

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.212.01

протокол N 12 от 02 декабря 2024 г.

Председатель: доктор физ.-мат. наук,
профессор, академик РАН
Балега Юрий Юрьевич

Учёный секретарь: кандидат физ.-мат. наук
Шолухова Ольга Николаевна

Состав совета – 13 человек, присутствуют – 12:

д.ф.-м.н., академик РАН, Балега Ю. Ю. 01.03.02

д.ф.-м.н., Клочкова В.Г. 01.03.02

к.ф.-м.н., Шолухова О.Н. 01.03.02

д.ф.-м.н., Васильев Е.О. 01.03.02

д.ф.-м.н., Глаголевский Ю.В. 01.03.02

д.ф.-м.н., Караченцев И.Д. 01.03.02

д.ф.-м.н., Макаров Д.И. 01.03.02

д.ф.-м.н., Моисеев А.В. 01.03.02

д.ф.-м.н., Панчук В.Е. 01.03.02

д.ф.-м.н., Романюк И.И. 01.03.02

д.ф.-м.н., Трушкин С.А. 01.03.02

д.ф.-м.н., Сачков М.Е. 01.03.02

Председатель:

Последней, на сегодняшний день, нам предстоит рассмотреть работу Антона Валерьевича Шевченко, мониторинг рентгеновских двойных звёзд со струйными выбросами. Работа представлена на соискание степени кандидата физ.-мат. наук. Научный руководитель - Трушкин Сергей Анатольевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Работа выполнена в нашей обсерватории.

Официальные оппоненты: Игорь Иванович Зинченко, институт прикладной физики РАН Нижнего Новгорода, доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. И Михаил Александрович Харинов - кандидат физ.-мат. наук, институт прикладной астрономии РАН, ученый секретарь. Ведущая организация - Южный федеральный университет. Секретарь сообщит, что с документами.

Секретарь:

С документами все в порядке, все экзамены сданы, все бумаги соответствуют требованиям.

Председатель:

Если нет вопросов к секретарю, предоставим слово нашему соискателю. Пожалуйста, вам 20 минут.

Шевченко А.В.:

Я приветствую всех участников заседания, старших коллег и представляю Вашему вниманию доклад, посвященный мониторингу двойных звёзд со струйными выбросами. В состав таких звезд входят релятивистский компаньон, это либо нейтронная звезда, либо черная дыра, и обычная звезда-донор. Здесь важно представлять, что вещество со звезды-донора, попадая в область притяжения релятивистского компаньона образует аккреционный диск. Часть вещества вращается в этом диске и проваливается в релятивистский компаньон или на его

поверхность, а часть вещества выбрасывается в виде противоположно направленных двух релятивистских струй. Особый интерес микроквazarы представляют потому, что переменность, которую мы наблюдаем, происходит на гораздо меньших временных масштабах, чем в случае квазаров. Таким образом, мы можем наблюдать эволюцию источника на масштабах человеческой жизни. Актуальность исследования подтверждается на основе многолетней программы мониторинга на радиотелескопе РАТАН-600, в результате которого накоплен огромный материал по временной и спектральной переменности микроквazarов. Конструкция телескопа, которая является уникальной, позволяет проводить наблюдения независимо на нескольких секторах антенны, а также получать квазиодновременные широкополосные радиоспектры. Систематические наблюдения предоставляют возможность исследовать эволюцию радиоизлучения как во время вспышек, так и в спокойном состоянии систем, что важно для понимания механизмов формирования и эволюции компактных джетов. Используя модели синхротронного излучения мы способны определить геометрию струйного выброса, величину магнитного поля в нём, а также энергетический спектр релятивистских электронов в джете. Эти оценки являются ключевыми для понимания механизмов ускорения частиц и энергетики джетов.

Как объекты с черными дырами, микроквazarы являются индикаторами различных высокоэнергетических процессов. Это сверхкритическая аккреция, распространение релятивистских ударных волн, коллимация джетов, генерация быстрых частиц и гамма-излучение высоких и сверхвысоких энергий. Таким образом, целью данной работы стало исследование временных и спектральных характеристик радиоизлучения микроквazarов на телескопе РАТАН-600.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: обработка и калибровка наблюдений; быстрое

реагирование на изменения состояния источников; исследование переменного излучения, как в режиме суточных, так и внутрисуточных измерений; поиск и анализ закономерностей в кривых блесках и радиоспектрах; исследование различных фаз взаимодействия аккреционного диска и джета; применение существующих моделей вспышечного радиоизлучения, а также сравнение полученных результатов измерений с данными других телескопов.

Структура диссертации включает в себя введение, три главы, заключение, список литературы и одно приложение.

Первая глава посвящена инструментам и методам долговременного мониторинга радиоисточников, а именно микроквazarов на телескопе РАТАН-600. Здесь кратко описаны штатные режимы работы антенны, большее внимание уделено режиму многоазимутальных наблюдений. Основные параметры антенны в этом режиме измерены в наблюдениях калибровочных источников. Эффективность антенны, как вы видите на графике, заметно падает по краям. Это связано с ограниченной апертурой южного сектора, максимальный размер которого составляет четверть круга. Размер луча по траектории прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности менялся вследствие изменения параллактического угла.

