадических процессов нестационарной аккреции в объектах данного типа. Причем, что особенно важно, в микрокварах все процессы идут на несколько порядков быстрее, чем в квазарах, поэтому их излучение легче и эффективнее исследовать. С другой стороны, исследуя суточную или недельную переменность квазаров и АЯГ, в центре которых находится аккрецирующая сверх-массивные черные дыры, мы можем проникнуть в процессы, аналогичные переменности микроквazarов на временах меньше секунды, если нормировать геометрию аккреционных дисков на гравитационный радиус ЧД. А такие исследования не доступны для обычных радиотелескопов.

Важным элементом современных астрономических исследований являются совместные программы в разных диапазонах — от радиоволн до гамма-лучей. Именно поэтому данные по интегральному радиопотоку, которые мы получаем в ходе исследований на радиотелескопе РАТАН-600, так востребованы астрономической общественностью.

На радиотелескопе РАТАН-600 создана процедура точных измерений плотностей потока в широком диапазоне частот от 2 до 23 ГГц в ежедневных измерениях источников ярче 30 мЯн, что позволяет проводить мониторинг практически всех ярких микроквazarов в Млечном пути. Тем не менее сотрудники лаборатории радиоконтинуума постоянно совершенствуют точность калибровки радиометров с помощью точных генераторов шума. В некоторых случаях мы применяем режим неподвижного фокуса, который увеличивает точность калибровки антенной системы.

1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках проведения этапа 2016 года были выполнены интенсивные исследования выборки микроквazarов.

Проведен мониторинг выборки микроквazarов с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в диапазоне частот от 2 до 22 ГГц с целью более глубокого определения струйной активности и связи ее с процессами аккреции на релятивистские компоненты. Наблюдения выполнялись почти ежедневно (около 300 дней из 350 - с 1 января по 30 декабря 2016 года) на радиометрах 2.3, 4.8, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц и на трех антеннах телескопа «Северный сектор», «Южный сектор» и «Южный сектор с перископом». Исследованы микроквazarы SS433, GRS1915+105, Cyg X-1, Cyg X-3, LS5039, V4641 Sgr и LSI+61d303. Для точной калибровки и сравнительного анализа исследовались несколько ярких квazarов с плоскими спектрами, которые тоже являются источниками с релятивистскими струями.

В целом в 2016 г. проведено свыше 5000 многочастотных наблюдений потоков от семи микроквazarов и около 30 квazarов на 2-6 частотах одновременно. То есть выполнены ~17000 измерений плотностей потока от космических источников. Средняя точность измерений составляет 3-10 процентов в зависимости от диапазона частот и от яркости источника. Для всех источников, где регистрируется поток в одном наблюдении, построены кривые блеска и/или мгновенные спектры. Кроме того наблюдались 3-5 опорных источников одновременно с исследуемыми. По объему и частотному диапазону подобные исследования не проводятся нигде в мире.

1.1

Релятивистские струи вещества из центральных областей аккреционного диска вокруг черной дыры (ЧД) иногда так меняют свои свойства. В 2014-2016 годах микроквazar Cyg X-3 находился в относительно спокойном состоянии, не было ни одной вспышки выше потока 0.5 Ян. Мы считаем, что природа спокойного радиоизлучения Cyg X-3, которое имеет преимущественно инвертированный или плоский радиоспектр, может быть связана с взаимодействием выброса вещества относительно близко над аккреционным диском, возможно на границе короны диска и окружающей околозвездной среды. Таким образом мы видим постоянно действующий генератор релятивистских частиц на границе короны, что называют в литературе по микроквazarам «компактным джетом». Впервые с помощью известного метода Ломба-Скаргла для временных рядов нам удалось открыть значимую периодическую модуляцию в этом спокойного радиоизлучения. Выделенный период изменений, равный 12.8 ± 0.2 дня, хорошо выявляется на

