

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**

Специальность 1.3.1 —
Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук Моисеев А.В.

Нижний Архыз — 2023

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Методы фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдений	16
1.1 Фотометрия АЯГ	16
1.1.1 Характеристики фотометрических мод приборов	17
1.1.2 Методика фотометрических наблюдений	18
1.1.3 Рассеянный свет в Цейсс-1000 САО РАН	19
1.2 Поляриметрия АЯГ	21
1.2.1 Поляриметрия с клиновой призмой Волластона	24
1.2.2 Поляриметрия с квадрупольной призмой Волластона	25
1.3 Спектроскопия АЯГ	28
1.4 Спектрополяриметрия АЯГ	29
1.5 Выводы и результаты Главы 1	30
Глава 2. Исследование АЯГ методом фотометрического эхокартирования	31
2.1 Метод эхокартирования	31
2.2 Наблюдения АЯГ	33
2.2.1 Фотометрия	33
2.2.2 Спектроскопия на БТА	35
2.3 Анализ полученных данных	37
2.3.1 JAVELIN-анализ кривых блеска	37
2.3.2 Анализ спектральных данных	39
2.4 Обсуждение полученных оценок	41
2.5 Выводы и результаты Главы 2	42
Глава 3. Спектрополяриметрия АЯГ	44
3.1 Наблюдения АЯГ	45
3.1.1 Спектрополяриметрические наблюдения	46
3.1.2 Поляриметрические наблюдения	47

	Стр.
3.2 Анализ полученных данных	48
3.2.1 LEDA 3095839	48
3.2.2 VII Zw 244	54
3.3 Выводы и результаты Главы 3	62
Глава 4. Поляриметрическое эхокартирование АЯГ	64
4.1 Поляриметрические наблюдения АЯГ	65
4.1.1 Описание метода	67
4.2 Анализ полученных данных	68
4.2.1 JAVELIN-анализ кривых блеска Mrk 335	69
4.2.2 JAVELIN-анализ кривых блеска Mrk 509	72
4.3 Обсуждение полученных результатов	75
4.4 Выводы и результаты Главы 4	78
Список литературы	81

Введение

Сверхмассивные чёрные дыры (СМЧД) безусловно 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 центральном 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 све-

та. 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 цен-

тральных 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 редуктора 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 бóльшего 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 спи-

нов 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", Пушинская РадиоАстрономическая Обсерватория (Пушино), 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", Малы-

- гин Е.А., Шабловинская Е.С., Уклеин Р.И., Гроховская А.А., Перепелицын Е.А.
5. "XII Serbian-Bulgarian Astronomical Conference", Сокобаня, 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., Perepelitsyn 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.Ć. 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., Perepelitsyn 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., Perepelitsyn 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, Natsvlishvili 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 поляриметри-

ческого эхокартирования в среднеполосных фильтрах, обсуждение результатов наравне с соавторами.

Содержание работы

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 по-

ляриметрические 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.

Глава 1. Методы фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдений

Всестороннее комплексное изучение АЯГ подразумевает применение различных наблюдательных методов. Для исследуемых в рамках данной работы объектов производилось разложение их наблюдаемого излучения в спектр, в том числе в различных направлениях поляризации; для выделенных спектральных участков фотометрически и поляриметрически измерялась переменность излучения во времени. Наблюдения проводились с помощью 6-м телескопа БТА САО РАН с фокальными редукторами семейства SCORPIO, 1.82-м телескопа Коперника обсерватории Асьяго с камерой AFOSC (Asiago Faint Object Spectrographic Camera) и 1-м телескопа Цейсс-1000 САО РАН с фотометрами-поляриметрами MMPP, StoP и фокальными редукторами MaNGaL и MAGIC. Существенная часть наблюдений проведена автором (в САО РАН). В данной Главе опишем использованные методики наблюдений, особенности приборов и редукцию получаемых данных.

1.1 Фотометрия АЯГ

Все фотометрические наблюдения проводились на приборах и телескопах САО РАН с помощью набора среднеполосных интерференционных светофильтров SED¹ с характерной шириной полосы пропускания порядка $\sim 250 \text{ \AA}$. Малость выделяемого спектрального диапазона позволяет уйти от применения цветового уравнения, а также работать в системе АВ-величин, которая определяется таким образом, что при монохроматическом потоке f_ν , измеряемом в единицах эрг/с/см²/Гц:

$$m_{AB} = -2.5 \cdot \lg(f_\nu) - 48.6$$

Фильтры использовались в четырёх приборах. За время фотометрического мониторинга на 1-м телескопе Цейсс-1000 последовательно использовались приборы MaNGaL, MMPP и StoP, устанавливающиеся в фокусе Кассегрена

¹https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/filters_eng.html

(f/13). Многорежимный фокальный редуктор SCORPIO-2, устанавливаемый в первичном фокусе БТА (f/4), также использовался для получения фотометрических данных. Все приборы оснащены турелями с 50-мм позициями, в которых устанавливается набор фильтров, что позволяет вводить требуемый фильтр в оптический тракт в течение ночи и проводить наблюдения в различных полосах пропускания.

1.1.1 Характеристики фотометрических мод приборов

В 2018 году для фотометрического мониторинга использовался фокальный редуктор MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines) [38] в режиме фотометра. Прибор уменьшает эквивалентное фокусное расстояние, превращая светосилу оптической системы телескопа Цейсс-1000 f/13.3 в результирующую f/5.3, что обеспечивает поле зрения (FoV) $8'.7 \times 8'.7$. В качестве детектора излучения первые полгода использовался ПЗС Andor iKon-M 934 1024×1024 пикселей с размером каждого 13×13 мкм², что при бинировании 1×1 реализовывало масштаб изображения $0''.51/\text{пиксель}$. Вторым приёмником излучения в MaNGaL был Andor Neo sCMOS 2560×2160 пикселей, где при бинировании 2×2 обеспечивался тот же масштаб. Для минимизации шумов электроники ПЗС охлаждались благодаря модулю Пельтье, а для отвода тепла использовалось водяное охлаждение.

В 2019 году на Цейсс-1000 был введён в эксплуатацию прибор MMRP (Multi-Mode Photometer-Polarimeter) [39]. Светоприёмником был ПЗС Eagle V 2048×2048 пикселей, также с модулем Пельтье и водяным охлаждением. При бинировании 2×2 обеспечивался масштаб $0''.42/\text{пиксель}$ при размере поля зрения $7'.2 \times 7'.2$.

Введённый в эксплуатацию с начала 2020 года прибор StoP (Stokes Polarimeter) [40] с ПЗС Andor iKon-L 936, использующим воздушное охлаждение, 2048×2048 (размер пикселя 13.5×13.5 мкм²), при бинировании 2×2 позволял проводить наблюдения с масштабом изображения $0''.415/\text{пиксель}$ при размерах поля зрения $7'.1 \times 7'.1$.

На БТА фотометрия проводилась с помощью многорежимного фокального редуктора SCORPIO-2 (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric

and Interferometric Observations) [41], который при наблюдениях устанавливается в первичном фокусе телескопа, где обеспечивается светосила $f/4$, а вместе с редуктором – $f/2.6$. С детектором E2V CCD42-90 (2048×4612), охлаждаемым с помощью жидкого азота, при бинировании 2×2 достигался масштаб $0''.35/\text{пиксель}$, а поле зрения составляло $\text{FoV} \sim 6'$.

