

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 524.7-82/520.85



Малыгин Евгений Андреевич

**Исследование геометрии и кинематики центральных
областей активных галактик**

1.3.1 – физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Нижний Архыз — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук.

Научный руководитель: **Моисеев Алексей Валерьевич**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
САО РАН

Официальные оппоненты: **Левшаков Сергей Анатольевич**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
Кравченко Евгения Васильевна
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
МФТИ

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет".

Защита состоится 7 ноября 2023 года в 9 часов на открытом заседании диссертационного совета 24.1.212.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан 7 сентября 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Сверхмассивные чёрные дыры (СМЧД) условно являются наиболее притягательными, в том числе и для исследований, объектами во Вселенной. СМЧД обнаружены в ядрах многих галактик, включая активные. Активные ядра галактик (АЯГ) обладают наибольшей светимостью во Вселенной и переменной яркостью во всех диапазонах электромагнитного спектра, поскольку в них происходит экстремальное энерговыделение посредством аккреции вещества на СМЧД. Наблюдения указывают на эволюционную связь между СМЧД в центрах галактик и их сфероидальными звёздными компонентами (балджами), а также с галактическими гало, состоящими из тёмной материи. Массы центральных чёрных дыр коррелируют с оптической светимостью родительских галактик (её сферической составляющей), с дисперсией скоростей звёзд в ней, а также с полной звёздной массой в балдже [1–7]. Считается, что величина спина СМЧД играет центральную роль в генерации релятивистских джетов в АЯГ, и мощность релятивистского джета часто используется для определения величины спина [8]. Таким образом, исследование характеристик СМЧД и их окрестностей в АЯГ является важнейшей задачей астрофизики для изучения вещества в экстремальных условиях и понимания эволюции галактик, что прекрасно проиллюстрировано в обзорах [3; 9; 10].

К настоящему времени большинство наблюдаемых проявлений АЯГ хорошо описываются Унифицированной схемой [11; 12] (УС) в предположении о различной ориентации характерных газовых и пылевых структур в области активного ядра. Спектры сейфертовских галактик [13] первого типа (Sy 1) содержат узкие запрещённые эмиссионные линии, а также широкие разрешённые линии, причём широкие профили состоят из двух компонент – помимо широкой составляющей присутствует и узкая, что указывает на две разные области формирования этих линий – BLR (broad line region, область формирования широких линий) и NLR (narrow line region, область формирования узких линий). Эти области пространственно разнесены, а излучающий газ в обеих областях имеет облачную структуру [14; 15]. Спектры сейфертовских галактик второго типа (Sy 2) содержат разрешённые и запрещённые линии примерно одной ширины, а именно – без широких компонент разрешённых линий.

Обнаружение поляризованного компонента широкой линии $H\alpha$ в спектре Sy 2 галактики NGC 1068 [16], а также других объектов, доказало, что активные галактики типа Sy 1 и Sy 2 по своей природе являются однотипными объектами, но наблюдаемыми в различных ориентациях в присутствии окружающего BLR-область экранирующего оптически и геометрически толстого газопылевого тора [11].

Справедливость УС подтверждают радиоинтерферометрические наблюдения тени СМЧД [17], открытие рентгеновской линии железа, образующейся в аккреционном диске на расстоянии нескольких гравитационных радиусов от центральной машины [18]. Модель подкрепляется и пространственным разрешением внешних NLR-областей ближайших АЯГ [19; 20], а благодаря наблюдениям с высоким угловым разрешением в ИК [21–24] и в молекулярных линиях [например, 25]. в настоящее время возможно получение прямых изображений пылевого тора, однако в оптическом диапазоне эта структура с её внутренним содержимым остаётся неразрешимой и представляет особый интерес. Ведь именно в центральной парсеке от наблюдателей скрыты обращающиеся вокруг СМЧД облака газа, исследование кинематики которых позволяет наиболее точно измерить массу чёрной дыры.

Наиболее точным методом измерения массы СМЧД в АЯГ является кинематика мегамазеров с использованием интерферометрии с очень длинной базой [26; 27]. Однако наблюдаемые с ребра вращающиеся по кеплеровскому закону мегамазеры встречаются нечасто [28]. И в более общем случае скорость газовых облаков в BLR вдоль луча зрения определяют по доплеровскому уширению спектральных линий излучения, однако, определение расстояния до излучающего вещества от центрального объекта является более трудоёмкой задачей.