Вторая глава посвящена результатам многоволновых исследований микроквazarов, где первый раздел посвящен источнику SS433, уникальной рентгеновской двойной системе, которая находится в состоянии сверхкритической аккреции. Это состояние проявляется в виде мощных оттоков вещества, как в форме ветра от аккреционного диска, так и в виде коллимированных струйных выбросов. В 2018 году мы наблюдали серию вспышек в данной системе, где в августе была зарегистрирована исторически ярчайшая из них. Здесь основным результатом совместной работы в наблюдениях радио- и рентгеновских диапазонах стало

обнаружение резкого падения интенсивности рентгеновского излучения в мягком рентгеновском диапазоне, в то время как в жестком рентгеновском диапазоне это значение практически не изменялось, что говорит о том, что механизмы, запускающие струйные выбросы, не подвергались изменениям, а падение интенсивности мягкого рентгеновского излучения мы связываем с усилением звёздного ветра от аккреционного диска, который частично поглощал это излучение. В частности, рентгеновские спектры, наблюдаемые в течение радиовспышек, были близки к спектрам, полученным в обсерватории Chandra в так называемом низком состоянии системы. Такое состояние не имеет отношения к орбитальной и прецессионной переменности в системе, что демонстрируется при помощи долговременных кривых блеска, полученных как в радиодиапазоне, так и по данным орбитальной рентгеновской обсерватории MAXI.

Второй раздел посвящен результатам многоволновых исследований источника GRS 1915. С 2019 по 2021 год мы наблюдали серию спорадических умеренно ярких вспышек, которые не превышали 1 Ян и происходили достаточно непредсказуемо, что говорит о том, что система может быстро переключаться из активного состояния в спокойное. При этом хорошо видно, что даже в спокойном состоянии системы, она может активно проявлять себя как в жёстком, так и в мягком рентгеновском диапазоне. В 2023 году мы наблюдали серию из двух исторически ярчайших вспышек, где плотность потока наибольшей из них, составляла около 6 Ян на частоте 2,3 ГГц. Это значение является ярчайшим за 30 лет наблюдения данной системы. Были измерены радиоспектры, а также проведены внутрисуточные измерения, где обнаружено, прежде всего, наиболее интересный результат, это квазипериодические осцилляции, где период составлял порядка 30 минут. Это позволяет сделать оценки размеров области радиоизлучения и говорит о том, что измерения быстрой переменности стало возможно проводить теперь и на РАТАН-600. Также

мы обнаружили экспоненциальный спад потока на стадии релаксации вспышки. Этот факт противоречит модели сферически расширяющегося плазмона и указывает на необходимость пересмотра существующих моделей. Как минимум для данного источника, а может и для микроквазаров в целом.

Третий раздел посвящен исследованию системы LS I+61deg303. Основным отличием данной системы от всех остальных являются периодические вспышки, которые возникают при достижении периастра, когда компоненты наиболее близки друг к другу. В этот самый момент мы и наблюдаем радиовыбросы. Также по результатам анализа временных рядов мы обнаружили две периодичности, одна из которых связана с орбитальным периодом системы, а вторая с прецессионным. Биение данных гармоник хорошо проявляется в так называемом сверхорбитальном периоде, когда мы видим плавное изменение интенсивности на промежутке четырёх с половиной лет. Чтобы подтвердить, что источник действительно является микроквазаром, мы построили 15 орбитальных периодов по фазе. И увидели классическую эволюцию спектрального индекса, когда перед вспышкой радиоспектр немного подрастает, то есть становится инвертированным, а потом постепенно укрупняется и после достижения максимума радиопотока возвращается в исходное состояние.

Основная работа была посвящена исследованию источника Лебедь X-3. Это наиболее интересная система, потому что, не имея чёткой периодичности, мы можем предсказывать в ней предстоящие радио вспышки. Перед гигантскими выбросами система переходит в сверхмягкое рентгеновское состояние. Это хорошо отражено на графике справа, когда жёсткое рентгеновское излучение резко падает практически до нулевых значений и то же самое происходит в радиодиапазоне. Спектр наблюдается достаточно инвертированным, что в принципе согласуется с

оптически толстым компактным джетом. Мы провели совместные наблюдения с тремя радио обсерваториями. Это радиоинтерферометр АМI-LA, который работал на 15 ГГц, и длинноволновый радиотелескоп LOFAR, который работал на частоте 143,5 МГц. Он подключился к нашим наблюдениям примерно спустя 2 недели после начала вспышки.

Для оценки параметров выброса и более глубокого исследования эволюции радиоизлучения были смоделированы наблюдаемые изменения радиоспектра, где наблюдалось смещение частоты завала в сторону более низких частот с определенной скоростью. Здесь задача стояла определить механизм поглощения низкочастотной компоненты радиоспектра.

Были выбраны основные механизмы, которые могли бы объяснить данное явление. Это синхротронное самопоглощение, свободно-свободное поглощение тепловой плазмы, свободно-свободное поглощение от экрана на переднем плане, а также эффект Разина-Цытовича. Самое главное, что здесь можно отметить, что эффект Разина-Цытовича практически во всех циклах моделирования показал неудовлетворительные результаты, а наиболее подходящими механизмами были определены синхротронное самопоглощение и свободно-свободное поглощение тепловой плазмы, смешанной с синхротронной излучающей плазмой в джете.

Второй раздел посвящен наблюдениям этой системы на РАТАН-600, как суточным, так внутрисуточным. В течение пяти лет, с 2019 по 2024 год наблюдались целые серии ярких гигантских вспышек, когда поток в течение от одного до трёх дней вырастал в тысячу раз. Так как орбитальный период данной системы составляет порядка 4,8 часа, было целесообразно проведение внутрисуточных измерений.

Первые же наблюдения сразу дали нам уникальные результаты. Первый результат — это наблюдаемый линейный тренд роста потока радиоизлучения на частоте 4,7 ГГц. Это указывает на то, что наблюдаемый профиль роста потока радиоизлучения, скорее всего, не

соответствует модели сферически расширяющегося плазмона. Мы предполагаем, что этот выброс расширяется только по одной координате, а поперечное сечение на временах нескольких часов практически не меняется.

