

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИКИ РАН
И.В. Чулков

2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН) на диссертацию «Поиск и исследование активных ядер галактик и далеких квазаров по данным рентгеновских обзоров неба и наземных телескопов», представленную Хорунжевым Георгием Андреевичем на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - «Астрофизика и звездная астрономия».

Диссертация «Поиск и исследование активных ядер галактик и далеких квазаров по данным рентгеновских обзоров неба и наземных телескопов» выполнена в отделе Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. В период подготовки диссертации соискатель Г.А. Хорунжев работал в указанном отделе в должности младшего научного сотрудника.

В 2014 г. Г.А. Хорунжев окончил очную аспирантуру Института космических исследований РАН по специальности «Астрофизика и звездная астрономия». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2014 г. ИКИ РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор РАН, Сазонов Сергей Юрьевич, заведующий лабораторией 521 ИКИ РАН.

Доклад Г.А. Хорунжева по теме диссертации заслушан и обсужден на заседании НТС отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Поиск и исследование активных ядер галактик и далеких квазаров по данным рентгеновских обзоров неба и наземных телескопов» ПРИНЯТО СЛЕДУЮЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Актуальность темы и направление исследования

В отделе Астрофизики Высоких Энергий ИКИ РАН работа с данными рентгеновских обсерваторий ИНТЕГРАЛ и ХММ-Ньютон ведется на протяжении последних 20 лет. Постоянно идет активная работа по отождествлению открытых рентгеновских источников в видимом и инфракрасном диапазонах по данным наземных и космических обсерваторий. Проводятся регулярные спектроскопические наблюдения на наземных телескопах, которые позволяют определить: тип источника, расстояние до него, светимость и прочие параметры.

Накопленные данные прибора IBIS/ISGR1 обсерватории ИНТЕГРАЛ позволили составить каталог близких активных ядер галактик, зарегистрированных в жестком рентгеновском диапазоне. Этот каталог был использован в первой части диссертации (глава 2). Для 68 сейфертовских галактик получены оценки масс сверхмассивных черных дыр (СМЧД),

расположенных в центре этих галактик. Проведен сравнительный анализ разных способов измерения масс СМЧД. Значения масс СМЧД используются для определения критической эддингтоновской светимости и эффективности темпа аккреции для объектов из представительной выборки близких сейфертовских галактик. Определение данных параметров является целью первой части диссертационной работы. Были получены следующие результаты:

1. Для 68 источников проведен расчет светимости сфероидального компонента родительской галактики (балджа) по данным фотометрического инфракрасного диапазона всего неба 2MASS. Были сделаны оценки масс СМЧД с помощью масштабного соотношения между массой СМЧД и инфракрасной светимостью балджа.
2. Для 17 сейфертовских галактик 1-го типа по спектрам, специально полученным на российско-турецком телескопе РТТ-150, были определены параметры линий в спектрах. Массы СМЧД этих источников были измерены на основе корреляции параметров широких линий в спектрах сейфертовских галактик 1-го типа и массы СМЧД. Данный способ имеет меньший систематический разброс, чем оценки с использованием масштабного соотношения между массой СМЧД и инфракрасной светимостью балджа.
3. Измерено отношение болометрической к критической эддингтоновской светимости, которое для большинства объектов составляет от 1 до 100%. Это значит, что аккреция газа на СМЧД в сейфертовских галактиках происходит в высоком темпе и радиационно эффективном режиме.
4. Показано, что способ оценки масс сверхмассивных черных дыр в сейфертовских галактиках по масштабному соотношению «масса СМЧД - инфракрасная светимость балджа» приводит к завышенным оценкам массы СМЧД в диапазоне меньше 10^8 солнечных масс.

Показано, что задача измерения масс СМЧД практически решается на телескопе РТТ-150, осуществляющем наземную поддержку обзора обсерватории Спектр-РГ, которая готовится к запуску. Это очень важно, т. к. телескоп ART-XC, входящий в состав Спектр-РГ, откроет в жестком рентгене ещё несколько сотен близких сейфертовских галактик, для которых потребуется получение спектров и измерение масс СМЧД.