В пионерской работе в 1973 Черепашук и Лютый [29] с интерференционным клиновидным фильтром для трёх АЯГ получили ряды узкополосных наблюдений длительностью несколько месяцев и опубликовали первые оценки размеров BLR по измеренным временным запаздываниям τ между переменностью излучения в линии $H\alpha$ и переменностью непрерывного (континуального) ультрафиолетового излучения аккреционного диска. Интенсивность широких линий реагирует на переменность в континууме с некоторым запаздыванием, поскольку свету для достижения области формирования широких линий требуется некоторое время. Таким образом, первые оценки размеров излучающих BLR-областей оказались порядка $R_{\text{BLR}} = c \cdot \tau \sim 0.02$ пк, где c – скорость света. Метод исследования BLR по отклику линий на переменность континуума получил развитие в ряде работ [30–33] и теперь широко известен как метод эхокартирования.

Даже для оценки размеров близких структур метод эхокартирования требует накопления длительного наблюдательного ряда. Также важно заметить, что несмотря на эффективность данного широко применяемого метода для АЯГ 1-го типа, оценивать массу СМЧД по размерам BLR-области возможно с точностью до угла наклона системы [34], поскольку измеряемая по дисперсии широкого профиля спектральной линии лучевая скорость газа является проекцией на луч зрения, а, следовательно, меньше действительной. Извлечь информацию о геометрии и физике вещества в неразрешимых ядрах активных галактик позволяют поляриметрические

методы. Афанасьев и Попович [35] в 2015 предложили новый подход к исследованию скоростей газа в BLR в АЯГ 1 типа с экваториальным рассеянием с использованием спектрополяриметрических наблюдений в 1 эпоху. Изначально неполяризованное излучение дифференциально вращающегося BLR-диска поляризуется при отражении от внутренних границ пылевого тора. Излучение от разных частей BLR-диска, с одной стороны, соответствует разным доплеровским смещениям (вследствие дифференциального вращения и различных скоростей), а с другой – отражается от пылевого тора под разными углами, что обнаруживается в изменении угла поляризации вдоль профиля широкой линии. Измерение изменения угла поляризации в зависимости от скорости газа BLR позволяет измерить массу центральной СМЧД. При этом данный спектрополяриметрический метод снимает ограничения, связанные с наклоном BLR-области к лучу зрения, что позволяет измерить массы СМЧД при любых углах, характерных для данного типа АЯГ.

Тогда в сравнении с вириальными оценками масс СМЧД, полученными методом эхокартирования, спектрополяриметрический метод позволяет определить геометрическую ориентацию АЯГ, что делает комбинацию методов крайне эффективным инструментом исследования.

В свою очередь, для спектрополяриметрического метода требуется определение размера пылевого тора, от которого происходит отражение. В настоящее время есть три метода определения размера пылевого тора, два из которых инфракрасные. Первый метод – ИК-эхокартирование, основанное на поиске задержки между переменностью оптического излучения аккреционного диска и теплового излучения пыли в торе. Если для определения размера BLR порядка светового месяца требуются годы наблюдений, то размеры тора характеризуются уже сотнями, а иногда тысячами световых дней. Второй метод – ИК-интерферометрия, и данный метод ограничен вследствие пространственного разрешения и пригоден лишь для самых близких галактик. Наконец, третий метод был предложен в 2020 Шабловинской с соавторами [36], и он основан на поиске задержки переменности поляризованного излучения в широкой линии относительно переменности неполяризованного континуума, что позволяет определять расстояние до области экваториального рассеяния, или радиуса сублимации пыли. Фактически, это самое эффективное дополнение спектрополяриметрического метода измерения масс СМЧД, поскольку пылевые области, наблюдаемые в ИК, могут располагаться дальше от центра АЯГ на большей оптической глубине, чем область рассеяния оптического излучения.

Однако спектрополяриметрический мониторинг, лежащий в основе работы [36], затруднителен для массового исследования активных галактик, поскольку требует больших затрат времени на крупнейших оптических телескопах. Таким образом встаёт необходимость разработки

наблюдательных поляриметрических методик с использованием телескопов метрового класса. В последнее десятилетие вновь начал набирать популярность фотометрический метод эхокартирования [37] с помощью среднеполосных фильтров, спектрально ориентированных на континуальное излучение и излучение в широких линиях, что в отличие от спектрального метода эхокартирования позволяет использовать телескопы меньших диаметров. Расширение метода фотометрического эхокартирования посредством добавления в оптический тракт анализатора поляризации может способствовать поляриметрическому мониторингу для поиска задержки переменности излучения в поляризованной компоненте широкой линии относительно континуальной и последующему измерению расстояния до области экваториального рассеяния. Поляриметрия в фильтрах подразумевает существенное увеличение отношения сигнал/шум (S/N) относительно спектрополяриметрии, что приводит к повышению эффективности продолжительных мониторинговых исследований в поляризованном свете с вовлечением телескопов малых и средних диаметров, имеющих более доступное наблюдательное время.