Второй результат получен в ходе исследования эволюции спектрального индекса на временах нескольких часов. Полученные результаты хорошо согласуются результатами, полученными в предыдущем разделе. Здесь спектральный индекс в начале вспышки, близкий к двойке, как раз указывает на то, что вероятным механизмом низкочастотного завала в начале выброса является свободно-свободное поглощение. Другой интересной особенностью данной системы является наблюдательный факт, что радиовыбросы практически всегда сопровождаются яркими гамма-всплесками. Безусловно, наиболее вероятным объяснением вспышек в гамма-диапазоне является механизм обратного комптонского рассеяния. За весь период наблюдений зарегистрировано несколько серий гигантских выбросов, где наблюдались две, а то и три вспышки в одном цикле активности. Были измерены несколько таких серий вспышек, когда одна шла за другой, причем они сильно отличаются по эволюции спектра, но, тем не менее, каждая из них сопровождается ярким выбросом в гамма-диапазоне.

Практически все вспышки измерены в режиме внутрисуточных измерений, практически для всех вспышек подтвержден экспоненциальный спад, как и для системы GRS 1915, что является аргументом в пользу пересмотра существующих моделей. Неоднократно доказан линейный рост на стадии нарастания потока, что также подтверждает наши предыдущие предположения.

Таким образом, впервые на инструментальной базе антенной системы, Южный сектор с плоским отражателем и кабины вторичного зеркала №3 реализован метод внутрисуточных измерений дискретных

радиоисточников, который был применен для исследования микроквazarов SS 433, GRS 1915 и Лебедь X-3. Здесь важно отметить, что метод не новый, потому что группа наблюдений Солнца пользуется методом достаточно давно. Здесь наша задача заключалась в адаптации метода для наблюдений далеких радиоисточников. С этой задачей мы успешно справились. И теперь на РАТАН-600 стало возможным наблюдать любые объекты в данном режиме.

Впервые по данным одновременных измерений нескольких радиотелескопов исследована эволюция спектра микроквзара Лебедь X-3 в низкочастотном диапазоне в течение яркой вспышки.

Впервые на телескопе РАТАН-600 проведены измерения внутрисуточной эволюции радиоспектра на начальной стадии выброса. Впервые проведены одновременные измерения в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах в течение ярчайшей вспышки в системе SS 433.

С помощью нового многоазимутального режима работы проводятся надежные двух-трехчастотные измерения плотностей потока на временах от нескольких минут до нескольких часов. Теперь на РАТАН-600 стало возможным полноценно заниматься внутрисуточной переменностью, и даже исследовать квазипериодические осцилляции. Длительные и многочастотные измерения кривых блеска и радиоспектров микроквazarов представляют собой уникальный наблюдательный материал, который требует глубокого анализа в будущем.

В эпоху открытых данных космических мониторинговых миссий (SWIFT, Fermi, MAXI), РАТАН-600 выполняет важнейшую задачу почти ежедневного патрулирования источников в радиодиапазоне. Все представленные результаты неоднократно апробированы на всероссийских конференциях. Автор имеет 21 публикацию по теме исследования, из которых 4 в рецензируемых изданиях, 4 по материалам конференции и 13 электронных публикаций.

Личный вклад автора — это самостоятельная обработка, калибровка и анализ данных мониторинга микроквазаров, совместное обсуждение результатов измерений в радиодиапазоне наравне с руководителем программы. Здесь важно отметить, что обработка, калибровка и анализ происходили одновременно с научным руководителем, но независимо друг от друга. Если угодно, таким образом мы пытались повысить точность наших результатов.

Публикация, посвященная внутрисуточным измерениям Лебедь X-3, а также опубликованные телеграммы и материалы конференций прошли автором апробацию результатов на выступлениях. Автор принимал непосредственное участие в подготовке текстов публикаций и участвовал в обсуждении результатов наравне с другими соавторами.

Таким образом, положения, выносимые на защиту, сформулированы следующим образом:

1. Проведен анализ эволюции кривых блеска и радиоспектров в течение гигантской вспышки в системе Лебедь X-3. В результате моделирования показано, что наиболее вероятным механизмом завала спектра на низких частотах является поглощение тепловыми электронами или синхротронное самопоглощение внутри источника. В процессе эволюции радиоспектра спектральный индекс ниже 1 ГГц менялся так, что частота завала сместилась к более низким частотам. Были оценены минимальная энергия, магнитное поле, средняя светимость источника.

2. Впервые на телескопе РАТАН-600 реализован метод многозигмутальных наблюдений дискретных источников, результатом которого стало исследование многочисленных мощных вспышек в микроквазарах на временах 5 минут до 6 часов. Показано, что рост радиопотока на начале фазе гигантских вспышек идет линейно от времени. Также показано, что это обусловлено конической геометрией, когда форма струйного выброса меняется только по одной координате.

Внутрисуточные измерения спокойного состояния Лебедь X-3 наряду с измерениями рентгеновской поляризации с помощью обсерватории IXPE привели к ключевому выводу, что данная система является ультраярким рентгеновским источником.

3. Летом 2018 года в период активности микроквара SS 433 на основе данных РАТАН-600 и рентгеновских обсерваторий исследовано несколько мощных вспышек. В августе зарегистрирована исторически самая яркая оптически тонкая вспышка. Обнаружено, что вовремя радиовспышек поток в мягком рентгеновском диапазоне падает в несколько раз, что согласуется с моделью звездного ветра, который блокирует излучение рентгеновских джетов.

Благодарю за внимание.

Председатель:

Коллеги, вопросы к Антону Валерьевичу, по его докладу. Радиоастрономы, пожалуйста.