кривых блеска во всех частотных диапазонах. Он также выделяется и в одновременных данных измерений со спутника Swift. Вероятно природа этой модуляции — прецессия аккреционного диска, которая в свою очередь вызывает покачивание основания струйных выбросов. На почти пятилетнем материале мы сравнили детальные кривые блеска Cyg X-3 в жестком рентгеновском диапазоне (15-50 кэВ, Swift/BAT) с нашими радиоданными. Обнаружена высокая отрицательная корреляция: чем выше рентгеновский поток, тем ниже радиопоток, и наоборот. После сглаживания ежедневных радио и рентгеновских измерений на интервале 10 дней коэффициент корреляции вырастает до -0.9. Этот вывод сделан на основе материала около 2000 дней, что их радиояркость увеличивается в тысячи раз. Такое редкое событие мы зарегистрировали на радиотелескопе РАТАН-600 13 сентября 2016 года, когда поток Лебедь X-3 вырос от 0.01 до 15 янских на 4.6 ГГц за четыре дня. За две недели до этого мы предсказали эту вспышку на основе анализа прежних наблюдений: вспышка происходит после выхода системы из «ультрамягкого» состояния, когда при ее высокой яркости в мягком рентгеновском диапазоне (ниже 10 кэВ) в жесткой области (выше 15 кэВ) поток падает до нуля. Из вещества со звезды Вольфа-Райе при падении на ЧД создается горячий аккреционный диск, окруженный еще более горячей короной, а радиоволны идут от плотных коротких струй по обе стороны от диска. Внезапно поток вещества возрастает, центр диска еще больше разогревается, а корональное излучение и радиоструи исчезают. По заполненным веществом струям бегут ударные волны УВ, а в них эффективно ускоряются электроны, генерирующее синхротронное радиоизлучение и даже гамма-излучение. Релятивистское движение УВ и расширение струй приводит к быстрой эволюции оптически тонкого радиоизлучения на частотах 1-21 ГГц и затуханию вспышки.

1.2

В 2016 году выполнен мониторинг радиоизлучения микроквара, гамма-источника, LSI+61d303 на частотах 4.8 и 11.2 ГГц. В течение уже накопленных почти 33 последовательных орбитальных периодов ($P=26.5d$) мы наблюдали периодические вспышки, спустя несколько дней после прохождения периастра релятивистским объектом (черной дырой или нейтронной звездой), в ходе которого заполняется аккреционный диск и образуются струйные выбросы, в которых генерируется радиоизлучение. Построив среднюю по периодам орбитальную кривую блеска мы установили, что радиоизлучение эволюционирует от оптически толстого состояния в начале вспышки к оптически тонкому состоянию, когда спектральный индекс достигает максимального отрицательного значения -0.55, затем радиоизлучение постепенно возвращается к плоскому спектру с нулевым индексом. Такой индекс характерен для генерации релятивистских электронов

в сильных ударных волнах, в данном случае бегущих по телу газового джета. Все это хорошо соответствует теории эволюции синхротронного излучения при однократной генерации релятивистских электронов и последующего расширения области с этими электронами. Впервые на основе собственных наблюдений нам удалось точно определить период радиовспышек. Мы применили известный метод поиска периодичностей во временных рядах Ломба-Скаргла. Период вспышек оказался равен 26.62 ± 0.05 дням, что соответствует ранее найденному орбитальному периоду системы 26.5 дня. Правда, в отличие от работы Масси и др. (2013) кроме этой основной гармоникой мы не обнаружили никаких биений с периодичностью близкого периода, которая могла бы отвечать на прецессионное движение струй. Мы также обнаружили заметное смещение моментов наступления максимума радиопотока вспышек по мере изменения фазы сверхорбитального 4.6-летнего периода. Однако эти моменты не соответствуют предсказаниям эфемерид Грегори (2002) и Масси (2013), то есть можно предположить, что или этот 1667-дневный период медленно меняется, или он изначально определен неточно. Кроме того мы впервые заметили, что смещение максимума радиопотока вспышек происходит скорее скачком, а не плавно в диапазоне орбитальных фаз 0.4 — 0.8. Мы также обнаружили заметное смещение моментов наступления максимума радиопотока вспышек по мере изменения фазы сверхорбитального 4.6-летнего периода (P2). К тому же и сами максимумы заметно понизились по уровню на фазах $P2=0.1-0.4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводимые по данной программе наблюдения остаются серьезным аргументом в организации алертных (ToO) программ по исследованию активных процессов во всем классе космических источников со струйными выбросами — ядрах активных галактик и микрокварах. Прекрасным примером таких алертных наблюдений служат наши исследования летней вспышки микроквара V404 Cyg, когда в течение одних суток радиопоток вырос в 40 раз. Несомненно эта вспышка ассоциируется с активностью в гамма-диапазоне (Интеграл, AGILE, FERMI) (Pianto et al. 2017). Причем до этого поток от источника был ниже порога обнаружения на крупных радиотелескопах.