1.1.2 Методика фотометрических наблюдений

Фотометрический мониторинг подразумевает ежемесячные наблюдения в полутёмные и светлые ночи. Время экспозиции выбирается в зависимости от погодных условий и в среднем составляет от 2 до 5 минут для одного снимка. При этом, величина накапливаемого сигнала должна находиться в диапазоне накоплений (индивидуальном для каждого конкретного детектора излучения), где статистика отсчётов соответствует пуассоновской [42]. Получение каждой научной экспозиции сопровождалось сдвигом трубы телескопа, чтобы регистрируемый сигнал от исследуемого объекта проецировался на разные участки детектора. Такая стратегия минимизирует вклад систематических погрешностей, вносимых детектором, и позволяет при дальнейшей редукции работать с потоком от объектов каждой отдельной экспозиции как со случайной величиной.

Все наблюдения сопровождались получением калибровочных изображений (flat-кадры плоского поля по сумеречному небу для каждого фильтра с движением трубы телескопа, bias/dark-кадры), позволяющие исправлять данные за аддитивные и мультипликативные ошибки при последующей редукции. Редукция фотометрических данных (вычитание уровня bias, деление на кадры плоского поля) производится стандартно. Всего для каждой конкретной эпохи наблюдений в отдельном среднеполосном фильтре получалось в среднем по семь экспозиций (от трёх и более). Кадры обрабатываются независимо, после чего методом апертурной фотометрии производится статистическая оценка усреднением случайной величины робастными методами [43], что даёт её несмещённое среднее. В таком случае фотометрические ошибки являются среднеквадратическими отклонениями робастного распределения. Все исследуемые в данной работе АЯГ представляют собой точечные источники излучения, а

размеры апертуры варьировались в зависимости от *seeing*, но были постоянными для АЯГ и звёзд сравнения внутри одного кадра.

1.1.3 Рассеянный свет в Цейсс-1000 САО РАН

Телескоп Цейсс-1000 [44] представляет собой апланат Ричи-Кретьена с двумя гиперболическими зеркалами. Ввиду своей конструкции телескопы Кассегрена наиболее уязвимы в смысле проблем паразитного света, попадающего на детектор при наблюдениях. В телескопе были установлены отсекатели света в виде системы, состоящей из двух поверхностей усечённых конуса и цилиндра (возле вторичного и главного зеркал соответственно). Они показаны на верхней панели Рис. 1.1 и называются "передним" и "задним" отсекателями. Данная конфигурация обеспечивает в фокальной плоскости телескопа $\varnothing 106$ мм ($\sim 27'$) невиньетированного поля. Отсекатели экранируют приёмник излучения от наиболее опасного прямого света, а также предотвращают попадание в поле зрения света, отражённого внутренней поверхностью трубы телескопа. Однако, отсекаТЕЛЬ возле главного зеркала вызывает дополнительный рассеянный свет, когда прямой свет при скользящем падении отражается от внутренней поверхности отсекателя [45].

Таким образом, из-за переотражения на внутренней поверхности отсекателя на детекторе образовывался блик сложной формы, который по смыслу являлся аддитивной помехой. Мы наблюдали его в виде завала интенсивности к краю калибровочного flat-кадра порядка $\sim 10\%$ (Рис. 1.2, слева). Максимум данного "колокола" смещался во время наблюдений в зависимости от положения трубы телескопа, что вносило существенные ошибки при получении кадров плоского поля и дальнейшей редукции данных. При обработке научных кадров рассеянный свет невозможно учесть, что ухудшает точность измерений слабых объектов. Поскольку мы имеем паразитный аддитивный шум, деление кадров на плоское поле также вносило систематическую ошибку к краям поля зрения порядка 10% и ухудшало точность фотометрических измерений. Более того, рассеянный свет должен давать вклад в инструментальную поляризацию, причём её величина неоднородна по полю.

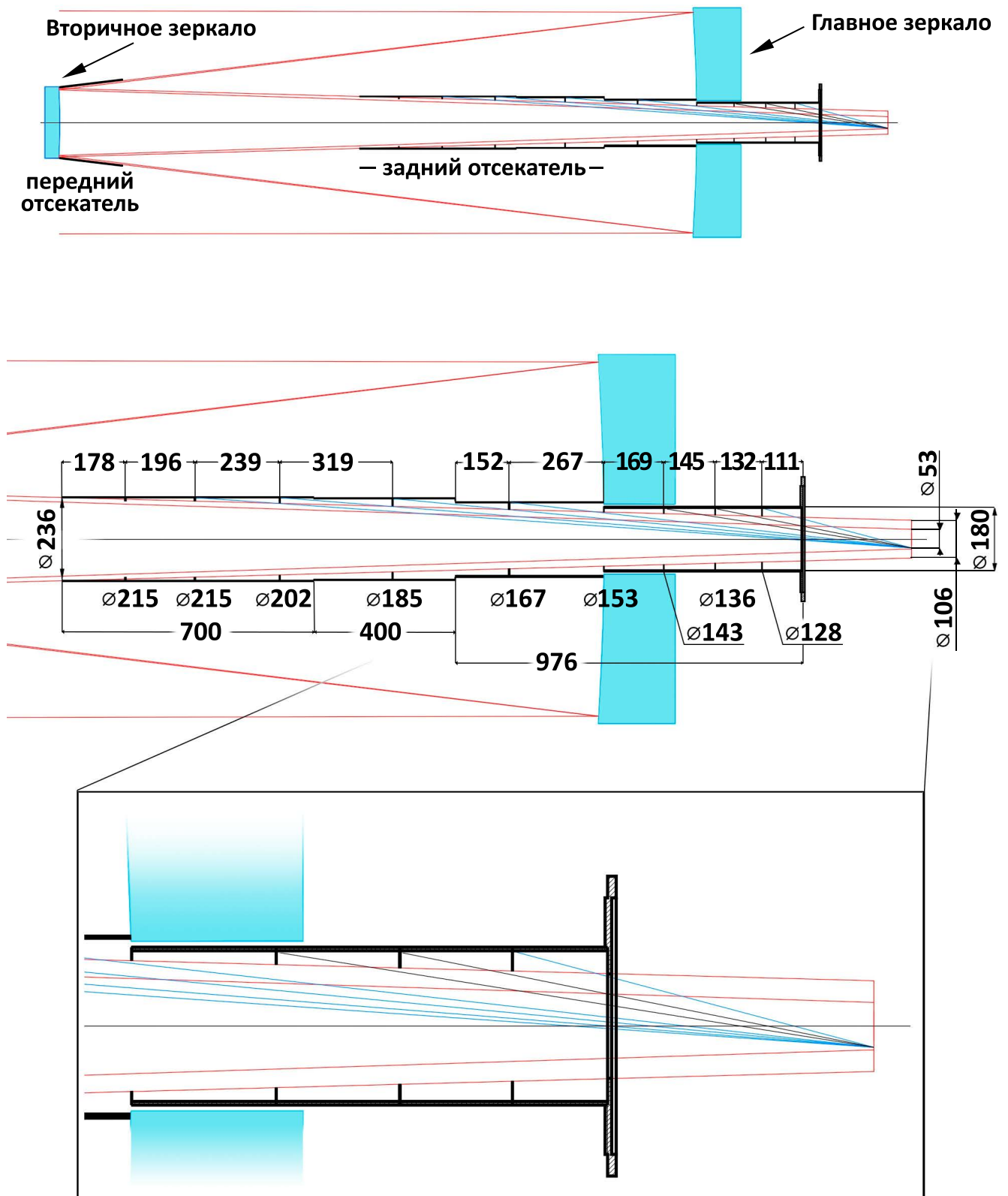


Рисунок 1.1 — Оптическая схема телескопа Цейсс-1000 после модернизации отсекателей. На верхней панели показаны стандартные передний и задний отсекатели возле вторичного и главного зеркал с кольцевыми диафрагмами, установленными в заднем отсекателе. Также на схеме (справа от заднего отсекателя) располагается дополнительная конструкция с диафрагмами, которую мы установили сквозь главное зеркало телескопа. На средней панели указаны размеры установленных элементов. На нижней панели представлена идея расположения кольцевых диафрагм, описанная в [46]. Размеры указаны в мм.