Сачков М.Е.:

В главе 2 вы говорили про усреднение 15-ти периодов. А почему 15?

Шевченко А.В.:

Скажем так, это была единственная попытка такого анализа, так как плотность вспышек в других источниках с момента поступления в аспирантуру просто превысила все мыслимые и немыслимые масштабы, мы только и успевали переключаться от измерений одной вспышки к другой. Для данного источника, мы остановились на этом данном полученном результате и пошли дальше, так получилось.

Трушкин С.А.:

Это просто последние измерения, можно взять больше.

Председатель:

Сергей Анатольевич, у Вас еще будет время выступить.

Шевченко А.В.:

Поэтому я отметил, что данные полученные нами требуют дальнейшего глубокого и всестороннего анализа, потому что мы его только начали.

Председатель:

Так, еще вопросы?

Моисеев А.В.:

Методический вопрос. Раз вы используете Плоский сектор, то есть вы конкурируете с солнечниками. Как, вы наблюдаете по ночам, что ли, или как?

Шевченко А.В.:

Нет, не только по ночам. Благодаря Николаю Николаевичу Бурсову наша методика составления расписания для Южного сектора с плоским отражателем доведена до совершенства, и мы можем выбирать конкретные азимуты и не мешать солнечникам.

То есть мы можем наблюдать через азимут, или мы можем наблюдать не от минус 30 до плюс 30 азимута, а от нулевого до плюс 30.

Моисеев А.В.:

При том же положении Плоского сектора?

Шевченко А.В.:

Нет, положение антенны безусловно меняется. Имеется в виду, что мы не забираем всё наблюдательное время солнечников. Мы либо ждём, когда закончатся наблюдения Солнца, либо просим уступить наблюдательное время. То есть практически друг другу не мешаем.

Председатель:

Понятно. Еще вопросы коллеги по докладу?

Значит вы продвинулись в понимании природы микроквazarов. Главный вывод, скажите своими словами. Представьте, что перед вами

аудитория, не имеющая отношения к астрономии. И что бы вы им сказали о результатах вашей работы?

Шевченко А.В.:

Все признаки указывают на то, что в данных системах кроются физические механизмы еще более эффективные, чем те, что происходят в процессах ядерного распада или термоядерного синтеза, их КПД ниже, а здесь еще все более интересное, это имеет практическое применение, если разобраться с моделями.

Председатель:

Что конкретно?

Шевченко А.В.:

Энергетика протекающих физических процессов, гораздо более эффективнее, сильнее чем то, что нам было известно до того.

Председатель:

Энерговыделение?

Шевченко А.В.:

Энерговыделение, да.

Председатель:

То есть энерговыделение в окрестностях микроквazarов идет более интенсивно, с большей энергетикой, чем предполагалось раньше, да?

Валеев А.Ф.:

Аккреция более эффективный процесс, чем термоядерный синтез.

Председатель:

Так, вам будет дано слово. Понятно, так, еще, пожалуйста.

Пустильник С.А.:

Такого плана вопрос. Если я правильно понимаю, то вот эти конкретно микроквazarы, точнее черные дыры, которые там находятся, благодаря в том числе и вашим наблюдениям, сейчас являются, наверное, одними из самых исследованных? Правильно ли так сказать, что вот эти

чёрные дыры в нашей галактике, достаточно близкие, являются, благодаря в том числе и вашим усилиям, наиболее исследованными наблюдателями?

Шевченко А.В.:

Во-первых, РАТАН-600, наверное, единственный радиотелескоп, который проводит систематический мониторинг нескольких микроквazarов ежедневно. То есть, в первую очередь, если мы не будем получать данные, то их не будет вообще. Может по каким-то отдельным вспышкам и проводятся другие наблюдения, но целостной картины тогда не будет, об эволюции системы, как протекают процессы во времени и на длинных временных интервалах. А второе, это действительно, что черные дыры можно наблюдать напрямую, точнее процессы, протекающие вблизи черных дыр, возможно наблюдать только в системах, где происходит аккреция, квазары и микроквazarы. В этом смысле данные объекты представляют еще больший интерес.

Председатель:

Ясно, спасибо. Так, еще, пожалуйста.

Сотникова Ю.В.:

Микроквazarы не зря так называются, есть ли сходства в многоволновом поведении микроквazarов и квазаров?

Шевченко А.В.:

Безусловно, есть. Но, как я отметил, модели, которые используются для квазаров, при более пристальном их применении к микроквazarам показывают некоторые несоответствия, как и на стадии роста, так и на стадии затухания вспышек. Несмотря на то, что безусловно были предложены и другие модели непосредственно для моделирования процессов в микроквazarе, все равно есть противоречия и вот те результаты, которые мы получили это вклад в уточнение данных моделей, то есть эти результаты позволяют уверенно говорить о том, что все нужно пересматривать и совершенствовать в этом направлении.

Председатель:

Так, ну что, Иосиф Иванович предлагает закончить вопросы. Спасибо, Антон Валерьевич. Садитесь, пожалуйста. Так, теперь слово научному руководителю - Трушкину Сергею Анатольевичу.

Трушкин С.А.:

Чтобы не терять время, я просто попытаюсь зачитать. Конечно, понятно, что я мог это все рассказать. Но здесь немного текста, я немножко упусти некоторые основные моменты. Мы слышали яркое выступление Антона, и мне кажется, не стоит повторять некоторые вещи. Самое главное то, что исследование микроквazarов, предмет данной работы, проводится уже 50 лет.