Таким образом, в эру многоволновых исследований АЯГ комбинация оптических методов выступает эффективным (и в настоящее время, вероятно, единственным) инструментом для исследования геометрии и кинематики центральных структур активных галактик. Методы исследования зависимости потока излучения от времени, от длины волны, и тем более от состояния поляризации позволяют детальнее уточнить портрет АЯГ и наши представления о состоянии вещества в пространственно неразрешимых и при этом самых экстремальных условиях в окрестностях СМЧД. Также важно, чтобы различные методики показывали непротиворечивые самосогласованные результаты.

Целью данной работы является исследование физических характеристик, геометрии и кинематики вещества в центральном оптически неразрешимом парсеке АЯГ с помощью различных оптических наблюдательных методов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Адаптация методики фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах для определения размеров BLR-областей.
2. Определение скоростей газа в BLR, масс и спинов СМЧД, параметров аккреционного диска и геометрической ориентации систем.
3. Адаптация методики поляриметрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах для определения радиуса сублимации пыли.
4. Методическое исследование многорежимного фокального редуکتора MAGIC (Monitoring of Active Galaxies by Investigation their Cores) для 1-м телескопа Цейсс-1000 САО РАН для проведения с

его помощью высокоточных наблюдений внегалактических объектов.

Научная новизна:

1. В ходе многолетнего мониторинга впервые измерены размеры BLR-областей в объектах LEDA 3095839 и VII Zw 244 методом фотометрического эхокартирования, что позволило оценить массы их центральных СМЧД.
2. Впервые в спектре галактики VII Zw 244 в поляризованном свете были обнаружены признаки экваториального рассеяния в линиях $H\alpha$ и $H\beta$, что позволило применить спектрополяриметрический метод измерения массы СМЧД и в комбинации с методом фотометрического эхокартирования независимо определить угол наклона системы. Также на основе спектральных данных впервые дана оценка спина центральной СМЧД и величины напряжённости магнитного поля на горизонте событий.
3. Впервые для галактики LEDA 3095839 из спектрополяриметрических наблюдений были получены оценки величины спина СМЧД, напряжённости магнитного поля на горизонте событий и угла наклона системы.
4. Впервые для объектов Mrk 335 и Mrk 509 получены оценки расстояний до области экваториального рассеяния методом поляриметрического эхокартирования.

Научная и практическая значимость:

1. На примере наблюдений методом фотометрического картирования в среднеполосных фильтрах показано, что результаты не уступают спектральному методу эхокартирования, но при этом экономят телескопное время и позволяют применять методику на телескопах 1-м диаметра для картирования АЯГ.
2. Представленные в работе спектрополяриметрические данные показывают возможность применения разных численных моделей генерации поляризации излучения в континууме и линии, а значит – оценки широкого набора параметров СМЧД и газа вокруг неё.
3. Адаптация метода поляриметрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах позволяет эффективно использовать телескопы малых и средних диаметров для оценки размеров области экваториального рассеяния R_{sc} в АЯГ 1-го типа. Это позволит повысить точность спектрополяриметрического метода измерения масс СМЧД для большего количества ярких АЯГ, поскольку прежде величина R_{sc} оценивалась из допущений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для активных галактик VII Zw 244 и LEDA 3095839 определены размеры областей формирования широких линий с помощью

адаптированной методики фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах на 1-м и 6-м оптических телескопах САО РАН.