В будущей работе мы сосредоточимся на исследовании уже измеренных временных и спектральных характеристик кривых радиоблеска, их сравнение с исследованиями в других диапазонах, построение адекватной модели радиопеременности и поиск новых закономерностей в переменном излучении микрокваров.

Намечены новые циклы измерений выборки микрокваров. Это в первую очередь продолжение цикла исследований LSI+61d303, чтобы добиться полного заполнения всего 4.6- летнего периода (1667 дней) этого источника.

Продолжается постоянный мониторинг активности микрокваров с целью оперативного оповещения астрономической общественности о вспышечных событиях в микрокварах.

Этой цели служат и поданные и принятые заявки на наблюдения микрокваров в миллиметровом диапазоне (SMA), гамма-диапазоне (FERMI и ИНТЕГРАЛ) и совместные программы по мониторингу с AMI (15 ГГц) и др. Наконец, мы уделяем внимание развитию метода многоазимутальных измерений на антенной системе «Южный сектор с плоским отражателем» и чувствительным радиометрам кабины N3. Это существенно расширит возможности телескопа для исследования внутрисуточной переменности микрокваров.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В ИНОСТРАННЫХ РЕФЕРИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

1. Punsly, B., Rodriguez, J., Trushkin, S.A., The Accretion Flow-Discrete Ejection Connection in GRS 1915+105, 2016, The Astrophysical Journal, 826, 5

В РОССИЙСКИХ РЕФЕРИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

1. Трушкин С.А., Радиоизлучение микроквazarов, 2016, Земля и Вселенная, N5, с. 24-50

В МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЯ

1. Trushkin, S. A., Nizhelskij, N. A., Tsybulev, P. G., Zhekanis, G.V., The giant radio flare of Cyg X-3 in September 2016, 2016, Stars: from collapse to collapse: Proc. Conf. held at Spec. Astrophys. Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 3-7 Oct. 2016, ASP Conf. Ser., 4pp.
2. Trushkin, S. A., Nizhelskij, N. A., Tsybulev, P. G. 900-day radio monitoring of X-ray binary LSI+61d303 with RATAN-600 telescope , EWASS-2016, Symposium 15: Exploring pulsar formation, evolution and magnetic field: from low mass X-ray binaries to magnetars Athens, Greece, 2016, 4-8 July.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ (ТЕЛЕГРАММЫ И ЦИРКУЛЯРЫ)

1. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., 2016. The high radio fluxes from NGC1275, The Astronomer's Telegram, N.9791
2. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. The predicted giant flare of Cyg X-3 occurs, The Astronomer's Telegram, N.9501
3. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. A third bright radio flare of SS433 during 2016, The Astronomer's Telegram, N.9481
4. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. The beginning of a giant radio flare from Cygnus X-3, The Astronomer's Telegram N.9444.
5. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. A new state of quenched radio emission from microquasar Cyg X-3, The Astronomer's Telegram N.9416
6. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Erkenov, A., 2016. Monitoring of 87GBJ1929+0909

with RATAN-600 after ESE, The Astronomer's Telegram N.9092

7. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. New RATAN-600 data for Cygnus X-1, The Astronomer's Telegram N.9089
8. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., 2016. High radio fluxes of PKS2023-07 measured with RATAN-600, The Astronomer's Telegram N.8893
9. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Erkenov, A., 2016. RATAN-600 data for Fermi J0035+6131, The Astronomer's Telegram N.8718