

На правах рукописи

Хорунжев Георгий Андреевич

Поиск и исследование активных ядер
галактик и далеких квазаров по данным
рентгеновских обзоров неба и
наземных телескопов

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор РАН,
ИКИ РАН

САЗОНОВ Сергей Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник

Специальной астрофизической обсерватории
Российской академии наук (САО РАН)

АФНАСЬЕВ Виктор Леонидович

доктор физико-математических наук, член-корреспондент
ведущий научный сотрудник

ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ИВАНЧИК Александр Владимирович

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ)

Защита диссертации состоится **17 декабря 2018 года в 16 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте космических исследований РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2018/khorunzhev.htm>

Автореферат разослан 13 ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физико-математических наук



А.Ю. Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность и цели работы

Активные ядра галактик (АЯГ) — класс астрофизических объектов ярких в широком диапазоне электромагнитного спектра: от радио до рентгена. Светимость АЯГ определяется переработкой энергии вещества падающего на центральную сверхмассивную черную дыру. Физика образования и «работы» АЯГ, их внутренняя структура, совместная эволюция АЯГ и родительской галактики — вот вопросы, которые интересуют ученых на протяжении последних 50 лет. В диссертации описываются методы и результаты исследований АЯГ на разных этапах эволюции: от относительно ранней Вселенной, когда плотность ярких интенсивно аккрецирующих квазаров была велика; до «наших» дней, когда наблюдаются только сейфертовские галактики — АЯГ сравнительно низкой светимости.

Целью первой части диссертационной работы (глава 2) является измерение масс сверхмассивных черных дыр (СМЧД) и темпов аккреции для представительной выборки (Кривонос и др., 2007; Сазонов и др., 2007, 2012) близких сейфертовских галактик, зарегистрированных прибором *IBIS/ISGRI* обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Выборка составлена на основе наблюдений в жестком рентгеновском диапазоне, поэтому практически не страдает от обычных эффектов селекции, связанных с поглощением излучения в АЯГ или трудностью его детектирования на ярком фоне галактики. Эта выборка содержит все самые яркие АЯГ близкой Вселенной, поэтому важно знать в каком режиме происходит аккреция вещества на них.

Глава 2 начинается с обсуждения свойств рентгеновского каталога. Затем описываются применяемые способы измерения масс СМЧД.

Первый способ (Грэм, 2007) основан на масштабном соотношении между массой СМЧД и инфракрасной светимостью сфероидального компонента родительской галактики (балджа). Для всех источников произведен расчет светимости балджа по общедоступным данным фотометрического инфракрасного обзора всего неба *2MASS*. Метод измерения масс СМЧД по корреляции «масса СМЧД — светимость балджа» будет востребован для оперативной оценки масс и темпов аккреции жестких рентгеновских источников обзора обсерватории СРГ, которая сейчас готовится к запуску и состоит из 2 телескопов *eROSITA* (Мерлони, 2012) и ART-XC (Павлинский и др., 2011), ра-

ботающих соответственно в мягком и жестком рентгеновских диапазонах. Освоение этого метода важно, потому что ожидаемый размер выборки источников, которые обнаружит телескоп ART-XC в диапазоне 6-30 кэВ, на порядок превзойдет число источников в жестких рентгеновских обзорах неба *ИНТЕГРАЛ* (Кривонос и др., 2017) и BAT AGN Spectroscopic Survey (Косс, 2017). Этот метод позволит эффективно отбирать наиболее интересные объекты для измерения массы СМЧД более точными способами, которые существенно более трудоемки и требуют дополнительных наблюдений.

Второй способ (Вестергард и Петерсон, 2006) основан на вириальном соотношении между массой СМЧД и параметрами балмеровской линии водорода H_{β} — шириной и светимостью. Для 17 сейфертовских галактик 1-го типа по спектрам, полученным на телескопе РТТ-150, были определены параметры линии H_{β} и измерены массы СМЧД. Данный способ имеет меньший систематический разброс, чем оценки по корреляции «масса СМЧД — светимость балджа». Для некоторых АЯГ из выборки (Кривонос и др., 2007) масса СМЧД впервые была измерена с такой высокой точностью. Оценки основаны на результатах наблюдений близких сейфертовских галактик прибором TFOSS 1.5-м телескопа РТТ-150. Важно, что этот способ определения параметров широких линий и измерения масс СМЧД освоен на телескопе РТТ-150, который входит в комплекс наземной поддержки обсерватории СРГ. Ведь спектроскопические наблюдения — это важнейшая научная задача поддержки любого рентгеновского обзора, см. например (Косс, 2017).

Далее проводится анализ полученных результатов, делается сравнение оценок со значениями масс СМЧД, полученных другими научными группами с помощью эхокартирования (реверберации) или динамических методов. Производится расчет болометрической и эддингтоновской светимости, темпа аккреции.

Вторая часть диссертации посвящена поиску и отождествлению далеких рентгеновских квазаров среди источников «случайного» обзора всего неба рентгеновской обсерватории *ХММ-Ньютон* — главы 3 и 4, соответственно. В главе 5 обсуждаются результаты поиска на примере яркой подвыборки источников со светимостями $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с, исследуется их функция светимости. Цель второй части диссертации — это получение оценки плотности далеких квазаров на $z > 3$ и измерение их рентгеновской функции светимости. Уточнение параметров моделей рентгеновской функции светимости квазаров — актуальная астрофизическая задача, которую пытаются решать многие научные группы (Колодзиг и др., 2013;

Калфоунцоу и др., 2014; Георгакакис и др., 2015; Тасним и др., 2017).