2. Для активных галактик VII Zw 244 и LEDA 3095839 по спектральным данным оценены скорости газа в области формирования широких линий. Выявлены различные механизмы генерации поляризации излучения – формирование в аккреционном диске для LEDA 3095839 и признаки экваториального рассеяния для VII Zw 244. Анализ поляриметрических и спектрополяриметрических данных в комбинации с методом эхокартирования позволил определить величины массы и спинов центральных СМЧД, напряжённости магнитного поля на горизонте событий и углов наклона системы. Для LEDA 3095839 определён показатель степени зависимости магнитного поля в аккреционном диске от радиуса.
3. Для активных галактик Mrk 335 и Mrk 509 определены расстояния до области экваториального рассеяния с помощью адаптированного метода поляриметрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН с прибором MAGIC.
4. Достигнута точность измерения линейной поляризации в среднеполосных фильтрах лучше 0.6% для объектов до 14 зв. величины за 20 минут экспонирования, с помощью нового прибора MAGIC на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Выполнено исследование характеристик данного прибора для задач изучения поляризации звездообразных и протяжённых объектов.

Апробация работы. Результаты диссертации лично представлялись диссертантом в виде докладов на семинарах САО РАН, КрАО РАН и КФУ, на конкурсе-конференции САО РАН, и на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пушчинская РадиоАстрономическая Обсерватория (Пушчино), 24-26.04.2019 — устный доклад, "Фотометрическое эхокартирование BLR-областей в AGN на $0.1 < z < 0.8$ и определение их характерных размеров", Малыгин Е.А., Уклеин Р.И.
2. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2018", ИКИ РАН, Москва, 18-21.12.2018 — стендовый доклад, "Определение характерных размеров BLR-областей на $0.1 < z < 0.8$ с помощью прибора MaNGaL", Малыгин Е.А.
3. "Современная звёздная астрономия", САО РАН, 10-11.07.2019 — устный доклад, "Фотометрическое эхокартирование BLR-областей в галактиках с активными ядрами на $0.1 < z < 0.8$ ", Малыгин Е.А., Уклеин Р.И., Шабловинская Е.С., Перепелицын Е.А., Гроховская А.А.

4. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2019)", ИКИ РАН, Москва, 17-20.12.2019 — стендовый доклад, "Исследование AGN на $0.1 < z < 0.8$ методом фотометрического эхокартирования", Малыгин Е.А., Шабловинская Е.С., Уклеин Р.И., Гроховская А.А., Перепелицын Е.А.
5. "XII Serbian-Bulgarian Astronomical Conference", Сокобана, Сербия, 25-29.09.2020 — устный доклад, "The first results of the photometric reverberation project at the 1-m telescope of SAO RAS", Malygin Eugene, Uklein Roman, Shablovinskaya Elena, Grokhovskaya Aleksandra.
6. "ВАК-2021", 23-28.08.2021 — устный доклад, "Измерение масс сверхмассивных чёрных дыр в ядрах активных галактик методом фотометрического эхокартирования", Малыгин Е.А., Шабловинская Е.С., Уклеин Р.И., Гроховская А.А.
7. "13th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", Белград, Сербия, 23-27.08.2021 — устный доклад, "The photometric reverberation mapping of active galaxies in SAO RAS", E. Malygin, E. Shablovinskaya, R. Uklein and A. Grokhovskaya.
8. Crimean-2021 Conference "Galaxies with Active Nuclei on Scales from Black Hole to Host Galaxy", Крым, 13-17.09.2021 — устный доклад, "Measurement of the SMBH masses in AGN by the photometric reverberation mapping", Malygin Eugene, Shablovinskaya Elena, Uklein Roman, Grokhovskaya Aleksandra.
9. "V Conference on Active Galactic Nuclei and Gravitational Lensing", Сербия, 13-17.06.2022 — устный доклад, "MAGIC for 1-m telescope of SAO RAS", Afanasiev V.L., Malygin E.A., Shablovinskaya E.S., Uklein R.I., Amirkhanyan V.R., Perpelitsyn A.E., Afanasieva I.V.
10. "14th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", Сербия, 19-23.06.2023 — устный доклад, "Polarimetric reverberation mapping of AGNs in medium-band filters", E. Malygin, E. Shablovinskaya, L.Č. Popović, R. Uklein, D. Ilić, S. Ciroi, D. Oparin, L. Crepaldi, L. Slavicheva-Mihova, B. Mihov and Y. Nikolov.