Сначала мы хотели изготовить новую систему отсекаателей света (взамен установленных изначально). Однако точное решение задачи для вычисления оптимальной конструкции отсекаателей [47] для конфигурации Цейсс-1000 САО РАН приводило к недопустимо высокому коэффициенту центрального экранирования (отношение диаметров самого широкого отсекаателя и входного зрачка) $\eta \sim 0.46$.

Тогда для подавления нежелательного света мы установили внутри имеющегося заднего отсекаателя (он состоит из двух частей, общей высотой 1100 мм) четыре кольцевые диафрагмы с внутренним диаметром от 185 до 215 мм и покрасили детали краской с высоким коэффициентом поглощения. Мы также изготовили дополнительную цилиндрическую конструкцию с пятью внутренними диафрагмами высотой 976 мм, устанавливаемую между фокальной плоскостью телескопа и задним отсекаателем, и проходящую сквозь центральное отверстие главного зеркала телескопа. Чертёж отсекаателей с установленными внутрь кольцевыми диафрагмами в оптической системе Цейсс-1000 САО РАН приведён на Рис. 1.1. Идея кольцевых диафрагм для рефракторов описывалась ранее в [46] и легко адаптируется на конструкцию цилиндрического отсекаателя (идея визуализирована на нижней панели Рис. 1.1). Таким образом, диафрагмы "обрамляют" (окружают) полезный световой пучок в оптическом тракте и существенно снижают уровень нежелательного света.

Сравнение кадров плоского поля, полученных по сумеречному небу, *до* и *после* покраски отсекаателя, установки в него покрашенных диафрагм и дополнительной конструкции с диафрагмами приведено на Рис. 1.2 на левой и правой панелях соответственно. После модернизации интенсивность плоского поля не падает по краям поля зрения, что говорит об эффективной блокировке прямых и рассеянных лучей в трубе телескопа. Устранение рассеянного света в системе также способствует повышению точности поляриметрических наблюдений.

1.2 Поляриметрия АЯГ

Общепринято, что состояние поляризации наблюдаемого излучения описывается параметрами Стокса, формирующих вектор-столбец $\{I, Q, U, V\}^T$ [48], где параметр I соответствует интенсивности потока, Q и U описывают линей-

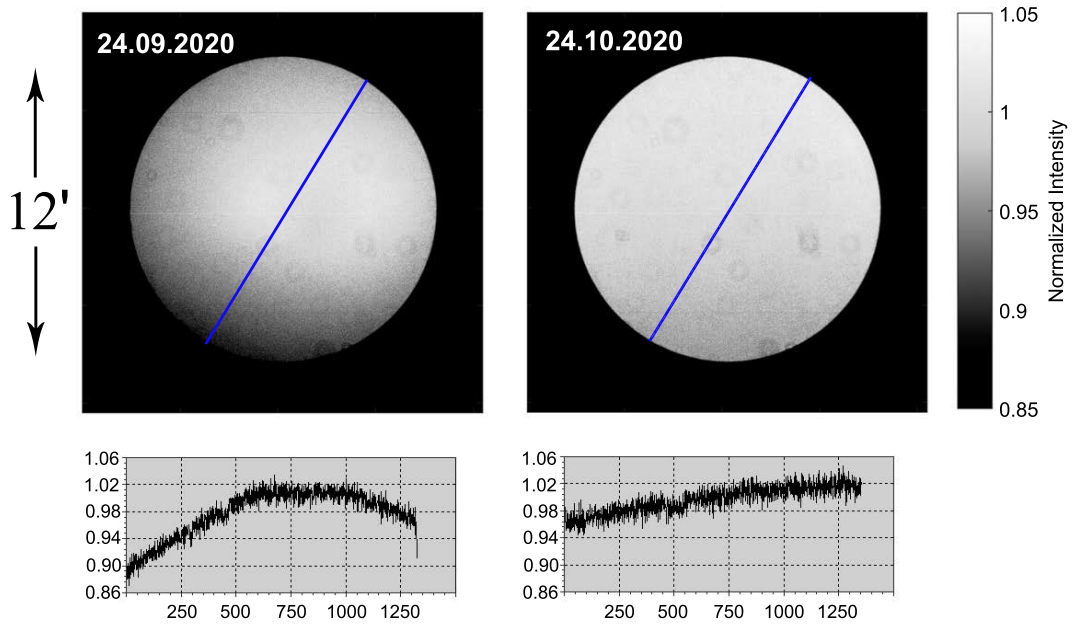


Рисунок 1.2 — Сравнение нормированных flat-кадров сумеречного неба *до* (слева) и *после* (справа) установки кольцевых диафрагм в стандартный задний отсекагель с дополнительной трубой и чернения деталей. Разрезы снизу соответствуют синим линиям на кадрах выше. Горизонтальная ось разрезов соответствует положению пикселей по оси y кадра (длина синей линии в угловой мере соответствует $12'$). Кадры получены с помощью прибора MAGIC в среднеполосном фильтре SED700.

ную поляризацию, а параметр V – круговую. Далее, говоря о поляризации АЯГ, будем полагать ответственный за круговую поляризацию параметр $V \equiv 0$, поскольку вклад круговой поляризации либо нулевой, либо пренебрежимо мал [49–52].

В проводимых поляриметрических наблюдениях с помощью приборов SCORPIO-2 (6-м БТА САО РАН), AFOSC [53] (1.82-м Ассяго), StoP и MAGIC (1-м Цейсс-1000 САО РАН) в качестве анализатора поляризация выступала двойная призма Волластона [54]. Преимуществом призмы в сравнении с другими анализаторами с последовательной регистрацией потоков в разных направлениях поляризации (например, дихроичного поляроида) является возможность применять метод, называемый в литературе *one-shot polarimetry*, когда на детекторе регистрируется одновременно четыре изображения поля в четырёх направлениях колебания электрического вектора 0° , 90° , 45° и 135° с соответствующими интенсивностями I_0 , I_{90} , I_{45} и I_{135} . Это позволяет сразу измерить три параметра Стокса I , Q и U одновременно за одну экспозицию. Эта

же особенность позволяет свести к минимуму влияние атмосферной деполяризации [подробнее см. 55].

Наблюдения АЯГ сопровождались наблюдениями поляризованных звёзд-стандартов и звёзд с нулевой поляризацией. Тогда, вводя инструментальные параметры K_Q и K_U , связанные с пропусканием поляризационных каналов, каждый из которых корректируется за спектральную чувствительность устройства с помощью наблюдений звёзд-стандартов с нулевой поляризацией, можно определить три параметра Стокса:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda)K_Q(\lambda) + I_{45}(\lambda) + I_{135}(\lambda)K_U(\lambda) \quad (1.1)$$

$$Q(\lambda) = \frac{I_0(\lambda) - I_{90}(\lambda)K_Q(\lambda)}{I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda)K_Q(\lambda)} \quad (1.2)$$

$$U(\lambda) = \frac{I_{45}(\lambda) - I_{135}(\lambda)K_U(\lambda)}{I_{45}(\lambda) + I_{135}(\lambda)K_U(\lambda)} \quad (1.3)$$

Здесь и далее мы используем Q и U для обозначения нормированных параметров Стокса.