Размера имеющихся выборок далеких рентгеновских квазаров не достаточно, чтобы оценить плотность квазаров на $z > 3$ и полноту их детектирования в *Слоановском обзоре (SDSS)*. Поэтому необходимо расширить существующие выборки, провести дополнительный поиск далеких рентгеновских квазаров на красных смещениях $z > 3$ с помощью доступных фотометрических данных оптического *Слоановского обзора* и инфракрасных обзоров *2MASS* и *WISE*. Эта задача находит свое решение в главе 3, где проводится отождествление рентгеновских источников из обзора рентгеновской обсерватории *XMM-Ньютон* с оптическими и инфракрасными данными обзоров *SDSS*, *2MASS*, *WISE*. В этой главе обосновывается необходимость проведения поиска далеких рентгеновских квазаров на красных смещениях $z > 3$ в дополнение к уже известным источникам. Описывается метод поиска квазаров на $z > 3$. При помощи этого метода составлен каталог квазаров (*K16*), в который вошли уже известные квазары и новые кандидаты. Там же рассматривается вопрос о недостаточной чувствительности *Слоановского обзора* для полного отождествления всех рентгеновских источников.

Получение оценок полноты фотометрической и спектроскопической идентификации далеких квазаров в *SDSS* чрезвычайно важно для определения объема задач поддержки рентгеновского обзора всего неба СРГ. Предполагается, что СРГ обнаружит более 20000 рентгеновских квазаров на $z > 3$ (Колодзиг и др., 2013; Георгакакис и др., 2015). Это будет выборка всех ярчайших рентгеновских квазаров ранней Вселенной. Важно до запуска спутника понять, какая доля квазаров на $z > 3$ будет иметь фотометрию и спектроскопию *SDSS*. Эта доля определяет: объемы дополнительной фотометрической и спектроскопической поддержки обзора *Спектр-РГ*; очерчивает круг задач по исследованию далеких квазаров, которые можно решить с учетом доступных данных. В главе 4 проводится проверка новых кандидатов в квазары. Ее результаты затем используются для выяснения чистоты выборки новых кандидатов, оценки качества метода поиска далеких квазаров и получения надежной выборки для построения рентгеновской функции светимости, преимущественно состоящей из спектроскопически подтвержденных квазаров.

В главе 5 описывается способ составления подвыборки ярких квазаров со светимостью $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с из каталога *K16*, которая затем используется для исследования рентгеновской функции светимости. Обсуждается проблема полноты отождествления ярких квазаров в обзоре *SDSS*. Пересчитывается поправка на неполноту

отождествления в оптике с помощью корреляции между рентгеновской и ультрафиолетовой светимостями квазаров. С учетом данной поправки производится расчет параметров моделей рентгеновской функции светимости. Делаются выводы об изменении плотности квазаров с увеличением возраста Вселенной. Полученные результаты сравниваются с выводами других работ, посвященных исследованию рентгеновской функции светимости квазаров. Площадь обзора, используемого в нашей работе, на порядок превышает размеры обзоров других авторов, обсуждаемых в главе 5. Поэтому наши оценки функции светимости сделаны с учетом самых ярких и самых далеких квазаров, которые просто не попали в достаточном количестве в обзоры меньшей площади. Полученные результаты важны для изучения свойств квазаров большой светимости в ранней Вселенной.

Исследованные в работе методы будут применяться к источникам из обзора *Спектр-РГ*. Важно, что уже сейчас имеется проверенный и надежный метод поиска далеких квазаров — наиболее редких и интересных объектов. На практике проверена возможность получения их спектров на телескопах, которые будут осуществлять наземную поддержку *Спектр-РГ*. Экспериментально измеренные чистота и полнота отбора квазаров по $z_{\text{фот}}$ будут использоваться для сравнения при разработке новых методов оценки фотометрического красного смещения. Результаты данной работы могут быть применимы к накопленным данным уже работающих рентгеновских телескопов (*Чандра*, *ХММ-Ньютон*, *SWIFT*) и готовящихся миссий.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

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.

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.

Впервые показано, что с помощью данных широкополосной фотометрии *Слоановского обзора*, инфракрасных обзоров *2MASS* и

WISE можно: проводить классификацию источников, достоверно измерять их фотометрические красные смещения и, используя эти измерения, эффективно отбирать далекие рентгеновские квазары.

Среди отобранных кандидатов в квазары на $z > 3$ обнаружены новые источники, которые в более ранних работах не считались кандидатами в квазары. Проведенная спектроскопическая проверка новых кандидатов показала, что значительная часть источников действительно являются квазарами на $z > 3$. Впервые на 1.5-метровом телескопе был обнаружен один из самых далеких и оптически ярких рентгеновских квазаров на $z > 5$.

Наблюдения кандидатов в далекие квазары впервые проводились с помощью нового спектрографа АДАМ, который имеет матрицу с высокой квантовой эффективностью в близком ИК-диапазоне. Это позволило оценить практические возможности спектрографа АДАМ для задачи поиска далеких квазаров.

Впервые получена самая большая выборка далеких рентгеновских квазаров со светимостями выше 10^{45} эрг/с. 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.