С тех пор, как обнаружен был в остатке сверхновой W50 источник SS 433, тогда с 1979 года, мы начали систематические исследования этого объекта. Это действительно оказалось очень продуктивным исследованием, потому что мы обнаружили очень много всяких необычных явлений, связанных с этим объектом. И самое главное то, что в струйных выбросах в результате генерации ударных волн с магнитным полем происходило ускорение релятивистских частиц, электронов в основном, и они порождали синхротронное излучение.

Синхротронное излучение механизм достаточно хорошо известный и из квазарной тематики, и микроквazarной, да и во многих других местах. И это явилось тем самым предметом, который представлен в диссертации. За время учебы в аспирантуре Шевченко А.В. освоил все необходимые навыки обработки, проведения наблюдений, обработки измерений, и он правильно сказал, что приходилось нам в две руки делать обработку, и это приводило к тому, что более надежные данные удавалось получать, это очень важный элемент, потому что долгое время я находился в единственном числе при обработке микроквazarов. Сейчас у меня появился очень толковый коллега. Позднее Шевченко А.В. подключился к

введению нового прогрессивного метода многоазимутальных наблюдений на антенной системе Южный сектор с плоским отражателем на вторичном зеркале №3 в фокусе которого расположены высокочувствительные радиометры на две частоты. Благодаря этим измерениям на РАТАН-600 были получены уникальные данные по внутрисуточной переменности. То, что раньше считалось недостатком телескопа, что мы не можем наблюдать внутри суток, сейчас этот этап пройден, и это, в том числе заслуга Антона. Впервые стало ясно, что на начальной стадии многих вспышек поток нарастает по линейному закону, это оказалось свойством присущим всем микроквazarам. В исследовании яркой вспышки GRS 1915 впервые удалось обнаружить квазипериодические осцилляции на масштабах 30 минут, что раньше нам не удалось бы сделать без многоазимутальных наблюдений. В ходе выполнения данной работы по накоплению измерений стало ясно, что построение адекватной физической картины только наших данных недостаточно. И вот если вы посмотрите внимательно наши публикации, то понятно, что мы не могли полностью всю объемную картину микроквazarов создать на основе только данных РАТАН-600. Все-таки радиофотометрия достаточно ограниченный метод исследования. Нужны, конечно, рентгеновские данные и оптические данные, что, в общем, было сформулировано в работах, которые представляются в диссертации. В целом, результаты по исследованию вспышечного и спокойного излучения Cygnus X-3 являются ключевыми в работе Шевченко, что отражено в его соавторской статье, в престижном журнале Nature Astronomy, в которой после 50 лет исследования объекта впервые показано, что Cygnus X-3 является ультраярким рентгеновским объектом. То есть тот самый ULX, который часто упоминался в работах Сергея Фабрики, как вы знаете. Так что, в общем, этот объект неожиданно стал этим ULX только в нашей галактике. Долговременные исследования транзиентного источника GRS 1915 принесли свои плоды.

Зарегистрированы многочисленные вспышки, корреляции с которыми с рентгеновскими событиями были выявлены очень надежно. Особенно интересна вспышка в 2023 году, когда поток достигал рекордного уровня 6 Ян. В 2018 году в SS 433 произошло несколько ярких вспышек, одна из которых была очень яркая, то есть просто рекордно яркая, и на основе этих наблюдений были опубликованы работы, в которых эта вспышка рассматривается. Одна оптическая, а другая рентгеновская. Очень важный вывод, связанный с исследованием рентгеновской двойной системы LS I+61 303. Этот объект обнаружен сначала в радио диапазоне, потом он был отождествлен с яркой звездой эмиссионной, и потом, так сказать, очень интенсивно исследовался во многих обсерваториях. Но наши ряды, почти 12 лет наблюдений, конечно, являются просто уникальным в этом отношении материалом. И, конечно, заслуга здесь главная в том, что нам удалось обнаружить вот это вот две гармоники в периодичности потока, 26,4 дня и 26,9 дня. Понятно, что это сразу легко объясняло вот эту так называемую необъяснимую раньше переменность 4,6 года. Это просто биение двух близких частот. Легко объясняется чисто математически. Итак, защищаемая диссертация, состоящая из введения трех глав и заключения, представлены оригинальные и новые выводы. Работа представляет собой законченное всестороннее исследование объектов, объединенных под общим названием микрокварзы. Особенно стоит отметить:

1. Проведен анализ кривых блеска и радиоспектров в течение гигантских вспышек Cygnus X-3, были оценены минимальная энергия - 10^{44} эрг, это большая величина, магнитное поле - 10 мГс и средней светимость источника 10^{38} эрг/с. 10^{38} эрг/с - в радиодиапазоне тоже является, в некотором смысле, уникальной характеристикой.

2. Впервые на телескопе был реализован метод многоазимутальных наблюдений. Это я перечисляю главные выводы. И впервые были

получены результаты по переменности на временах от 5 минут до 6 часов. Внутрисуточные измерения спокойного состояния Cygnus X-3 наряду с измерением рентгеновской поляризации с помощью обсерватории IXPE привели к ключевому выводу, что эта система является ультраярким рентгеновским источником.

Считаю, что работа Шевченко, мониторинг рентгеновских двойных систем со струйными выбросами, полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени по специальности 1.3.1 физика космоса, астрономия. Спасибо.

Председатель:

Спасибо, Сергей Анатольевич.

Заслушаем заключение организации САО РАН.

Секретарь:

(заключение с места выполнения работы)

Председатель:

Спасибо. Коллеги, нам сейчас надо заслушать отзыв ведущей организации, это Южный федеральный университет.

Секретарь:

(отзыв ведущей организации)

Председатель:

Спасибо. Так, Антон Валерьевич, есть что ответить?