Наконец, определяя нуль-пункт поляризационного угла φ_0 из наблюдений поляризованных звёзд-стандартов, измерение степени линейной поляризации $P(\lambda)$ и угол поляризации $\varphi(\lambda)$ производится по формулам:

$$P(\lambda) = \sqrt{Q^2(\lambda) + U^2(\lambda)} \quad (1.4)$$

$$\varphi(\lambda) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{U(\lambda)}{Q(\lambda)} \right] + \varphi_0 \quad (1.5)$$

Метод наблюдения с двойной призмой Волластона более подробно описаны в [55]. Для учёта межзвёздной поляризации и атмосферной деполяризации используются звёзды поля вокруг исследуемых АЯГ.

Как правило, степень поляризации у АЯГ 1 типа обычно близка к нулю, и, в случаях, когда точность измерений невысока, как показано в работе [56], расчёт степени поляризации P по формуле 1.4 приводит к статистическому смещению. Тогда корректно использовать формулу для несмещённой величины степени поляризации:

$$P_{\text{unbiased}} = P \cdot \sqrt{1 - (1.41 \cdot \sigma_P / P)^2}, \quad (1.6)$$

где P – измеренная степень линейной поляризации, σ_P – соответствующая погрешность, полученная из наблюдений как стандартное отклонение, $\sqrt{1 - (K \cdot \sigma_P/P)^2}$ – так называемый фактор Райса. Симмонс и Стюарт [56], основываясь на оценке максимального правдоподобия истинного значения степени поляризации, показали, что при низком S/N ($\sigma_P/P \lesssim 0.7$) коэффициент за коррекцию смещения равен $K = 1.41$. Поэтому для полученных поляриметрических данных при обработке производилась коррекция степени поляризации за смещение в тех случаях, где это требовалось.

В САО РАН поляриметрические наблюдения проводились с помощью всё того же набора среднеполосных 250 Å SED-фильтров. В обсерватории Асьяго-Чима-Экар с прибором AFOSC использовались фильтры с ширинами полос пропускания 70 Å и 100 Å, однако методика наблюдений оставалась согласованной в рамках проводимого эксперимента.

Первичная редукция поляриметрических данных подразумевает вычитание уровня bias и исправление за (медианно усреднённое) плоское поле, сформированное для каждого направления поляризации. После первичной редукции интенсивности I в каждом кадре измеряются посредством апертурной фотометрии. Для каждого объекта размер апертуры фиксировался для всех эпох и составлял $\sim 1.5 \times seeing$; апертура для оценки фона подбиралась так, чтобы её площадь была в 3 раза больше площади внутри апертуры объекта.

1.2.1 Поляриметрия с клиновой призмой Волластона

В приборах StoP, SCORPIO-2 и AFOSC используется клиновый вариант двойной призмы Волластона (изготовленной из исландского шпата), в котором лучи разных направлений поляризации разносятся вдоль одной линии и разводятся двумя ахроматическими клиньями (во избежание наложения изображений, сформированных призмой), что позволяет регистрировать на детекторе 4 изображения входного зрачка, ограниченных вытянутой невысокой (порядка 1') прямоугольной маской.

В САО РАН для поляриметра StoP на Цейсс-1000 с Andor iKon-L 936 с бинированием 2×2 реализовывался масштаб $0''.415/\text{пиксель}$, что обеспечивало поле зрения для каждого из четырёх направлений поляризации $0'.9 \times 6'.1$. На

БТА с прибором SCORPIO-2 и ПЗС E2V 42-90 при бинировании 2×2 достигался масштаб $0''.35/\text{пиксель}$ и FoV одного направления поляризации $6' \times 1'$.

В обсерватории Асыяго-Чима-Экар прибор AFOSC с ПЗС-системой Andor iKon-L 936 при бинировании 2×2 обеспечивал масштаб изображения $0''.51/\text{пиксель}$, и поле зрения для каждого направления поляризации $0'.8 \times 9'.4$.

Поляриметрические наблюдения подразумевали получение в среднем семи кадров в каждом среднеполосном фильтре при хороших погодных условиях. Призма Волластона ориентируется таким образом, чтобы вместе с исследуемыми активными галактиками одновременно наблюдались близлежащие звёзды поля, чтобы свести к минимуму систематические и инструментальные ошибки. Метод дифференциальной поляриметрии (подробнее, например, в [57]) позволяет достигать точности около $\sim 0.1\%$.

1.2.2 Поляриметрия с квадрупольной призмой Волластона

Большее поле зрения достигается с помощью квадрупольной призмы Волластона, вариант которой и был изначально предложен в оригинальной работе [54] с идеей двойной призмы Волластона. Такая конфигурация реализована в многорежимном фокальном редукторе MAGIC (Monitoring of Active Galaxies by Investigation their Cores). Прибор был создан в CAO РАН под руководством В.Л. Афанасьева для наблюдений на 1-м телескопе Цейсс-1000 CAO РАН, которые начались с сентября 2020 года. Разведение лучей происходит уже не вдоль одной линии, а по вершинам ромба, что позволяет использовать квадратную маску (во избежание наложения изображений), обеспечивающую в случае MAGIC на ПЗС Andor iKon-L 936 при бинировании 1×1 ($0''.45/\text{пиксель}$) поле зрения $6'.4 \times 6'.4$ в каждом из четырёх направлений поляризации. И в отличие от классической клиновой двойной призмы Волластона все направления отягощены одинаковой дисперсией, причём много большей ввиду сильного разведения изображений. В белом свете, без использования фильтра, дисперсия раскладывает звездообразный источник в низкодисперсный спектр длиной $> 40''$, по этой причине поляриметрия проводится только с помощью среднеполосных фильтров.

Масштаб изображения огрубляется за счёт редукции эквивалентного фокусного расстояния системы, что увеличивает поле зрения на приборе для

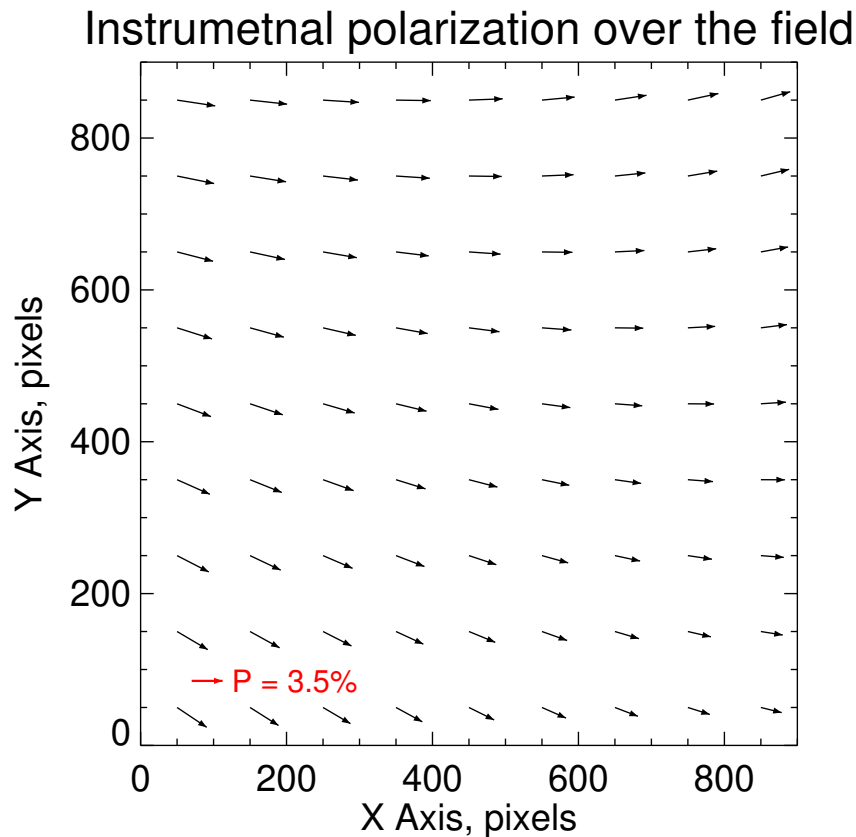


Рисунок 1.3 — Инструментальная поляризация MAGIC.