Научная и практическая ценность

Описанные в этой работе методы поиска и исследования активных ядер галактик позволяют решить важные научные задачи обзора *Спектр-РГ* и получить результаты мирового уровня. Важно, что все методы прошли экспериментальную проверку, и получен практический опыт работы с существующими рентгеновскими, оптическими и инфракрасными обзорами неба, которые будут использоваться для поддержки обзора *Спектр-РГ*. Результаты, представленные в каждой главе, имеют самостоятельную научную ценность.

Измерены массы 68 сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД) представительной выборки близких ($z < 0.15$) активных ядер галактик (АЯГ), отобранных в жестком рентгене в диапазоне 17-60 кэВ. Проведен сравнительный анализ различных методов оценки масс СМЧД. Массы СМЧД, полученные по корреляции со светимостью балджа, оказываются систематически выше оценок, сделанных другими методами для масс менее $10^8 M_{\odot}$. Это надо будет учитывать при использовании данной корреляции в будущем. Опробован ме-

тод измерения масс СМЧД по характеристикам широких линий в спектрах, полученных на телескопе РТТ-150. Показано, что данная задача практически решается на телескопе РТТ-150, осуществляющем наземную поддержку обзора *Спектр-РГ*.

Приведенные в главе 2 значения масс СМЧД можно использовать для расчета физических величин АЯГ, зависящих от массы СМЧД. Например, с помощью полученных масс СМЧД, для каждого источника была посчитана критическая эддингтоновская светимость и найдено отношение болометрической светимости к критической эддингтоновской светимости. Для большинства АЯГ близкой Вселенной это отношение лежит в диапазоне от 0.01-1. Примерно такую эффективность энерговыделения предсказывает модель тонкого аккреционного диска.

В диссертации показано, что для поиска далеких квазаров можно использовать фотометрические оценки красного смещения, сделанные по открытым данным широкополосных фотометрических обзоров. Больше половины рентгеновских источников с потоком в 0.5-2 кэВ выше 10^{-14} эрг/с/см² имеют надежную фотометрию SDSS. Это значит, что на первом этапе работы с данными *Спектр-РГ* не потребуются дополнительных фотометрических наблюдений. Вероятно, что больше половины далеких рентгеновских квазаров 4-летнего обзора *Спектр-РГ* смогут быть отождествлены с оптическими источниками в областях *Слоановского обзора*, и для них могут быть получены достаточно надежные оценки фотометрических красных смещений $z_{\text{фот.}}$. Разработанный метод оценки $z_{\text{фот.}}$ имеет приемлимую точность и дает низкий процент ошибочных источников.

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). Разработанным методом поиска далеких квазаров отбора можно увеличить на $\approx 25\%$ число квазаров относительно спектроскопической выборки SDSS на $z > 3$.

Телескоп АЗТ-3ЗИК участвует в наземной поддержке обзора *Спектр-РГ* и оборудован новым спектрографом АДАМ с высокой квантовой эффективностью в ближнем ИК. Обнаружение с помощью спектрографа АДАМ далекого квазара на $z_{\text{спек.}} = 5.08$ практически подтверждает высокое качество оборудования и наглядно демонстрирует, что можно решать задачи поиска самых далеких квазаров на телескопах 1.5-метрового класса.

Удалось составить выборку из 101 квазара со светимостями $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с на $3 < z < 5$ на площади ≈ 300 кв. град. Эти источники имеют очень низкую поверхностную плотность, поэтому набрать такое число объектов в обзорах меньшей площади было невозможно. Используя эту выборку удалось существенно улучшить ограничения на степенной наклон γ_2 функции светимости, который отвечает за спад плотности ярких квазаров. Уточнены значения других параметров популярных моделей рентгеновской функции светимости. Полученная выборка уникальна и будет в дальнейшем использоваться для детального изучения ярких квазаров на $z > 3$. Важно подчеркнуть, что наблюдения новых кандидатов на АЗТ-ЗЗИК и БТА позволили поднять долю спектроскопически подтвержденных кандидатов до 90%, что повышает ценность выборки для дальнейшего использования.

Полученные модели рентгеновской функции светимости представляют самостоятельную научную ценность, т.к. точнее описывают эволюцию плотности ярких непоглощенных квазаров на больших красных смещениях. Параметры этих моделей опубликованы. Их 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*.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведено измерение масс сверхмассивных черных дыр и темпов аккреции вещества на них для представительной выборки близких АЯГ, отобранных в жестком рентгене. 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.
2. Показано, что способ оценки масс сверхмассивных черных дыр в сейфертовских галактиках по масштабному соотношению «масса СМЧД — инфракрасная светимость балджа» приводит к за-

вышенным оценкам массы СМЧД в диапазоне $M_{\text{ВН}} < 10^8 M_{\odot}$. Это, возможно, указывает на то, что рост черных дыр в таких объектах ещё далек от завершения.

3. Разработана методика поиска далеких рентгеновских квазаров в диапазоне $3 < z < 5$ и измерения их фотометрического красного смещения по открытым данным оптических и инфракрасных фотометрических широкополосных обзоров неба. Получен каталог 903 источников, отобранных по фотометрическому красному смещению. Это самая большая выборка квазаров на $z > 3$, отобранных в рентгене. Каталог состоит на 57% из уже известных, спектроскопически подтвержденных квазаров и на 43% из новых неподтвержденных кандидатов. Относительно выборки известных квазаров полнота отбора этим методом составляет около 80%, нижний предел чистоты отбора — не менее 50%. 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.
4. Осуществлена спектроскопическая проверка 18 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%.
5. 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 $z > 5$. Согласно полученным 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*.
6. Фотометрические оценки красного смещения в площадках и по данным *Слоановского обзора* могут быть получены для $\gtrsim 50\%$ рентгеновских квазаров обзора *Спектр-РГ* со светимостями $L_{\text{X},2-10} \approx 10^{45}$ эрг/с на $z \sim 3$. Такие источники будут иметь

рентгеновские потоки $\approx 1.1 \times 10^{14}$ эрг/с/см² в 0.5-2 кэВ, что соответствует средней чувствительности по небу 4-х летнего обзора СРГ.