Вторая часть диссертации посвящена поиску и отождествлению далеких рентгеновских квазаров среди источников обзора рентгеновской обсерватории XMM-Ньютон (главы 3 и 4) и исследованию их рентгеновской функции светимости (глава 5). Цель второй части диссертации - это получение оценки плотности далеких квазаров на больших красных смещениях и измерение их рентгеновской функции светимости.

Поиск далеких квазаров является одним из важнейших элементов исследования истории роста сверхмассивных черных дыр и эволюции массивных галактик во Вселенной. Для того, чтобы улучшить имеющиеся ограничения на модели рентгеновской функции светимости квазаров на $z > 3$, требуется набрать большую рентгеновскую выборку далеких квазаров на высоких красных смещениях. Получение такой выборки осложняется тем, что яркие и далекие квазары - редкие объекты с низкой поверхностной плотностью на небе, для поиска которых нужны рентгеновские обзоры большой площади и достаточной глубины. Для работы с этими рентгеновскими источниками требуются фотометрические и спектроскопические наблюдения в видимом диапазоне.

Проведена большая работа по отождествлению рентгеновских источников в оптике, которая описана в главах 3 и 4. Разработана методика поиска далеких рентгеновских квазаров в диапазоне красных смещений $3 < z < 5$ и измерения их фотометрического красного смещения по открытым данным оптических и инфракрасных фотометрических широкополосных обзоров неба. По описанной методике составлен каталог далеких рентгеновских квазаров, куда вошли уже известные спектроскопически подтвержденные квазары и новые неподтвержденные кандидаты. Сделаны оценки полноты и чистоты отбора метода относительно выборки известных квазаров.

В главе 5 обсуждаются результаты отбора на примере яркой подвыборки источников со светимостями выше 10^{45} эрг/с, исследуется их функция светимости. Используемые данные обсерватории ХММ-Ньютон позволили составить рентгеновский обзор большой площади. Это дало возможность построить выборку ярких и далеких квазаров, размер которой в несколько раз превышает известные выборки, ранее использованные для построения рентгеновской функции светимости. Спектроскопическая проверка кандидатов в квазары на телескопах АЗТ-33ИК и БТА позволила достичь очень высокой чистоты выборки квазаров со светимостями выше 10^{45} эрг/с, которая после проведения наблюдений состоит на 90% из спектроскопически подтвержденных объектов. Все это позволило существенно улучшить ограничения на некоторые параметры моделей рентгеновской функции светимости. Были получены следующие результаты:

1. Получен каталог 903 источников, отобранных по фотометрическому красному смещению. Это самая большая выборка квазаров на $z > 3$, отобранных в рентгене. Показано, что можно почти в 1.5 раза увеличить число далеких рентгеновских квазаров на $z > 3$ по отношению к известным объектам в области покрытия Слоановского обзора, если провести их дополнительный поиск и спектроскопическую проверку.
2. Осуществлена спектроскопическая проверка на телескопах АЗТ-33ИК и БТА квазислучайно выбранных кандидатов в квазары на $z > 3$, которая показала, что действительно чистота выборки новых кандидатов превышает 50%. Таким образом, после проверки всех новых кандидатов итоговая чистота каталога должна составить 70-80%.
3. В ходе программы спектроскопической проверки новых кандидатов был открыт редкий источник - далекий рентгеновский квазар *3ХММ 125329.4+305539* на красном смещении $z=5.08$. На момент обнаружения *3ХММ 125329.4+305539* было известно только 3 отобранных в рентгене оптически ярких квазара на $z > 5$. Открытие данного источника убедительно демонстрирует высокие возможности нового спектрографа АДАМ, установленного на телескопе АЗТ-33ИК.
4. Построена рентгеновская функция светимости квазаров 1-го типа для подвыборки источников со светимостями выше 10^{45} эрг/с из каталога кандидатов в квазары на красных смещениях $3 < z < 5$. Существенно улучшено ограничение величины степенного наклона яркой части рентгеновской функции светимости. Доказано, что пространственная плотность рентгеновских квазаров высокой светимости эволюционировала между $z=5$ и $z=3$ медленней, чем плотность квазаров более низкой светимости.