Публикации по теме диссертации

1. Uklein R. I., **Malygin E. A.**, Shablovinskaya E. S., Perpelitsyn A. E., Grokhovskaya A. A.; "Photometric Reverberation Mapping of AGNs at $0.1 < z < 0.8$. I. Observational Technique", *Astrophysical Bulletin*, Volume 74, Issue 4, p. 388-395 (2019)
2. **Malygin E.**, Uklein R., Shablovinskaya E., Grokhovskaya A., Perpelitsyn A.; "Medium-band photometric reverberation mapping of AGNs at $0.1 < z < 0.8$. Techniques and sample", *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, Volume 50, no. 1, p. 328-340 (2020)

3. **Malygin E. A.**, Shablovinskaya E. S., Uklein R. I., Grokhovskaya A. A.; "Measurement of the supermassive black hole masses in two active galactic nuclei by the photometric reverberation mapping method", *Astronomy Letters*, Volume 46, Issue 11, p. 726-733 (2020)
4. Afanasiev V. L., Amirkhanyan V. R., Uklein R. I., Perepelitsyn A. E., **Malygin E. A.**, Shablovinskaya E. S., Afanasieva I. V.; "Universal focal reducer for small telescopes", *Astronomische Nachrichten*, Volume 343, Issue 1-2, article id. e210104 (2022)
5. Shablovinskaya Elena, Piotrovich Mikhail, **Malygin Eugene**, Buliga Stanislava, Natsvlisvili Tinatin; "Determination of the Physical Parameters of AGNs in Seyfert 1 Galaxies LEDA 3095839 and VII Zw 244 Based on Spectropolarimetric Observations", *Universe*, Volume 8, Issue 7, p. 383 (2022)
6. Shablovinskaya Elena, Popović Luka Č., Uklein Roman, **Malygin Eugene**, Ilić Dragana, Ciroi Stefano, Oparin Dmitry, Crepaldi Luca, Slavicheva-Mihova Lyuba, Mihov Boyko, Nikolov Yanko; "Polarimetric reverberation mapping in medium-band filters", *Universe*, Volume 9, Issue 1, p. 52 (2023)

Личный вклад автора

В работах [1], [2], [3] — получение наблюдательного материала на 1-м телескопе Цейсс-1000 с приборами MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines), MMPP (Multi-Mode Photometer-Polarimeter), StoP (Stokes Polarimeter) и 6-м телескопе БТА с приборами SCORPIO-1 (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations), SCORPIO-2, адаптация метода фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах, обработка и анализ фотометрических данных, совместное обсуждение результатов. В работе [4] — получение наблюдательного материала на 1-м телескопе Цейсс-1000, методическая работа по введению в эксплуатацию нового многорежимного фокального редуктора MAGIC. В работе [5] — получение наблюдательного материала на 6-м телескопе БТА с прибором SCORPIO-2, анализ полученных данных, обсуждение результатов наравне с соавторами. В работе [6] — получение наблюдательного материала на 1-м телескопе Цейсс-1000 с приборами StoP, MAGIC, анализ поляриметрических данных, адаптация метода поляриметрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах, обсуждение результатов наравне с соавторами.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырёх Глав, Заключения. Полный объём диссертации составляет 94 страницы, включая 22 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 143 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы, описывается научная новизна и практическая значимость работы. Приводится список публикаций, содержащих основные результаты исследования. Описывается апробация полученных результатов.

В **первой Главе** приводится описание особенностей наблюдений в режимах фотометрии, поляриметрии, спектроскопии и спектрополяриметрии, а также обработки получаемых наблюдательных данных. В **разделе 1.1** вводится система АВ-величин, используемая в дальнейшем в работе. В **разделе 1.1.1** описываются характеристики фотометрических мод приборов, с помощью которых получался наблюдательный материал. В **разделе 1.1.2** описана методика фотометрических наблюдений. **Раздел 1.1.3** посвящён проблеме рассеянного света в телескопе Цейсс-1000 САО РАН и его устранению для улучшения качества наблюдений. В **разделе 1.2** описываются параметры Стокса, и вводятся определения степени и угла плоскости поляризации, используемые далее в работе. Описывается коррекция за статистическое смещение полученных при низком отношении сигнал/шум поляриметрических данных. Описана редукция данных. В **разделе 1.2.1** описываются характеристики поляриметрических мод приборов, содержащих в качестве анализатора поляризации клиновую двойную призму Волластона, а в **разделе 1.2.2** описывается методическое исследование поляриметрической моды нового фокального редуктора MAGIC для 1-м телескопа Цейсс-1000 САО РАН с двойной призмой Волластона квадрупольного дизайна. **Раздел 1.3** посвящён описанию спектроскопического метода наблюдений, **раздел 1.4** описывает спектрополяриметрический метод наблюдений.