данной ПЗС-системы. Конструкция прибора предполагает входную светосилу $f/12.5$ и за счёт коллиматора и камеры увеличивает её до $f/6.1$. Для последующих наблюдений АЯГ потребовалось методическое исследование прибора, схема и характеристики которого приведены в статье [58]. В данном разделе ограничимся только основными результатами этих исследований, которые включают в себя измерение точностных характеристик и выбор оптимальных алгоритмов калибровки при наблюдениях в поляриметрическом режиме.

С помощью наблюдений звёзд – неполяризованных стандартов при фотометрической погоде дана оценка инструментальной поляризации прибора. Оказалось, что значение поляризации зависит от положения объекта в маске, а в ходе лабораторных тестов оптики и детектора с иными анализаторами поляризации, вводимыми в пучок, было установлено, что источником инструментальной поляризации является призма. Многократные наблюдения нулевых стандартов в разных положениях по полю, а также измерение поляризации изображений точек на 8-точечной маске, которая используется для исправления геометрических искажений поля, позволили обнаружить, что изменения поляризации стабильны и имеют плавную зависимость по полю (Рис. 1.3).

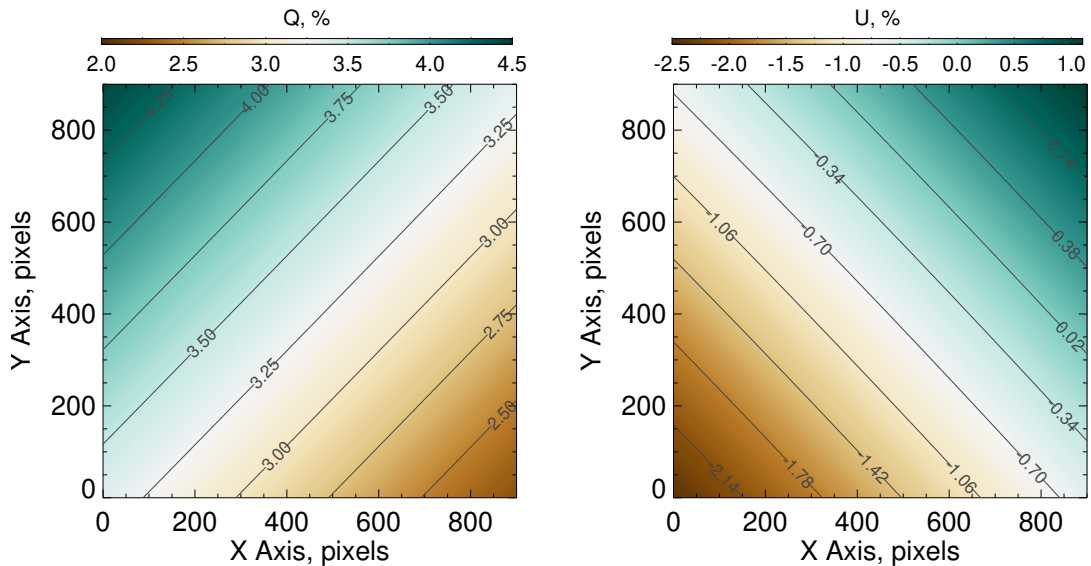


Рисунок 1.4 — Модель инструментальной поляризации квадрупольной призмы Волластона прибора MAGIC. Для параметров Стокса Q и U построены плавные изменения по полю внутри квадратной маски. По осям X и Y даны координаты в пикселях, координатная сетка исправлена за геометрические искажения.

Среднее значение степени поляризации, вносимой призмой, составляет 3.5% и варьируется по полю от 2.3% до 4.5%. При этом в диапазоне длин волн 6000-7000 Å инструментальная поляризация одинакова.

Мы описали изменения Q и U поверхностью 1-го порядка (Рис. 1.4). После исправления наблюдений неполяризованных звёзд за инструментальную поляризацию с помощью такой модели отклонения параметров Q и U от нуля составили менее 0.05%. Таким образом, несмотря на наличие в приборе инструментальной поляризации, имеется возможность проводить высокоточные поляриметрические наблюдения.

Также, построено соответствие наблюдаемых степени P и угла плоскости поляризации φ для набора стандартных звёзд высокой поляризации с опубликованными величинами (Рис. 1.5). Точность измерения степени поляризации составила $(P_{\text{tab}} - P_{\text{obs}}) \sim 0.18\%$ и поляризационного угла $(\varphi_{\text{tab}} - \varphi_{\text{obs}}) \sim 3^\circ$.

Для звездообразного объекта до 14 зв.величины в среднеполосных фильтрах при качестве изображения $\text{seeing} \sim 1''$ за 20 минут суммарной экспозиции достигается точность поляриметрии лучше 0.6%.

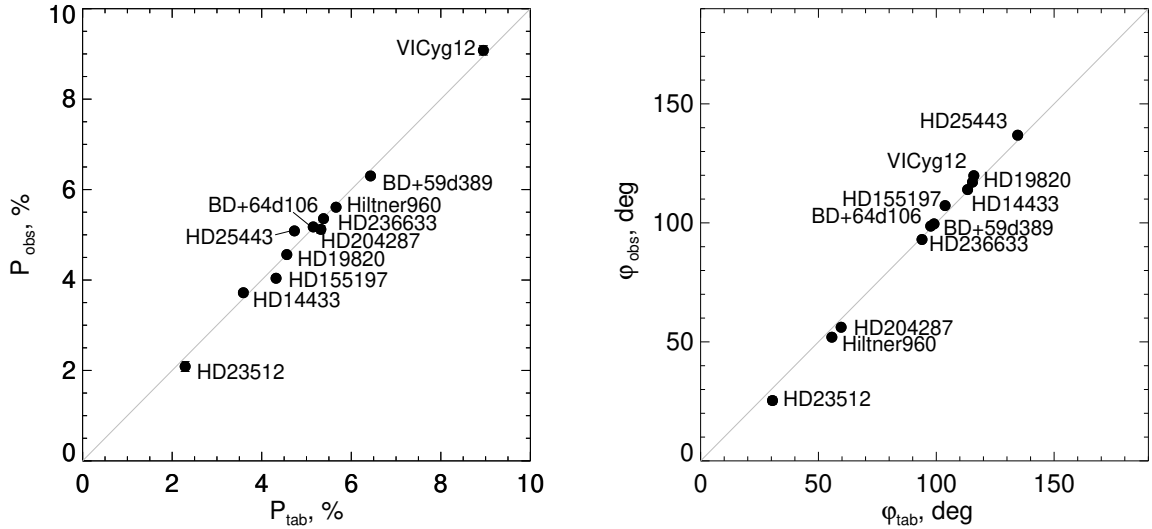


Рисунок 1.5 — Соответствие измеренных величин степени поляризации (слева) и поляризационного угла (справа) с опубликованными в литературе.