7. Построена рентгеновская функция светимости квазаров 1-го типа для подвыборки источников со светимостью $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с из каталога кандидатов в квазары на красных смещениях $3 < z < 5$. Это самая большая выборка далеких рентгеновских квазаров $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с. Впервые получены статистически значимые оценки плотности квазаров со светимостями $L_{X,2-10} \geq 2 \times 10^{45}$ эрг/с на $z \gtrsim 3$. Существенно улучшено ограничение величины степенного наклона яркой части рентгеновской функции светимости. Доказано, что пространственная плотность рентгеновских квазаров высокой светимости эволюционировала между $z \approx 5$ и $z \approx 3$ медленней, чем плотность квазаров более низкой светимости.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты работы полностью содержатся в статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

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., 2012, Письма в *Астрономический журнал*, 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., 2016, Письма в *Астрономический журнал*, 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., 2017,
Письма в *Астрономический журнал*, 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., Eiselevich 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., 2018,
Письма в Астрономический журнал, 44, 546

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на семинарах отдела, российских конференциях: «Астрофизика высоких энергий» ИКИ РАН 2011–2017 г.г.; «Конференция молодых ученых. Фундаментальные и прикладные космические исследования» ИКИ РАН 2011–2018 г.г.; «Пулковская молодежная конференция» ГАО РАН, 2018 г.; международных конференциях: “*Second Specturm-RG/eROSITA Conference*” 2012 г., Казань, Россия; “*Cosmology and relativistic astrophysics, Zeldovich-100*” 2014 г, Москва, Россия; “*Quasar at all cosmic epoch*” 2017 г., Падуя, Италия.

Объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав, общий объем которых составляет 122 страницы, включая 31 рисунок и 12 таблиц. Главы имеют отдельные списки цитируемой литературы, представленные в конце каждой главы. Общее количество цитируемой литературы составляет 150 публикаций.

Содержание работы

В первой главе (Введение) описаны решаемые в диссертации научные задачи, их научный контекст и актуальность. В конце первой главы приведены выносимые на защиту положения диссертационной работы, список публикаций по теме диссертации, апробация работы и описан личный вклад автора.

Во второй главе измерены массы сверхмассивных черных дыр (СМЧД) и темпы аккреции вещества для представительной выборки (Кривонос и др., 2007; Сазонов и др., 2007, 2012) близких сейфертовских галактик, зарегистрированных прибором *IBIS/ISGRI* обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Массы 68 СМЧД были измерены несколькими методами: по корреляции с инфракрасной светимостью звездного балджа, по характеристикам широких эмиссионных линий. Для ряда объектов проведено сравнение с более точными оценками масс СМЧД, взятыми из литературы.

Первый способ оценки массы СМЧД (Грэм, 2007) основан на масштабном соотношении между массой СМЧД и инфракрасной светимостью сфероидального компонента родительской галактики (балджа). Для 67 источников произведен расчет светимости балджа по данным фотометрического инфракрасного обзора всего неба *2MASS*, и получены оценки масс СМЧД по указанной корреляции:

$$\lg M_{\text{ВН}} = 0.93 \lg L_{K,b} - 33.41, \quad (1)$$

где $M_{\text{ВН}}$ — масса чёрной дыры в массах Солнца, а $L_{K,b}$ — инфракрасная светимость балджа (или эллиптической галактики) в фильтре K_S *2MASS*, измеряемая в эрг/с. Вклад излучения балджа посчитан в зависимости от морфологического типа галактик, а также был учтен вклад излучения АЯГ в наблюдаемый поток в фильтре K_S .

Второй способ измерения массы черной дыры основан на эмпирической зависимости $M_{\text{ВН}}$ от параметров широкой бальмеровской линии H_β ($\lambda = 4861 \text{ \AA}$) в спектрах сейфертовских галактик 1-го типа, полученной в работе (Вестергард и Петерсон, 2006):

$$\lg M_{\text{ВН}} = \lg \left[\left(\frac{\text{FWHM}(H_\beta)}{1000 \text{ км с}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{L(H_\beta)}{10^{42} \text{ эрг с}^{-1}} \right)^{0.63} \right] + 6.67, \quad (2)$$

где масса чёрной дыры $M_{\text{ВН}}$ выражена в солнечных массах, FWHM — ширина линии на полувысоте, L — светимость линии с учётом поглощения на луче зрения. Измерения масс СМЧД этим способом удалось сделать для 17 сейфертовских первого типа, спектры которых были получены нами на телескопе РТТ-150.

Используя полученные значения масс СМЧД, для каждого источника была посчитана критическая эддингтоновская светимость, и найдено отношение болометрической светимости к критической эддингтоновской светимости (см. рис. 1). Для большинства АЯГ это отношение лежит в диапазоне от 0.01-1. Это значит, что в АЯГ близкой Вселенной на $z < 0.1$ аккреция газа на СМЧД преимущественно идет в высоком темпе и в радиационно эффективном режиме.