Вторая Глава посвящена исследованию двух АЯГ LEDA 3095839 и VII Zw 244 методом фотометрического эхокартирования. Метод описывается в **разделе 2.1**. **Раздел 2.2** посвящён краткому описанию фотометрических и спектральных наблюдений АЯГ. В **разделе 2.3** анализируются полученные данные на предмет вычисления расстояний до обращающихся вокруг СМЧД облаков газа и их скоростей. В частности, в **разделе 2.3.1** описан метод моделирования кривых блеска по имеющимся наблюдательным данным, а в **разделе 2.3.2** приведён спектральный анализ, включающий декомпозицию сложного профиля широкой линии и вычисление дисперсии скоростей. В **разделе 2.4** даются оценки масс центральных СМЧД исследуемых галактик, полученные результаты обсуждаются и сравниваются с предыдущими косвенными оценками по эмпирическим зависимостям.

В **третьей Главе** исследуются те же объекты, но с применением более глубокого спектрополяриметрического анализа. В **разделе 3.1** кратко описаны наблюдения исследуемых АЯГ в поляризованном свете – в **разделе 3.1.1** спектрополяриметрические наблюдения, в **разделе**

3.1.2 наблюдения в режиме поляриметрии. **Раздел 3.2** посвящён анализу полученных данных и измерению различных физических и геометрических характеристик АЯГ. В **разделе 3.2.1** для активной галактики LEDA 3095839 приводятся измеренные значения континуальной поляризации, болометрической светимости, угла наклона системы и величины спина СМЧД. Также рассчитывается геометрия распределения магнитного поля в аккреционном диске. В **разделе 3.2.2** для активной галактики VII Zw 244 описаны обнаруженные признаки экваториального рассеяния излучения, на основании которых был применён спектрополяриметрический метод измерения массы центральной СМЧД, не зависящий от геометрии системы. Сравнение полученных спектрополяриметрических результатов с результатами эхокартирования позволило измерить угол наклона системы. Также приводятся оценки величин болометрической светимости, спина СМЧД и магнитного поля в аккреционном диске. **Раздел 3.3** подытоживает полученные результаты для исследуемых активных галактик.

В **четвёртой Главе** описывается адаптация метода поляриметрического эхокартирования АЯГ в среднеполосных фильтрах, а также полученные результаты в ходе многолетнего поляриметрического мониторинга. Исследуются две активные галактики Mrk 335 и Mrk 509, в широких линиях которых ранее были обнаружены признаки экваториального рассеяния. В **разделе 4.1** описаны поляриметрические наблюдения исследуемых АЯГ, в **разделе 4.2** полученные из наблюдений данные анализируются. В частности, в **разделах 4.2.1** и **4.2.2** для галактик Mrk 335 и Mrk 509 соответственно приводится анализ кривых блеска, полученных в поляризованной линии и в неполяризованном континууме. **Раздел 4.3** посвящён обсуждению полученных результатов измерения размеров областей экваториального рассеяния для исследуемых активных галактик.

Заключение подытоживает все полученные результаты в рамках данной работы.

Список литературы

1. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion / K. Gebhardt [и др.] // *ApJL*. — 2000. — Авт. — Т. 539, № 1. — С. L13–L16. — arXiv: [astro-ph/0006289](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006289) [astro-ph].
2. *Ferrarese, L.* A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies / L. Ferrarese, D. Merritt // *ApJL*. — 2000. — Авт. — Т. 539, № 1. — С. L9–L12. — arXiv: [astro-ph/0006053](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006053) [astro-ph].