Освоенные методы применимы как к существующим рентгеновским обзорам, так и к данным планируемых миссий, например Спектр-РГ. Телескоп eROSITA, входящий в состав Спектр-РГ, откроет в мягком рентгеновском диапазоне несколько десятков тысяч квазаров на $z > 3$, что во много раз превышает размеры имеющихся выборок таких источников. Их отождествление в оптике и получение спектров будет очень важной но трудоемкой задачей. Очень хорошо, что ещё до запуска спутника Спектр-РГ в диссертации был очерчен круг задач по поиску и отождествлению рентгеновских квазаров на $z > 3$ и опробованы пути их решения.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Результаты, выносимые на защиту, получены лично автором диссертации. В процессе работы автором осуществлялись: проведение наблюдений на наземных телескопах, обработка и анализ результатов наблюдений; обработка больших массивов данных, полученных в рентгеновском, видимом и инфракрасном диапазонах. Был разработан метод для поиска далеких квазаров по данным широкополосной фотометрии; проводился анализ полученных результатов. По теме диссертации было опубликовано 5 работ в рецензируемых научных изданиях, определяющую роль в подготовке и написании которых сыграл автор диссертации.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных в диссертации результатов основана на:

1. их публикации в ведущем российском рецензируемом журнале по астрономии и астрофизике и входящем в перечень ВАК;
2. представлении и обсуждении результатов работы (в том числе в виде устных докладов) на семинарах, российских и международных конференциях («Астрофизика высоких энергий (HEA), Quasars at all cosmic epoch - 2017»);
3. полученные результаты хорошо соотносятся с теоретическими оценками, а так же с измерениями, полученными другими методами и авторами.

Научная новизна и практическая значимость результатов исследований

В главе 2 проведен сравнительный анализ различных методов оценки масс СМЧД. Массы 68 сверхмассивных чёрных дыр представительной выборки близких активных ядер галактик, зарегистрированных обсерваторией «ИНТЕГРАЛ» в жестком рентгеновском диапазоне, были измерены несколькими методами: по корреляции с инфракрасной светимостью звездного балджа, по характеристикам широких эмиссионных линий. Для многих источников «ИНТЕГРАЛ» измерение масс СМЧД проделано впервые. Для ряда объектов проведено сравнение с более точными оценками масс СМЧД, взятыми из литературы.

Метод измерения масс СМЧД по корреляции с инфракрасной светимостью звездного балджа будет востребован для оперативной оценки масс и темпов аккреции жестких рентгеновских источников обзора обсерватории Спектр-РГ. Освоение этого метода важно, потому что ожидаемый размер выборки источников, которые обнаружит телескоп ART-XC обсерватории Спектр-РГ, на порядок превзойдет число источников в жестких рентгеновских обзорах неба «ИНТЕГРАЛ» и «Swift». Этот метод позволит эффективно отбирать наиболее интересные объекты для измерения массы СМЧД более точными способами.

Опробован метод измерения масс СМЧД по характеристикам широких линий в спектрах, полученных на телескопе РТТ-150. Показано, что данная задача практически решаема на телескопе РТТ-150, осуществляющем наземную поддержку обзора Спектр-РГ. Данный способ имеет меньший систематический разброс, чем измерения масс по корреляции с инфракрасной светимостью звездного балджа.

Впервые получено распределение темпов аккреции для репрезентативной выборки близких сейфертовских галактик. Показано, что аккреция газа на СМЧД преимущественно идет в высоком темпе и в радиационно эффективном режиме.

Вторая часть диссертации посвящена поиску и отождествлению далеких рентгеновских квазаров среди источников рентгеновской обсерватории XMM-Ньютон с целью построения их функции светимости. В главе 3 показано, что с помощью данных широкополосной фотометрии Слоановского обзора, инфракрасных обзоров 2MASS и WISE можно: проводить классификацию источников, измерять их фотометрические красные смещения и эффективно

отбирать далекие рентгеновские квазары, которые являются редкими объектами и составляют всего 1-2% всей выборки рентгеновских источников. Разработанный метод оценки фотометрических красных смещений имеет приемлимую точность и дает низкий процент ошибочных источников. Данным методом проведен отбор и составлен каталог кандидатов в квазары первого типа. Примерно 40% отобранных источников - это новые кандидаты в квазары, которые не имеют снятого спектра.