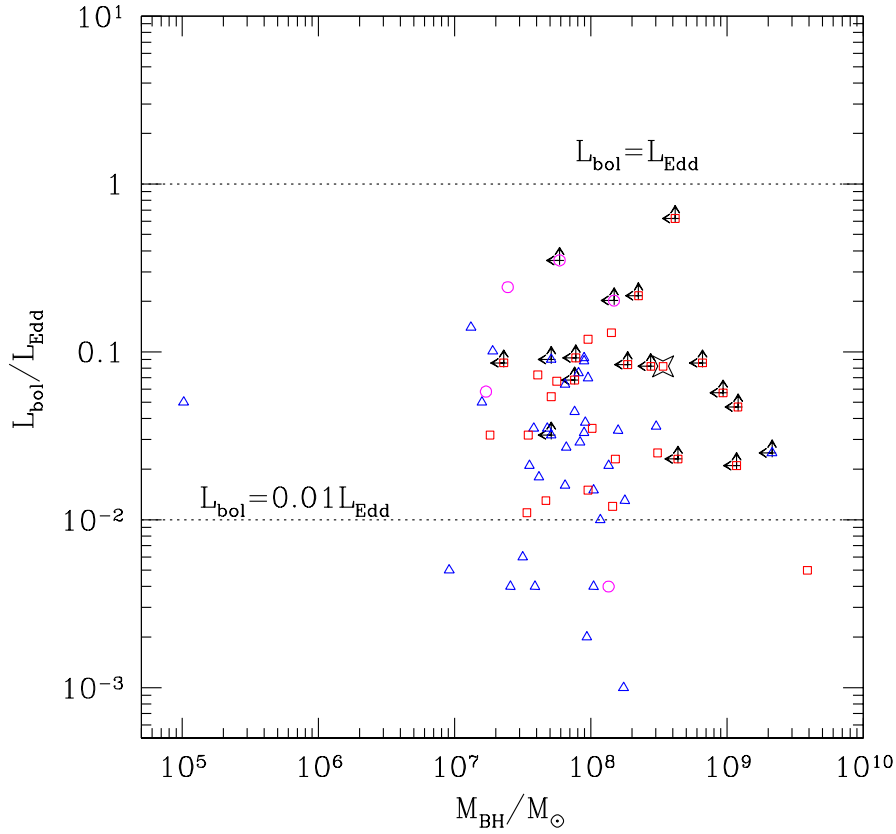


Рис. 1: Отношение болометрической к эддингтоновской светимости АЯГ в зависимости от массы СМЧД (M_{BH}), полученной по инфракрасной светимости балджа, за исключением LEDA 138501 (помечен четырехконечной звездой), для которого приведена оценка по параметрам широкой линии H_{β} . Сейфертовские галактики первого типа отмечены квадратами, второго типа — треугольниками, первого типа с нетипично узкими линиями (NLS1) — кружками. Неопределенности измерений не показаны.

В третьей главе описан метод поиска кандидатов в квазары первого типа на красных смещениях $3 < z < 5.5$. Далекие квазары это очень редкие источники. Они имеют низкую поверхностную плотность на небе (≈ 1 ист/кв. град). Поэтому очень сложно получить достаточную выборку далеких рентгеновских квазаров, чтобы достоверно исследовать эволюцию их плотности на больших красных смещениях.

Для отбора кандидатов в квазары на $z > 3$ среди рентгеновских источников обзора *3XMM-DR4* использовалась методика сравнения спектрального распределения энергии источника в оптическом и ИК-диапазонах с шаблонными спектрами квазаров, звезд и галактик. Такой способ не только дает вероятность того, что объект является квазаром, но и позволяет получить фотометрическую

оценку его красного смещения $z_{\text{фот.}}$. В случае квазаров на высоких красных смещениях, $z > 3$, надежность оценок их красных смещений по данным оптического диапазона растёт, поскольку в оптический диапазон попадает перепад интенсивности между яркой линией $\text{Ly}\alpha$ и $\text{Ly}\alpha$ -лесом в спектре квазара. Добавление инфракрасной фотометрии *WISE* повышает чистоту выборки кандидатов в далекие квазары и дает преимущество перед методами отбора, которые основаны только на фотометрии Слоановского обзора. Отталкиваясь от рентгеновской выборки источников, мы сильно повышаем чистоту отбора, т.к. заведомо исключаем слабые в рентгене источники, которые трудно отделить от далеких квазаров, используя только соотношения потоков в фильтрах *SDSS* и *WISE*, например: звезды и галактики на $z > 0.4$. Квазары являются звездообразными объектами, поэтому при поиске далеких квазаров мы рассматриваем только точечные источники Слоановского обзора.

Для получения фотометрических оценок красных смещений было использовано программное обеспечение *EAZY* (Браммер и др., 2008), которое подгоняет по амплитуде и красному смещению шаблоны спектров к наблюдаемому распределению энергии в фильтрах. Была составлена библиотека шаблонов квазаров, состоящая из квазаров и галактик различных морфологических типов, и использовалась библиотека шаблонов звезд (Пиклз, 1998) Для каждого объекта были проведены две отдельные итерации для указанных библиотек.

Квазары отделяются от звезд согласно условию $\chi_{star}^2 > \chi_{qso}^2$, где χ_{star}^2 — наименьшее значение χ^2 для шаблона из библиотеки звезд, χ_{qso}^2 — главный минимум распределения χ^2 для шаблонов квазаров, который определяет $z_{\text{фот.}}$. Наложено дополнительное фотометрическое ограничение $i' - z' < 0.6$, которое помогает отделить далекие квазары от звезд М-класса. Условия $\chi_{star}^2 > \chi_{qso}^2$ и $i' - z' < 0.6$ отсеивают 97% спектроскопически подтвержденных звезд в *SDSS* среди рентгеновских источников каталога *3XMM-DR4*.