Шевченко А.В.:

Да, конечно. По поводу измерений SS 433 здесь можно добавить, что мы подтвердили, уже известную ранее закономерность, что на фоне ярких вспышек в системе существует некоторый ненулевой уровень радиопотока. Это косвенно говорит о том, что даже в периоды экстремальных вспышек, механизм, запускающий струйные выбросы, не

останавливается. Этот же вывод подтверждён в рентгеновских наблюдениях.

По поводу системы GRS 1915, здесь по характеру эволюции спектра ясно видно, что мы имеем дело с расширением области радиоизлучения, просто в зависимости от первоначальных условий, пока нам неизвестных спектр эволюционирует от инвертированного до крутого быстрее или медленнее в зависимости от каждой вспышки. Это по источникам. А со всеми остальными замечаниями согласен, всегда есть над чем работать и что исправить.

Председатель:

Спасибо. Так, коллеги, мы переходим к отзывам оппонентов. У нас два оппонента, я предлагаю начать с Михаила Александровича Харинова, который, естественно, первым выступит, потому что дальше он просто зачитает свой отзыв.

Харинов М.А.:

(отзыв оппонента Харинова М.А.)

Шевченко А.В.:

Спасибо, Михаил Александрович, за внимательное рассмотрение работы. Обширное ведение связано с тем, что нужно было коротко описать целостную картину происходящих физических процессов. Иначе непонятно обсуждение результатов в последующем тексте работы. Действительно, более четкие и конкретные формулировки лучше бы отражали суть полученных результатов. Имеется ввиду в положениях, выносимых на защиту. Как раз здесь необходимо отметить, что реализацию метода можно считать обоснованно моим вкладом, потому что осуществлялись задачи не только обработки и анализа данных, но и непосредственно участие в организации и проведении наблюдений. Это предустановка оборудования, сопровождение в текущем режиме и какие-то организационные вопросы, которые необходимо было решать на месте.

Важно отметить, что все циклы многозимуальных наблюдений были подкреплены наблюдениями опорных источников в тот же или в ближайший день. При этом, в случае Cygnus X-3 источник NGC 7027 был основным калибратором, а ЗС84 был удобным, и это связано с тем вопросом, который задавал Алексей Валерьевич, не мешали ли мы солнечникам. ЗС84 было удобно наблюдать после Cygnus X-3, то есть мы могли, если наблюдения проходили ночью, отнаблюдать друг за другом сразу два источника. Путаница в таблице с калибраторами связана с тем, что мы экспериментировали с этими калибраторами с целью уменьшить или учесть систематические ошибки, что нам удалось, и вследствие чего мы повысили точность измерений. Действительно следовало бы более четко указывать идентификаторы источников в соответствии со стандартами астрономического союза. А использование классической шкалы Барса-Отто обусловлена многолетней практикой наблюдений на РАТАН-600, и это обеспечило преемственность полученных результатов. Но, безусловно, сравнение с современной шкалой Перле-Баттлера было бы полезным для оценки систематических эффектов и ошибок в определении абсолютных потоков. Благодарю.

Председатель:

Все, да? Спасибо большое. Так, коллеги, внимание, еще чуть-чуть сосредоточимся, теряем уже внимание, устали все. Сейчас заключение, отзыв второго оппонента, Зинченко Игоря Ивановича. Это Нижегородский институт прикладной физики. Пожалуйста.

Секретарь:

(отзыв оппонента Зинченко И.И.)

Шевченко А.В.:

Действительно, в работе основное внимание уделено анализу именно вспышки 2018 года, августовской. Поскольку она представляла особый интерес. Но в целом сравнение с другими периодами показывает,

что вспышки происходят по одним и тем же законам, то есть механизмы запуска одни и те же. Прочие вспышки имеют в 2–3 раза меньшую амплитуду при этом, характер эволюции спектра и временные масштабы развития вспышек сохраняются, здесь главным моментом является стабильность основных параметров кинематической модели, которая подтверждается не только рентгеновскими наблюдениями, но и косвенно присутствием постоянного радиоизлучения в спокойном состоянии системы. То есть с физической точки зрения присутствие компактного джета говорит о том, что механизмы коллимации и ускорения происходят непрерывно. Это значит, что поддерживается стабильный темп аккреции, обеспечивающий энергетику для формирования струй. Существует устойчивая магнитная конфигурация для коллимации выброса. И работает механизм, который обеспечивает постоянное ускорение до релятивистских скоростей. То есть базовый уровень излучения является индикатором того, что вся машина по производству струй от аккреции до коллимации функционирует непрерывно. В диссертации было указано, что в момент радиовспышек наблюдалось значительное падение потока в мягком рентгене. И мы сформулировали предположение, что это связано с моделью усиления звездного ветра, блокирующего излучение рентгеновских джетов. Такая интерпретация подтверждается тем, что рентгеновские смещённые линии наблюдались во всех доступных циклах рентгеновских наблюдений.

Действительно, формулировка «скорость расширения области излучения» более корректна будет с физической точки зрения, а вместо термина «размер луча», конкретнее говорить о ширине диаграммы направленности. Спасибо.

Председатель:

Так, ну что, давайте перейдем к общей дискуссии коллеги. Кто желает первый выступить? Давайте тогда, пожалуйста.