Результаты, полученные в 3 главе, позволяют оценить объем необходимой фотометрической и спектроскопической поддержки обзора Спектр-РГ. Для отбора далеких квазаров можно использовать фотометрические оценки красного смещения, полученные по имеющимся и открытым данным широкополосных фотометрических обзоров. Поэтому, на первом этапе работы с данными Спектр-РГ не потребуется проводить дополнительных фотометрических наблюдений для поиска далеких квазаров. Это существенно снизит загруженность наземных телескопов.

В 4 главе описываются результаты экспериментальной проверки новых кандидатов на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК и 6-метровом телескопе БТА. Телескоп АЗТ-33ИК участвует в наземной поддержке обзора Спектр-РГ и оборудован новым спектрографом АДАМ с высокой квантовой эффективностью в ближнем ИК. Высокая чувствительность спектрографа позволила проверить кандидаты в квазары с красным смещением $z > 5$. Был подтвержден источник *3XMM 125329.4+305539* – один из самых далеких ($z=5.08$) оптически ярких ($i=21.0$) квазаров, из когда-либо обнаруженных в рентгеновских обзорах. Это практически подтверждает высокое качество оборудования и наглядно демонстрирует, что можно решать задачи поиска самых далеких квазаров на телескопах 1.5-метрового класса.

Показано, что дополнительный отбор оптически ярких квазаров на $z > 3$ и спектроскопическая проверка необходимы для получения полной выборки квазаров и исследования их распределения по светимости и красному смещению (функции светимости). Была подтверждена 50% чистота выборки новых кандидатов. Следовательно, разработанным методом отбора далеких квазаров можно увеличить на 25% число квазаров относительно спектроскопической выборки квазаров $z > 3$ Слоановского обзора.

Согласно полученным в диссертации оценкам наблюдаемой плотности квазаров на $z > 5$, в обзоре СРГ может быть найдено несколько таких источников вблизи полюсов эклиптики. Большинство рентгеновских квазаров на $z > 5$ из обзора СРГ в оптике будут слабее порога детектирования Слоановского обзора SDSS.

В главе 5 среди квазаров на $z > 3$ были отобраны самые яркие рентгеновские источники, получена самая большая выборка далеких рентгеновских квазаров со светимостями выше 10^{45} эрг/с. Впервые получены статистически значимые оценки плотности квазаров со светимостями выше 2×10^{45} эрг/с на $z > 3$. Впервые доказано, что пространственная плотность рентгеновских квазаров высокой светимости эволюционировала между $z=5$ и $z=3$ медленней, чем плотность квазаров более низкой светимости.

Существенно улучшены ограничения на степенной наклон функции светимости, который отвечает за спад плотности ярких квазаров. Уточнены значения других параметров популярных моделей рентгеновской функции светимости. Полученные модели рентгеновской функции светимости представляют самостоятельную научную ценность, т.к. точнее описывают эволюцию плотности ярких непоглощенных квазаров на больших красных смещениях. Эти модели можно использовать для сравнения с результатами обзора Спектр-РГ и других рентгеновских миссий.

Пройдены все этапы научного исследования выборок АЯГ в ранней и поздней Вселенной. Получен опыт работы с рентгеновскими, оптическими и инфракрасными каталогами, который обязательно будет востребован во время работы с данными рентгеновского обзора всего неба Спектр-РГ.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