Существует разброс значений $z_{\text{фот.}}$ относительно $z_{\text{спек.}}$, значит часть объектов с $z_{\text{спек.}} > 3$ будет иметь значения $z_{\text{фот.}} \lesssim 3$, поэтому при составлении каталога кандидатов в квазары на $z > 3$ мы выбрали нижнюю границу $z_{\text{фот.}} > 2.75$, чтобы достичь большей полноты квазаров на $z_{\text{спек.}} \approx 3$. Точность фотометрических оценок красных смещений составила: $\sigma_{\Delta z / (1+z_{\text{спек.}})} = 0.07$ при $\approx 9\%$ выбросов. Оценки качества отбора с помощью каталога спектроскопических красных смещений *SDSS DR12* (дополненного квазарами из каталога Флеш 2015) для рентгеновских источников *XMM-Ньютон* (*3XMM-DR4*) показывают, что полнота нашей выборки составляет около 80%, а ее

чистота — не менее 50%. Эта точность сравнима с другими подобными измерениями, выполненными по фотометрическим данным Слоановского обзора.

Описанным методом проведен отбор и составлен каталог 903 кандидатов в квазары первого типа (*K16*). Примерно 40% отобранных источников — это новые кандидаты в квазары, которые не имеют снятого спектра.

В четвертой главе описываются результаты экспериментальной проверки новых кандидатов на 1.6-метровом телескопе АЗТ-ЗЗИК и 6-метровом телескопе БТА. Проводится наблюдательная оценка чистоты выборки новых кандидатов. Телескоп АЗТ-ЗЗИК участвует в наземной поддержке обзора *Спектр-РГ* и оборудован новым спектрографом *АДАМ* (Афанасьев и др., 2016) с высокой квантовой эффективностью в ближнем ИК. Спектрограф *АДАМ* изготовлен в Специальной астрофизической обсерватории (САО) и в 2015 году установлен на АЗТ-ЗЗИК. Высокая чувствительность спектрографа позволила проверить кандидаты в квазары с красным смещением $z \approx 5$.

Был подтвержден источник *3XMM J125329.4+305539* — один из самых далеких ($z_{\text{спек.}} = 5.08$) оптически ярких ($i' \lesssim 21$) квазаров, из когда-либо обнаруженных в рентгеновских обзорах. Найдено несколько новых рентгеновских квазаров на $z_{\text{спек.}} > 4$. Получены наблюдательные оценки плотности оптически квазаров на $z > 5$.

Была подтверждена 50% чистота выборки кандидатов. Следовательно, разработанным методом отбора можно увеличить на $\approx 25\%$ число квазаров относительно спектроскопической выборки *SDSS* на $z > 3$. Таким образом, необходим дополнительный отбор оптически ярких квазаров на $z > 3$, чтобы получить более полную выборку далеких квазаров в обзоре *Спектр-РГ* относительно уже известных источников. Из-за того, что среди кандидатов остается высокий процент ошибочно классифицированных источников, необходима их спектроскопическая проверка, которая может быть проведена на телескопах АЗТ-ЗЗИК и БТА.

Пятая глава посвящена исследованию рентгеновской функции светимости самых ярких и далеких квазаров 1-го типа. Удалось составить выборку из 101 квазара со светимостями $L_{\text{X},2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с на $3 < z < 5$ на площади ≈ 300 кв. град. Эти источники имеют очень низкую поверхностную плотность, поэтому набрать такое число объектов в обзорах меньшей площади (Калфоунцоу и др., 2014; Вито и др., 2014; Георгакакис и др., 2015) было невозможно. Выборка составлена из объектов каталога *K16*, обсуждение которого ведется в

главах 3,4 этой диссертации. С помощью наблюдений на телескопах АЗТ-33ИК и БТА новых кандидатов в квазары из *K16*, удалось повысить качество выборки, увеличив до 90% долю спектроскопически подтвержденных квазаров. Полученная рентгеновская выборка ярких квазаров на $z > 3$ является одной из самых обширных по площади покрытия неба и числу ярких источников на $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с.

Под рентгеновской функцией светимости $\phi(L_{X,2-10}, z)$ подразумевается объемная плотность квазаров в единичном интервале десятичного логарифма рентгеновской светимости (в диапазоне 2–10 кэВ в собственной системе отсчета квазара) в зависимости от светимости и красного смещения.

В диссертации рассмотрены несколько популярных эмпирических моделей рентгеновской функции светимости. За их основу взята двухстепенная функция с изломом (Пиккинотти и др., 1982; Мияджи и др., 2000) вида:

$$\phi = \frac{A}{\left(\frac{L_X}{L_*}\right)^{\gamma_1} + \left(\frac{L_X}{L_*}\right)^{\gamma_2}}, \quad (3)$$

где A — нормировочный множитель, L_* — светимость излома, γ_1 и γ_2 — наклоны функции ниже и выше светимости излома, L_X — рентгеновская светимость.