Горанский В.П.:

Работа хорошая, я почитал автореферат, но я хочу помочь вам в работе и сделать некоторые замечания. Дело в том, что вы считаете два способа аккреции в таких системах с релятивистскими объектами один из них — это когда донор более массивный и тогда через звездный ветер и второй случай, когда менее массивный, то есть это через точку лагранжа происходит истечения вещества. Но есть еще другой способ аккреции, о котором писали, например, Богдан Пачинский, Анна Житков его рассматривали. Это динамическая аккреция. Это когда массивный компонент переполняет свой полость Роша, он эволюционирует и переполняет её. И тогда он теряет массу, и так как теряет массу, полость Роша его уменьшается. И это вызывает процесс, который приводит к катастрофическому переносу массы. И в этом случае аккреция через диск просто уничтожается. Заполняется полость Роша, и дело может идти даже до образования общей оболочки. В этом случае некоторые системы, в частности SS 433, можно интерпретировать как динамическую аккрецию с компонента, который переполняет свою полость Роша из-за эволюции. И некоторые другие системы тоже этим могут быть интересны. Я хочу обратить ваше внимание на то, что работа, конечно, хорошая, но интерпретации могут быть другими.

Шевченко А.В.:

Лебедь X-3 тоже может быть таким источником?

Горанский В.П.:

Вот-вот, не только Лебедь X-3, но и ULX и LBV-объекты, это может быть перенос динамического типа.

Председатель:

Спасибо. Еще замечания, коллеги, по диссертации представленной?
Нет больше?

Романюк И.И.:

Давайте голосовать.

Председатель:

Коллеги, я коротко скажу. Во-первых, мы получили у себя в коллективе на РАТАНе опытного нового наблюдателя, что очень здорово, потому что это нам сильно не хватает. Видно, что человек будет набирать опыт, будет вес набирать, это будет хорошее подспорье для всей работы на радиотелескопе. Работа добротная, связана с многочисленными наблюдениями, мне тоже понравилось. Что мне не понравилось, что оппонент отметил, Михаил Александрович, перекося в вводной части, где половина — это обзор проблемы в целом. Понятно, что человек, когда впервые сталкивается с проблемой, он хочет ее обозреть как можно глубже и тщательнее. Это первое. Второе, что мне не понравилось, это Сергею Анатольевичу замечание. Положение, которое вносится на защиту. Вот, не все читали, может быть, но положение вносится на защиту пункт третий: «Летом 2018 года в период активности микроквара SS 433... на основе данных РАТАН-600 и рентгеновских обсерваторий исследовано несколько мощных радиоисточников». Это описан процесс, это не то, что вы сделали, это процесс. Это сформулировано так, что вы участвовали в каком-то процессе и что-то делали. А здесь нужно писать о том, что вы получили. Нужно более конкретно писать, короче и по сути, у читателя нет времени. Если сказать грубо, никто вашу диссертацию читать кроме вас не будет. А прочитают люди автореферат, лучше читать ваши публикации, статьи, которые опубликованы в рецензируемых журналах.

И нужно, вот в автореферате сжать такой весомый ударный стиль по мировоззрению людей, которые читают. Вот этот человек получил, вот это новое. Много результатов, а не просто я занимался исследованием, что-то исследовал и исследовал, и не понятно. Потому что, когда я читаю до конца этот абзац, уже не понимаю, что это такое. Но в целом работа

хорошая, я призываю всех членов Совета проголосовать за, поддержать нашего молодого исследователя. Хороший, новый, научный работник, который достойно впишется в нашу большую команду. Спасибо всем за обсуждение. Тогда продолжаем работу. Все уже устали. Ну, вам предоставляется заключительное слово, если оно есть.

Шевченко А.В.:

Есть, очень-очень коротко. Я просто, в случае успешной защиты, поздравляю Сергея Анатольевича с первым защитившимся аспирантом. А всему САО я благодарен не только, и не столько за защиту, возможно состоявшуюся, а за жизненный опыт, потому что здесь я его получил колоссальное количество.

Председатель:

Спасибо. Ну первым замечанием вы сразу завоевали расположение комиссии. Счётная комиссия: Панчук, Романюк и Сачков. Прошу комиссию приступить к работе.

Сачков М.Е.:

Минутку внимания. Протокол заседания счетной комиссии, избранной диссертационным советом 24.1.219.1, 2 декабря 2024 года. Состав комиссии: Сачков, Романюк, Панчук. Комиссия избрана для подсчета голосов в тайном голосовании по диссертации Шевченко на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Состав диссертационного совета утверждён в количестве 13 человек на срок действия номенклатуры специальностей приказом министерства. Присутствовало на заседании 12 членов совета, в том числе докторов наук по специальности - 11, а розданных бюллетеней 12, осталось не розданных 0, в урне оказалось 12. Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Шевченко, за – 12, против – 0, недействительных – 0.

Председатель: Кто за то, чтобы признать результаты голосования?
Кто против? Все за. Воздержавшихся нет.

Председатель:

Остался последний этап. Читаем и обсуждаем замечания.

(члены совета обсуждают проект заключения)

Председатель:

Прошу голосовать за заключение. Все - за. Коллеги, я всем признателен за внимание и активную работу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.212.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 2 декабря 2024 г. № 12

О присуждении Шевченко Антону Валерьевичу, Российская Федерация, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Мониторинг рентгеновских двойных звёзд со струйными выбросами» по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия принята к защите 27 августа 2024 г., протокол № 9, диссертационным советом 24.1.212.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук, Российская академия наук, 369167, КЧР, Зеленчукский район, п. Нижний Архыз.

Соискатель, Шевченко А.В. 1992 года рождения, в 2014 г. окончил специалитет Российской таможенной академии по специальности 080502.65 «Экономика и управление на предприятии», в 2016 г. окончил магистратуру Южного федерального университета по специальности 44.04.02. «Психолого-педагогическое образование», в 2017 г. бакалавриат по специальности 03.03.03 «Радиофизика». В период подготовки диссертации с 17.08.2018 г. по 24.08.2023 г. проходил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук, на данный момент работает в должности стажера-исследователя в лаборатории радиоастрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией радиоастрофизики САО РАН, Трушкин Сергей Анатольевич.