3. *Kormendy, J.* Supermassive black holes in galactic nuclei / J. Kormendy, K. Gebhardt // 20th Texas Symposium on relativistic astrophysics. T. 586 / под ред. J. C. Wheeler, H. Martel. — 10.2001. — С. 363–381. — (American Institute of Physics Conference Series). — arXiv: [astro-ph/0105230](#) [[astro-ph](#)].
4. The M- σ and M-L Relations in Galactic Bulges, and Determinations of Their Intrinsic Scatter / K. Gültekin [и др.] // ApJ. — 2009. — ИЮНЬ. — Т. 698, № 1. — С. 198–221. — arXiv: [0903.4897](#) [[astro-ph.GA](#)].
5. *McConnell, N. J.* Revisiting the Scaling Relations of Black Hole Masses and Host Galaxy Properties / N. J. McConnell, C.-P. Ma // ApJ. — 2013. — Февр. — Т. 764, № 2. — С. 184. — arXiv: [1211.2816](#) [[astro-ph.CO](#)].
6. *Kormendy, J.* Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies / J. Kormendy, L. C. Ho // Annual Review of Astron and Astrophys. — 2013. — Авр. — Т. 51, № 1. — С. 511–653. — arXiv: [1304.7762](#) [[astro-ph.CO](#)].
7. *Heckman, T. M.* The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe / T. M. Heckman, P. N. Best // Annual Review of Astron and Astrophys. — 2014. — Авр. — Т. 52. — С. 589–660. — arXiv: [1403.4620](#) [[astro-ph.GA](#)].
8. *Daly, R. A.* Estimates of black hole spin properties of 55 sources / R. A. Daly // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — ИЮНЬ. — Т. 414, № 2. — С. 1253–1262. — arXiv: [1103.0940](#) [[astro-ph.CO](#)].
9. *Cherepashchuk, A. M.* Black holes in binary stellar systems and galactic nuclei / A. M. Cherepashchuk // Physics Uspekhi. — 2014. — Апр. — Т. 57, № 4. — С. 359–376.
10. *Cherepashchuk, A. M.* Observing stellar mass and supermassive black holes / A. M. Cherepashchuk // Physics Uspekhi. — 2016. — ИЮЛЬ. — Т. 59, № 7. — С. 702–712.
11. *Antonucci, R.* Unified models for active galactic nuclei and quasars. / R. Antonucci // Annual Review of Astron and Astrophys. — 1993. — ЯНВ. — Т. 31. — С. 473–521.
12. *Urry, C. M.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei / C. M. Urry, P. Padovani // PASP. — 1995. — СЕНТ. — Т. 107. — С. 803. — arXiv: [astro-ph/9506063](#) [[astro-ph](#)].
13. *Seyfert, C. K.* Nuclear Emission in Spiral Nebulae. / C. K. Seyfert // ApJ. — 1943. — ЯНВ. — Т. 97. — С. 28.

14. *Dibai, É. A.* A Spectrophotometric Study of Seyfert-Galaxy Nuclei. / *É. A. Dibai, V. I. Pronik* // *Soviet Astronomy*. — 1968. — Апр. — Т. 11. — С. 767.
15. *Khachikian, E. Y.* A New Cloud of Hydrogen Emission in a Bright Galactic Nucleus / *E. Y. Khachikian, D. W. Weedman* // *ApJL*. — 1971. — Март. — Т. 164. — С. L109.
16. *Antonucci, R. R. J.* Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. / *R. R. J. Antonucci, J. S. Miller* // *ApJ*. — 1985. — Окт. — Т. 297. — С. 621–632.
17. *Event Horizon Telescope Collaboration.* First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole / *Event Horizon Telescope Collaboration* // *ApJL*. — 2019. — Апр. — Т. 875, № 1. — С. L1. — arXiv: [1906.11238](https://arxiv.org/abs/1906.11238) [[astro-ph.GA](#)].
18. Gravitationally redshifted emission implying an accretion disk and massive black hole in the active galaxy MCG-6-30-15 / *Y. Tanaka* [и др.] // *Nature*. — 1995. — Июнь. — Т. 375, № 6533. — С. 659–661.
19. Progress Towards Understanding the Physics of the Narrow Line Region of Seyfert Galaxies / *D. J. Axon* [и др.] // *Science with the Hubble Space Telescope - II* / под ред. *P. Benvenuti, F. D. Macchetto, E. J. Schreier*. — 01.1996. — С. 207.
20. *Bennert, V. N.* The narrow-line region of active galaxies (PhD thesis) / *V. N. Bennert*. — 2005. — Янв.
21. The innermost dusty structure in active galactic nuclei as probed by the Keck interferometer / *M. Kishimoto* [и др.] // *A&A*. — 2011. — Март. — Т. 527. — A121. — arXiv: [1012.5359](https://arxiv.org/abs/1012.5359) [[astro-ph.CO](#)].
22. VLTI/AMBER observations of the Seyfert nucleus of NGC 3783 / *G. Weigelt* [и др.] // *A&A*. — 2012. — Май. — Т. 541. — С. L9. — arXiv: [1204.6122](https://arxiv.org/abs/1204.6122) [[astro-ph.GA](#)].
23. An image of the dust sublimation region in the nucleus of NGC 1068 / *GRAVITY Collaboration* [и др.] // *A&A*. — 2020. — Февр. — Т. 634. — A1. — arXiv: [1912.01361](https://arxiv.org/abs/1912.01361) [[astro-ph.GA](#)].
24. The Dust Sublimation Region of the Type 1 AGN NGC 4151 at a Hundred Microarcsecond Scale as Resolved by the CHARA Array Interferometer / *M. Kishimoto* [и др.] // *ApJ*. — 2022. — Ноябрь. — Т. 940, № 1. — С. 28. — arXiv: [2209.06061](https://arxiv.org/abs/2209.06061) [[astro-ph.GA](#)].
25. ALMA observations of molecular tori around massive black holes / *F. Combes* [и др.] // *A&A*. — 2019. — Март. — Т. 623. — A79. — arXiv: [1811.00984](https://arxiv.org/abs/1811.00984) [[astro-ph.GA](#)].