1.3 Спектроскопия АЯГ

Спектры низкого разрешения исследуемых АЯГ получались на 6-м телескопе БТА с использованием приборов SCORPIO-1 [59] и SCORPIO-2 [41] в режиме длинной щели. Для калибровки спектра использовался адаптер первичного фокуса БТА [60]. При той же оптической конфигурации и положении трубы телескопа получались спектры сравнения по He-Ne-Ar лампе и кадры спектрального плоского поля. Внутри наблюдательной ночи также получались спектры стандартных звёзд для дальнейшей коррекции спектральной чувствительности прибора и минимизации спектрального пропускания атмосферы. Для уточнения потока от объекта фотометрически в среднеполосных фильтрах осуществлялась привязка к локальным стандартам в поле вокруг исследуемых АЯГ.

Обработка спектральных данных подразумевает учёт уровня bias, удаление следов космических частиц, исправление за плоское поле, калибровки длин волн, вычитание атмосферных линий фона, коррекцию за спектральную чувствительность атмосферы и спектрографа по спектрофотометрическим стандартам и экстракция в одномерный спектр в фиксированной апертуре размером $\sim 1.5 \times \text{seeing}$. Для наиболее точной привязки абсолютных значений потоков кривые пропускания SED-фильтров, в которых проводились наблюдения, сворачивались со спектрами. Соответственно, получаемые синтетические

потоки в фильтрах калибровались на реальные фотометрические наблюдения, обладающие более высокой точностью, чем спектральные, в смысле абсолютных значений. Это позволяет достигать полного соответствия между абсолютными значениями потоков, измеренных как в фотометрических, так и в спектроскопических наблюдениях.

1.4 Спектрополяриметрия АЯГ

При спектрополяриметрических наблюдениях АЯГ в связке используются сразу двойная призма Волластона, гризма и полосовой светофильтр, отсекающий второй порядок спектральной решётки. ПЗС регистрирует спектры в четырёх направлениях поляризации – 0° , 90° , 45° и 135° . При наблюдении объекта с тем же положением трубы телескопа и при той же оптической конфигурации получается набор калибровочных кадров – спектральное плоское поле, линейчатый спектр сравнения калибровочной He-Ne-Ar лампы, а также ниточные спектры засветки (изображение спектра лампы непрерывного излучения, прошедшего сквозь точечную маску перед щелью) для исправления геометрии кадра. С аналогичным набором калибровок и оптической схемой в течение ночи наблюдаются поляризованная и неполяризованная звёзды-стандарты.

Редукция данных включает стандартную процедуру для длиннощелевой спектроскопии с учётом того, что за один кадр получается четыре спектра в четырёх направлениях поляризации. Кадры в каждом направлении поляризации так же корректируются за уровень bias, плоское поле, проводится геометрическая коррекция вдоль и поперёк щели, производится вычитание ночного неба, учитывается спектральная чувствительность прибора и производится спектральная калибровка длин волн. Метод наблюдений и редукция данных детально описаны в [55].

Наиболее важной коррекцией является геометрическое исправление кадров. В поляризационных измерениях некорректный учёт геометрических искажений может повлечь возникновение артефактов обработки, приводящих к некорректному результату измерений.

После вычитания спектра ночного неба производится извлечение спектра посредством интегрирования в заданной области вдоль щели.

1.5 Выводы и результаты Главы 1

В данной Главе приводятся основные принципы применяемых в данной работе наблюдательных методов, описание редукиции получаемых данных, а также представлены основные формулы расчёта параметров поляризации регистрируемого излучения АЯГ. Вместе с тем представляется описание методического исследования поляриметрической моды многорежимного фокального редуктора MAGIC для 1-м телескопа Цейсс-1000 САО РАН. Также для данного телескопа описана модернизация отсекателей света с целью подавления рассеянного света в системе.

Глава 2. Исследование АЯГ методом фотометрического эхокартирования

В настоящее время одним из наиболее распространённых методов оценки масс СМЧД в АЯГ является метод эхокартирования [30]. Переменность потока в широких эмиссионных линиях АЯГ отстаёт во времени от аналогичной переменности в континууме, и метод эхокартирования основан на поиске задержки переменности излучения. Задержка позволяет измерить расстояние до орбит обращения вокруг СМЧД облаков газа в BLR-области, которые излучают в уширенных вращением спектральных линиях, несущих информацию о скорости газа. С одной стороны, ярчайший по энергетике центральный источник активного ядра засвечивает околядерную область галактики, что делает невозможным изучение динамики вещества в окрестностях СМЧД. С другой стороны, даже для ближайших сейфертовских галактик (~ 20 мегапарсеков) размеры BLR-областей не сопоставимы с разрешением даже самых крупных оптических телескопов. Потому метод эхокартирования является крайне эффективным для исследования центральных структур в АЯГ. Однако ценой тому является получение длительных рядов наблюдений (порядка нескольких лет), а в случае спектральных наблюдений существенно вырастает нагрузка на телескопы, начиная с 2-метрового класса. Последнее десятилетие набирает популярность метод фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах [37], что позволяет для поставленной задачи задействовать в наблюдениях телескопы метрового класса. В этой Главе описана адаптация метода фотометрического эхокартирования на телескопах САО РАН, а также приводится исследование двух активных галактик с широкими линиями данным методом в ходе многолетнего мониторинга.

2.1 Метод эхокартирования

Первые исследования по измерению временной задержки τ между переменностью излучения в линии $H\alpha$ и в ультрафиолетовом континууме в АЯГ проведены в работе Черепашука и Лютого [29] 1973 года. В ней исследовались

три галактики, для которых задержки составили 15, 25 и 30 дней, что соответствует размеру BLR-области $R_{\text{BLR}} = c \cdot \tau \sim 0.02$ парсека, где c - скорость света. Задержка переменности обусловлена пространственным разнесением источника континуального излучения - аккреционного диска - и реагирующих на него облаков газа в BLR-области. Аккреционный диск излучает переменный поток электромагнитной энергии, который по достижении BLR-области ионизует облака газа и вследствие последующей фоторекомбинации вынуждает газ переизлучать энергию в линиях, уширенных быстрым вращением в гравитационном поле СМЧД. Область формирования линий более высокой степени ионизации ($\text{H}\beta$) находится ближе к источнику континуального излучения, чем линий более низкой степени ионизации ($\text{H}\alpha$), потому и запаздывание для них меньше. Стратификация BLR-области – факт наблюдательный [61], и его стоит держать во внимании при картировании АЯГ в разных линиях.

Кривая блеска в линии оказывается смещённой вперёд во времени относительно кривой блеска в континууме, имеющей аналогичную форму. Тогда время запаздывания τ находят из анализа кривых блеска кросскорреляционными и другими методами, что позволяет измерить расстояние до излучающих облаков $R_{\text{BLR}} = c \cdot \tau$. Таким образом, предполагая, что газ BLR вириализован, массу СМЧД определяют как:

$$M_{\text{SMBH}} = f \cdot (c\tau V_{\text{line}}^2 G^{-1}), \quad (2.1)$$

где G - гравитационная постоянная, c - скорость света, τ - время запаздывания в данной спектральной линии, V_{line} - характерная скорость газа, излучающего данную линию, f - безразмерный множитель, зависящий от структуры и геометрии BLR-области.