1. «Массы и темпы аккреции сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактик из обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ.» Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Ткаченко А.Ю., Письма в Астрономический журнал, 2012, 38, 539
2. «Каталог кандидатов в квазары на $3 < z < 5.5$, отобранных среди рентгеновских источников обзора 3XMM-DR4 обсерватории XMM-Ньютон.» Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Мещеряков А.В., Сазонов С.Ю., Письма в астрономический журнал, 2016, 42, 313
3. «Оптическая спектроскопия кандидатов в квазары на $3 < z < 5.5$ из рентгеновского обзора обсерватории XMM-Ньютон. Далекий рентгеновский квазар на $z=5.08$.» Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Сазонов С.Ю., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Письма в Астрономический журнал, 2017, 43, 159
4. «Catalog of $3 < z < 5.5$ Quasar Candidates Selected among XMM-Newton Sources and Its Spectroscopic Verification.» Khorunzhev G., Sazonov S., Burenin R., Eselevich M., 2017, Front. Astron. Space Sci., 4, 37, <https://doi.org/10.3389/fspas.2017.00037>
5. «Рентгеновская функция светимости квазаров на $3 < z < 5$, отобранных по данным случайного обзора обсерватории XMM-НЬЮТОН» Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Письма в Астрономический журнал, 2018, 44, 546

Все работы опубликованы в рецензируемых журналах. Все основные положения исследований изложены в статьях, опубликованных в журнале «Письма в Астрономический Журнал», который входит в перечень ВАК.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия», как «Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям. Изучение происхождения, движения и эволюции космических объектов на базе фундаментальных физических теорий и астрономических наблюдений.»

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Хорунжева Георгия Андреевича «Поиск и исследование активных ядер галактик и далеких квазаров по данным рентгеновских обзоров неба и наземных телескопов» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней». В рамках диссертационного исследования автором были приведены результаты анализа данных орбитальных астрофизических обсерваторий ИНТЕГРАЛ и XMM-Ньютон, данных Слоановского обзора и проведенных наблюдений на телескопах: РТТ-150, АЗТ-33ИК, БГА. Предметом исследования являлись популяции сейфертовских галактик в близкой Вселенной, отобранных в жестком рентгене, и квазаров на $z > 3$ в ранней Вселенной, отобранных в мягком рентгеновском диапазоне. Автор диссертации:

- 1) Провел измерение несколькими способами масс сверхмассивных черных дыр и

темпов аккреции вещества на них для представительной выборки близких АЯГ, отобранных в жестком рентгене.

- 2) Показал, что способ оценки масс черных дыр в сейфертовских галактиках по соотношению между массой СМЧД и инфракрасной светимостью балджа приводит к завышенным оценкам масс.
- 3) Разработал методику поиска далеких рентгеновских квазаров и измерения их фотометрического красного смещения по открытым данным фотометрических широкополосных обзоров неба. Составил каталог 903 квазаров и кандидатов в квазары. Оценил полноту и чистоту этого каталога. Показал, что дополнительный поиск новых кандидатов может увеличить число далеких рентгеновских квазаров на $z > 3$ по отношению к известным объектам в областях покрытия Слоановского обзора.
- 4) Провел наблюдения на телескопах АЗТ-33ИК и БТА нескольких десятков квазислучайно выбранных кандидатов в квазары. Эта спектроскопическая проверка экспериментально подтвердила высокую чистоту каталога квазаров на $z > 3$.
- 5) В процессе проведения спектроскопической проверки новых кандидатов открыл редкий источник - далекий рентгеновский квазар *3XMM 125329.4+305539* на красном смещении $z=5.08$. Сделал оценки наблюдаемой плотности квазаров на $z > 5$.
- 6) Показал, что надежные оценки фотометрических красных смещений могут быть получены в площадках и по данным Слоановского обзора более чем для половины рентгеновских источников обзора Спектр-РГ с потоком выше 10^{-14} эрг/см², что примерно соответствует средней чувствительности 4-х летнего обзора СРГ.
- 7) Получил оценки параметров моделей рентгеновской функции светимости для квазаров 1-го типа на светимостях выше 10^{45} эрг/с. Впервые сделал статистические значимые оценки плотности квазаров на светимостях выше 2×10^{45} эрг/с. Доказал, что пространственная плотность рентгеновских квазаров высокой светимости эволюционировала между $z=5$ и $z=3$ медленней, чем плотность квазаров на меньших светимостях.

Диссертация «Поиск и исследование активных ядер галактик и далеких квазаров по данным рентгеновских обзоров неба и наземных телескопов» Хорунжева Георгия Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» - 18 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «31» августа 2018 г.

Ученый секретарь НТС
отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН,
к.ф.-м.н.



В.А. Арефьев