26. Precise Black Hole Masses from Megamaser Disks: Black Hole-Bulge Relations at Low Mass / J. E. Greene [и др.] // *ApJ*. — 2010. — Сент. — Т. 721, № 1. — С. 26–45. — arXiv: [1007.2851 \[astro-ph.CO\]](#).
27. The Megamaser Cosmology Project. III. Accurate Masses of Seven Supermassive Black Holes in Active Galaxies with Circumnuclear Megamaser Disks / С. У. Куо [и др.] // *ApJ*. — 2011. — Янв. — Т. 727, № 1. — С. 20. — arXiv: [1008.2146 \[astro-ph.CO\]](#).
28. Toward Precision Supermassive Black Hole Masses Using Megamaser Disks / R. C. E. van den Bosch [и др.] // *ApJ*. — 2016. — Март. — Т. 819, № 1. — С. 11. — arXiv: [1601.00645 \[astro-ph.GA\]](#).
29. *Cherepashchuk, A. M.* Rapid Variations of H α Intensity in the Nuclei of Seyfert Galaxies NGC 4151, 3516, 1068 / A. M. Cherepashchuk, V. M. Lyutyi // *Astrophys. Lett.* — 1973. — Март. — Т. 13. — С. 165.
30. *Blandford, R. D.* Reverberation mapping of the emission line regions of Seyfert galaxies and quasars. / R. D. Blandford, C. F. McKee // *ApJ*. — 1982. — Апр. — Т. 255. — С. 419–439.
31. *Capriotti, E. R.* The time variation of broad emission-line profiles of Seyfert 1 galaxies / E. R. Capriotti, C. B. Foltz, B. M. Peterson // *ApJ*. — 1982. — Окт. — Т. 261. — С. 35–41.
32. *Gaskell, C. M.* Line Variations in Quasars and Seyfert Galaxies / C. M. Gaskell, L. S. Sparke // *ApJ*. — 1986. — Июнь. — Т. 305. — С. 175.
33. *Peterson, B. M.* Reverberation Mapping of Active Galactic Nuclei / B. M. Peterson // *PASP*. — 1993. — Март. — Т. 105. — С. 247.
34. *Peterson, B. M.* Measuring the Masses of Supermassive Black Holes / B. M. Peterson // *Space Science Reviews*. — 2014. — Сент. — Т. 183, № 1–4. — С. 253–275.
35. *Afanasiev, V. L.* Polarization in Lines—A New Method for Measuring Black Hole Masses in Active Galaxies / V. L. Afanasiev, L. Č. Popović // *ApJL*. — 2015. — Февр. — Т. 800, № 2. — С. L35. — arXiv: [1501.07730 \[astro-ph.GA\]](#).
36. *Shablovinskaya, E. S.* Measuring the AGN Sublimation Radius with a New Approach: Reverberation Mapping of Broad Line Polarization / E. S. Shablovinskaya, V. L. Afanasiev, L. č. Popović // *ApJ*. — 2020. — Апр. — Т. 892, № 2. — С. 118. — arXiv: [2003.12809 \[astro-ph.GA\]](#).
37. Photometric AGN reverberation mapping - an efficient tool for BLR sizes, black hole masses, and host-subtracted AGN luminosities / M. Haas [и др.] // *A&A*. — 2011. — Ноябрь. — Т. 535. — А73. — arXiv: [1109.1848 \[astro-ph.CO\]](#).

Малыгин Евгений Андреевич

Исследование геометрии и кинематики центральных областей активных
галактик

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____