Для определения всех параметров модели функции светимости нужна выборка, покрывающая широкий диапазон светимостей. Все объекты каталога *K16* имеют светимости выше предполагаемой светимости слома ($L_{X,2-10} \simeq 4 \times 10^{44}$ эрг/с). Поэтому наш каталог ярких квазаров *K16* был дополнен выборкой из работы Вито и др. (2014), которая содержит много объектов в районе светимости слома и ниже.

Известно, что повыборка *K16* обладает неполнотой обнаружения квазаров из-за недостаточной чувствительности обзора *SDSS*. С помощью соотношения между рентгеновской и оптической монохроматическими светимостями квазаров 1-го типа (Люссо и др., 2010) нами были получены поправки на неполноту отождествления рентгеновских квазаров в *SDSS*. Эти поправки используются при построении рентгеновской функции светимости.

Впервые сделаны значимые оценки плотности ярких квазаров на светимости $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$ эрг/с. Достоверно показано, что с уменьшением светимости плотность квазаров на $z \sim 3$ возрастает по отношению к плотности квазаров на $z \sim 5$ (см. рис. 2). Существенно улучшены ограничения на степенной наклон γ_2 функции светимости, который отвечает за спад плотности ярких квазаров (см. рис. 3).

Уточнены значения других параметров популярных моделей рентгеновской функции светимости. Проведено сравнение результатов с оценками функции светимости полученными ранее другими авторами в обзорах меньшей площади.

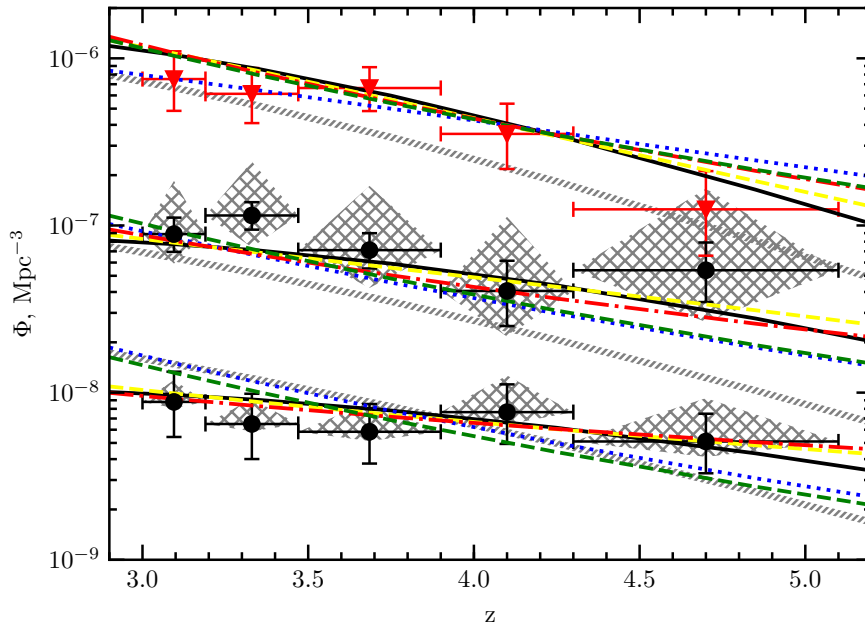


Рис. 2: Эволюция пространственной плотности (в сопутствующих координатах) далеких ярких квазаров 1-го типа. Треугольники — плотность квазаров с $44.5 \leq L_{X,2-10} < 45.0$, полученная по подвыборке Вито и др. (2014), кружки — плотность квазаров с $45.0 \leq \log L_{X,2-10} < 45.3$ и $45.3 \leq \log L_{X,2-10} < 45.9$, полученная по подвыборке *K16* для поправки на неполноту II. Заштрихованные области около точек *K16* — разброс значений плотности, связанный с неопределенностью в полноте этой подвыборки. Линиями показаны модели функции светимости для поправки на неполноту II: LADE (черная сплошная), LDDE (красный штрихпунктир), ILDE (желтая штриховая), PDE (зеленая штриховая), PLE (синие точки). Серой штрихованной линией показана модель LADE, полученная в работе Георгакакис и др. (2015).

На рис. 2 видно, что сопутствующая плотность ярких квазаров ($45.0 \leq \log L_{X,2-10} < 45.9$) изменяется не более чем в 2 раза между $z = 3$ и $z = 5$, в то время как плотность квазаров меньшей светимости ($44.5 \leq \log L_{X,2-10} < 45.0$) уменьшается на порядок (см. также Вито и др., 2014; Калфоунцоу и др., 2014). В предыдущих работах уже имелись указания на более медленную эволюцию более мощных квазаров, теперь же эта тенденция стала совершенно очевидной благодаря добавлению подвыборки ярких квазаров *K16*. Отметим, что неточное знание полноты выборки *K16* вносит основную неопределенность в полученные оценки плотности ярких квазаров

на светимостях $\log L_{X,2-10} \approx 45$. Однако при увеличении светимости в 2 раза ($\log L_{X,2-10} \geq 45.3$) плотность источников падает почти в 10 раз, источников в выборке становится меньше, и пуассоновские ошибки становятся больше разброса оценок, связанного с неполнотой.