Для уверенного определения задержки между кривыми блеска в линии и в континууме необходимо проводить продолжительный мониторинг АЯГ, что является непростой задачей в смысле затрат телескопного времени. На фоне спектрального метода в последнее десятилетие набирает популярность метод фотометрического эхокартирования в средне- или узкополосных фильтрах [37]. Тогда, спектрально ориентируя среднеполосные фильтры на широкую линию и континуум рядом, возможно учесть вклад, вносимый переменным континуумом в наблюдаемый поток при наблюдении спектрального диапазона, в котором находится исследуемая линия, и построить кривые блеска в линии и в континууме, характеризующие излучение BLR и аккреционного диска соответственно.

2.2 Наблюдения АЯГ

Характеристики исследуемых галактик приведены в табл. 1. Для возможности мониторинга в течение всего года были выбраны незаходящие приполярные объекты ($\text{Dec} > 68^\circ$). Наблюдения проводились с помощью телескопов САО РАН: 1-м Цейсс-1000 и 6-м БТА. Первый использовался для ежемесячных фотометрических наблюдений, на БТА проводилась спектроскопия, а также было получено несколько фотометрических наблюдательных эпох. Таблица 1 — Характеристики исследуемых АЯГ. В таблице слева направо представлены: название объекта, координаты на эпоху J2000, звёздная величина в полосе V , красное смещение z , эмиссионная линия, в которой проводится эокартирование, и используемые для этого фильтры из набора SED, где число соответствует центральной длине волны пропускания фильтра

Объект	Координаты (RA, Dec, J2000)	V	z	Линия	Фильтры (line + cont)
LEDA 3095839	$08^{\text{h}}53^{\text{m}}59^{\text{s}}.4+77^\circ00'55''$	17.0	0.106	H α	SED725 SED700
VII Zw 244	$08^{\text{h}}44^{\text{m}}45^{\text{s}}.3+76^\circ53'09''$	15.7	0.131	H β	SED550 SED525

2.2.1 Фотометрия

В наблюдениях используются среднеполосные фильтры с характерными ширинами полос пропускания $\sim 250 \text{ \AA}$. Область спектрального диапазона изучаемых галактик, охватываемая используемыми фильтрами, проиллюстрирована на Рис. 2.2.

За время мониторинга на 1-м телескопе последовательно использовались 3 прибора, устанавливаемых в фокусе Кассегрена: MaNGaL, MMPP и StoP (детали в Главе 1). Для получения дополнительных фотометрических данных осуществлялись наблюдения на БТА с помощью редуктора SCORPIO-2.

Для галактики LEDA 3095839 всего получено 36 эпох наблюдений, для VII Zw 244 получено 30 эпох. Продолжительность мониторинга для LEDA 3095839 и VII Zw 244 составляет 814 и 610 дней соответственно.

Методика фотометрических наблюдений детально изложена в статье [62]. Полученные кривые блеска АЯГ изображены на Рис. 2.1 (слева).

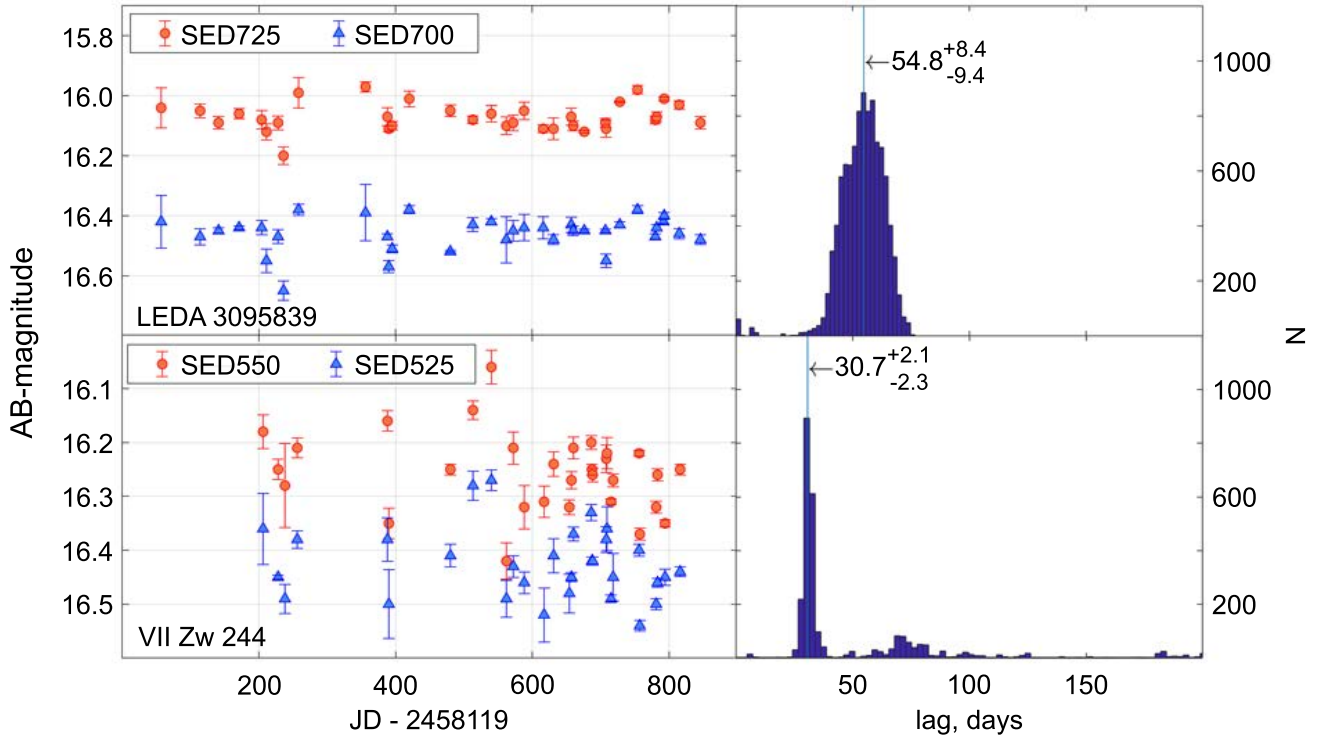


Рисунок 2.1 — Кривые блеска (слева) и соответствующие распределения задержек τ (справа) для LEDA 3095839 и VII Zw 244. Синие треугольники отражают фотометрические измерения AB-величин континуума возле линии, красные кружки соответствуют фотометрическим измерениям AB-величин спектральной области, в которой находится широкая эмиссионная линия бальмеровской серии. Отсчёт юлианских дат начинается с 1 января 2018 года.