Официальные оппоненты:

1. Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом No 180 «Радиоприёмной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»;

2. Харинов Михаил Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории радиоастрономических наблюдений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук;

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", г. Ростов-на-Дону, в своём положительном заключении, подготовленном кандидатом физико-математических наук, зав. кафедрой физики космоса Южного федерального университета Ачаровой И.А., одобренном на объединенном астрофизическом семинаре кафедры физики космоса Южного федерального университета и отдела космических исследований Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета 15 октября 2024 года, указала, что диссертация является завершённым научным исследованием, удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Шевченко А.В. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия. Отзыв утверждён первым проректором федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Южный федеральный университет" доктором химических наук А.В. Метелицей 16 октября 2024 года.

Соискатель имеет 21 публикацию по теме исследования: 4 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; 4 - в материалах конференций; 13 - электронные публикации (общим объёмом 127 страниц). Наиболее значимые научные результаты по теме диссертации опубликованы в работах:

1. Strong low-frequency radio flaring from Cygnus X-3 observed with LOFAR / J.W. Broderick, T.D. Russell, R.P. Fender, S.A. Trushkin, D.A. Green, J. Chauhan, N.A. Nizhelskij, P.G.

Tsybulev, N.N. Bursov, A.V. Shevchenko, G.G. Pooley, D.R.A. Williams, J.S. Bright, A. Rowlinson, S. Corbel // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Июнь. — Т. 504, № 1. — С. 1482—1494.

2. The X-ray Jets of SS 433 in the Period of Flaring Activity in the Summer of 2018 / P.S. Medvedev, I.I. Khabibullin, A.N. Semena, I.A. Mereminskiy, S.A. Trushkin, A.V. Shevchenko, S.Yu. Sazonov // *Astronomy Letters.* — 2022. — Июль. — Т. 48, № 7. — С. 389—405.

3. Study of the Microquasar Cygnus X-3 with the RATAN-600 Radio Telescope in Multi-Azimuth Observing Mode / S.A. Trushkin, A.V. Shevchenko, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, A.N. Borisov, A.A. Kudryashova // *Astrophysical Bulletin.* — 2023. — Июнь. — Т. 78, № 2. — С. 225—233. 9

4. Cygnus X-3 revealed as a Galactic ultraluminous X-ray source by IXPE / A. Veledina, и др.; [S.A. Trushkin, A.V. Shevchenko, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev] // *Nature Astronomy.* — 2024. — Авг. — Т. 8. — С. 1031—1046.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследования, высокой компетентностью в вопросах, рассматриваемых в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Показано, что наиболее вероятным механизмом низкочастотного завала радиоспектра в течение яркой вспышки в системе Cygnus X-3 является поглощение тепловыми электронами или синхротронное самопоглощение внутри источника. В процессе эволюции струйного выброса наблюдалось постепенное смещение точки перегиба к более низким частотам. Оценены основные характеристики вспышки.

2. Успешно реализован метод многоазимутальных наблюдений дискретных источников, результатом которого стали измерения гигантских вспышек в системах GRS1915+105 и Cygnus X-3 на временах от 5 минут до 6 часов. Показано, что рост радиопотока на начальной фазе одной из гигантских вспышек в системе Cygnus X-3 соответствует линейному закону, что подтверждается последующими многоазимутальными измерениями других вспышек в этой системе. Внутрисуточные измерения спокойного состояния Cygnus X-3 наряду с измерениями рентгеновской поляризации с помощью обсерватории IXPE привели к ключевому выводу, что эта система является ультраярким рентгеновским источником.

3. Зарегистрирована исторически самая яркая, оптически тонкая вспышка в системе SS 433 в августе 2018 года на РАТАН-600. Обнаружено, что в периоды ярких вспышек рентгеновский поток в мягком диапазоне падает в несколько раз, что находит своё объяснение в сценарии образования звездного ветра, который блокирует излучение рентгеновских джетов.

Теоретическая значимость диссертационной работы обоснована тем, что результаты, полученные соискателем, могут быть применены при разработке численных моделей центральных областей микроквazarов и рентгеновских джетов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Реализация многоазимутального режима работы антенной системы "Южный сектор с Плоским отражателем" для быстрой радиометрии дискретных источников обеспечила возможность осуществлять многочастотные измерения на телескопе РАТАН-600 на временах от нескольких минут до нескольких часов.
2. Результаты выполнения программы мониторинга микроквazarов на РАТАН-600 представляют собой уникальные измерения, не имеющие аналогов по своей долговременности и охвату радиочастот. Полученный соискателем наблюдательный материал редких и ярких событий послужат основой теоретического осмысления и глубокого анализа.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность опубликованных результатов обусловлена их согласием с общепринятыми моделями и соответствием независимым измерениям источников в других диапазонах электромагнитного спектра. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах.

Личный вклад Личный вклад Шевченко А.В. состоит в самостоятельной обработке, калибровке и анализе измерений микроквazarов, выполненных с помощью телескопа РАТАН-600. Шевченко А.В. участвовал в анализе и обсуждении результатов многоволновых кампаний совместно с научным руководителем и другими соавторами, принимал непосредственное участие в реализации метода многоазимутальных наблюдений, в подготовке материалов и публикаций результатов измерений на телескопе РАТАН-600.

На заседании 2 декабря 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Шевченко Антону Валерьевичу учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.03.02, участвовавших в заседании, из 13 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 12 , против - 0 , недействительных бюллетеней - 0 .

Председатель
диссертационного совета




Балега Ю.Ю.

Учёный секретарь
диссертационного совета


Шолухова О.Н.

2 декабря 2024 г.