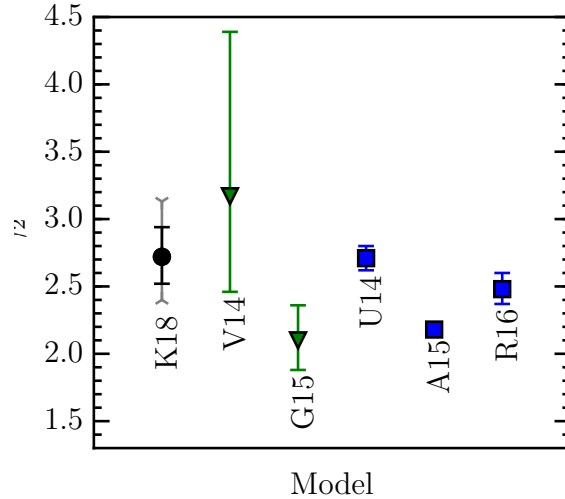


Рис. 3: Сравнение полученных в этой работе (K18) значений наклона яркой части функции светимости γ_2 наилучшей модели LADE с предыдущими оценками. Кружок с ошибкой — наклон $\gamma_2 = 2.72 \pm 0.21$ и его статистическая погрешность для модели LADE и поправки на неполноту II. Серым показан диапазон значений γ_2 для поправок на неполноту I и III с учетом статистических погрешностей. Треугольниками показаны оценки γ_2 модели LADE для квазаров на $z > 3$ из статей: V14 (Вито и др., 2014); G15 (Георгакакис и др., 2015). Квадратами показаны значения γ_2 модели LADE, полученные по выборкам квазаров в широких диапазонах светимостей и красных смещений, где объекты на $z > 3$ составляют всего несколько процентов: U14 (Уеда, 2014); A15 (Аирд и др., 2015) для источников, обнаруженных в диапазоне 0.5–2 кэВ; R16 (Раналли и др., 2016).

Проделанная работа показывает, что освоены все этапы исследования активных ядер галактик: отождествление рентгеновских и оптических каталогов, классификация, создание выборок с заданными свойствами, спектроскопическая проверка, получение научного результата. Освоенные методы применимы как к существующим рентгеновским обзорам, так и к данным планируемых миссий. Получены важные научные результаты по темпам аккреции АЯГ в близкой Вселенной и рентгеновской функции светимости далеких квазаров.

Список литературы

- Аирд и др. (J. Aird, A. Coil, A. Georgakakis, K. Nandra, G. Barro, and P. Perez-Gonzalez) MNRAS **451**, 1892 (2015)
- В. Афанасьев, С. Додонов, В. Амирханян, А. Моисеев, Астрофизический Бюллетень **71**, 514 (2016)
- Браммер и др. (G Brammer, P. van Dokkum, P. Coppi) Astrophys. J. **686**, 1503 (2008)
- Вестергаард и Петерсон (Vestergaard, M., & Peterson, B.M.), 2006, ApJ, 641, 689
- Вито и др. (F. Vito, R. Gilli, C. Vignali, A. Comastri, M. Brusa, N. Cappelluti, K. Iwasawa) MNRAS **445**, 3557 (2014)
- Георгакакис и др. (A. Georgakakis, J. Aird, J. Buchner, M. Salvato, M. Menzel, W. Brandt, I. McGreer, T. Dwelly, et al.) MNRAS **453**, 1946 (2015)
- Грэм (Graham, A.W.), 2007, MNRAS, 379, 711
- Калфоунцоу и др. (E. Kalfountzou, F. Civano, M. Elvis, M. Trichas, P. Green) MNRAS **445**, 1430 (2014)
- Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, M. Brusa) Astron. Astrophys. **558**, 89 (2013)
- Косс и др. (Koss, M., Trakhtenbrot, B., Ricci, C., et al.), 2017, ApJ, 850, 74
- Кривонос и др. (Krivonos, R., Revnivtsev, Lutovinov, A., et al.), 2007, A&A, 475, 775
- Кривонос и др. (R. Krivonos, S. Tsygankov, I. Mereminskiy, A. Lutovinov, S. Sazonov, R. Sunyaev) MNRAS **470**, 512 (2017)
- Люссо и др. (E. Lusso, A. Comastri, C. Vignali, G. Zamorani, M. Brusa, R. Gilli, K. Iwasawa, M. Salvato, et al.) Astron. Astrophys. **512**, 34 (2010)
- Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Bohringer, T. Boller, H. Brunner, M. Brusa, K. Dennerl, et al.) eROSITA Science Book , (2012)

- Мияджи и др. (T. Miyaji, G. Hasinger, and M. Schmidt) *Astron. Astrophys.* **353**, 25 (2000)
- Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, V. Arefiev, A. Glushenko, et al.) *Proceedings of the SPIE* **8147**, 5 (2011)
- Пиккиотти и др. (G. Piccinotti, R. Mushotzky, E. Boldt, S. Holt, F. Marshall, P. Serlemitsos, and R. Shafer) *Astrophys. J.* **253**, 485 (1982)
- Пиклз (A. Pickles) *PASP* **110**, 863 (1998)
- Раналли и др. (P. Ranalli, E. Koulouridis, I. Georgantopoulos, S. Fotopoulou, L. Hsu, and M. Salvato) *Astron. Astrophys.* **590**, A80 (2016)
- Сазонов и др. (Sazonov, S., Revnivtsev, M., Krivonos, R., et al.), 2007, *A&A*, 462, 57
- Сазонов и др. (Sazonov, S., Willner S., Goulding A., et al.), 2012, *ApJ*, 757, 181
- Тасним и др. (A. Tasnim, M. Salvato, S. LaMassa, M. Urry, et al.) *Astrophys. J.* **850**, 66 (2017)
- Уеда и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, M. Watson) *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014)
- Флеш (E. W. Fleisch) *Publications of the Astronomical Society of Australia* **32**, 010 (2015); arXiv:1502.06303