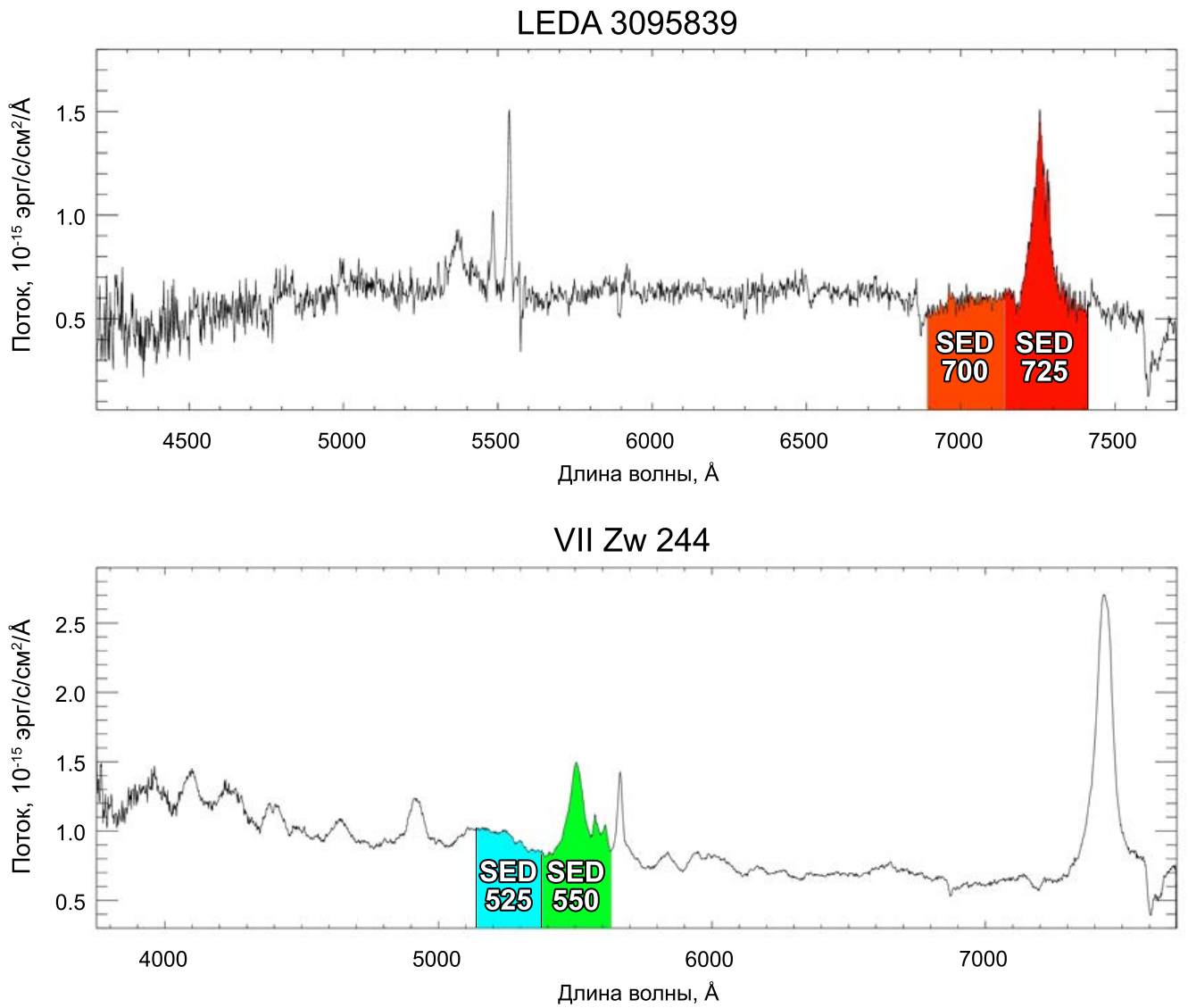


Рисунок 2.2 — Спектры LEDA 3095839 и VII Zw 244, полученные на БТА. Поверх нанесены полосы пропускания используемых фильтров.

2.2.2 Спектроскопия на БТА

VII Zw 244

Спектр объекта был получен 9/10/2019 г. на 6-м телескопе БТА с использованием SCORPIO-1 [59] в длиннощелевом режиме для обновления предыдущих спектральных данных, полученных более 25 лет назад в работе [63]. Более того, спектр [63] указан в диапазоне 4070–5883 Å; в данном исследовании спектр расширен на диапазон 3700–7700 Å.

Спектр получен с щелью шириной 1" и гризмой VPHG 550G. Обратная дисперсия 2.1 Å/пиксель и инструментальный профиль FWHM ~ 10 Å. Были получены 3 экспозиции по 5 минут. Методика наблюдений и этапы редукции описаны в Главе 1. Полученный спектр VII Zw 244 представлен на Рис. 2.2 (снизу).

LEDA 3095839

Спектр данного объекта был получен 6/11/2019 года на БТА с редуктором SCORPIO-2 и ПЗС E2V42-90 в длиннощелевом режиме наблюдений для обновления спектральных данных, полученных в работе [64] более 20 лет назад.

Спектр получен с щелью шириной 2" и гризмой VPHG 940@600 (обратная дисперсия 1.16 Å/пиксель) в спектральном диапазоне 4200–7700 ÅÅ. Спектр представлен на Рис. 2.2 (сверху).

При анализе профиля линии H α точность спектральных данных оказалась недостаточной (см. ниже), поэтому в дополнение к спектральным данным были использованы спектрополяриметрические данные, полученные 3 марта 2020 года с помощью редуктора SCORPIO-2. В режиме спектрополяриметрии в пучок вводилась гризма VPHG1026@735 и двойная призма Волластона, и на детекторе одновременно регистрировались спектры в четырёх направлениях поляризации – 0°, 90° и 45°, 135°. Для подавления второго порядка решётки использовался блокирующий фильтр GS-17. Ширина щели составляла 2". В том же положении телескопа были сняты кадры плоских полей, спектра сравнения и 3-точечного теста для исправления геометрии поля. Наблюдения проводились в серии из 10 экспозиций (300 секунд + 9 \times 600 секунд). Длительная суммарная экспозиция позволила добиться после сложения всех направлений поляризации высокого отношения S/N как в линиях, так и в континууме для наблюдаемого объекта. Эти спектральные данные использованы для декомпозиции профиля и представлены на Рис. 2.4 (справа).

2.3 Анализ полученных данных

Чтобы повысить точность фотометрии мы воспользовались методом дифференциальной фотометрии относительно локальных звёзд поля вокруг объекта. Независимая обработка каждого кадра [см. детали 65] обеспечивает характерную погрешность фотометрических измерений $0^m.01$ – $0^m.03$. Характеристики вторичных стандартов взяты из [65]. Кривые блеска в континууме и линии для VII Zw 244 и LEDA 3095839 представлены на Рис. 2.1 (слева).

2.3.1 JAVELIN-анализ кривых блеска

Для оценки временной задержки между двумя кривыми блеска для каждого объекта был применён метод с использованием кода JAVELIN [66; 67] (Just Another Vehicle for Estimating Lags In Nuclei), реализованного на языке программирования Python. Опишем кратко содержание процедуры определения τ с использованием данного метода. Первым шагом является построение модели континуума методом случайных блужданий DRW (dumped random walk). В результате мы имеем апостериорные распределения двух DRW параметров переменности континуума — амплитуды и шкалы времени, вычисленные на основе алгоритмов Монте-Карло по схеме цепей Маркова (MCMC, Markov chain Monte Carlo)¹. Вторым шагом является интерполяция кривой блеска континуума, основанная на параметрах, определённых на первом шаге и затем её смещение, сглаживание и масштабирование для сопоставления с наблюдаемой кривой блеска линии. После ещё одного запуска алгоритма MCMC в пакете JAVELIN определяется искомое апостериорное распределение времени задержки между кривыми блеска.

Полученные результаты в виде гистограмм представлены на Рис. 2.1 (справа), где N — частота встречаемости наборов значений параметров при

¹MCMC-сэмплинг — алгоритм для генерации выборки из апостериорного распределения вероятностей и вычисления интегралов методом Монте-Карло. Последовательность получаемых значений образуют обратимую цепь Маркова, устойчивое распределение которой — это целевое апостериорное распределение.

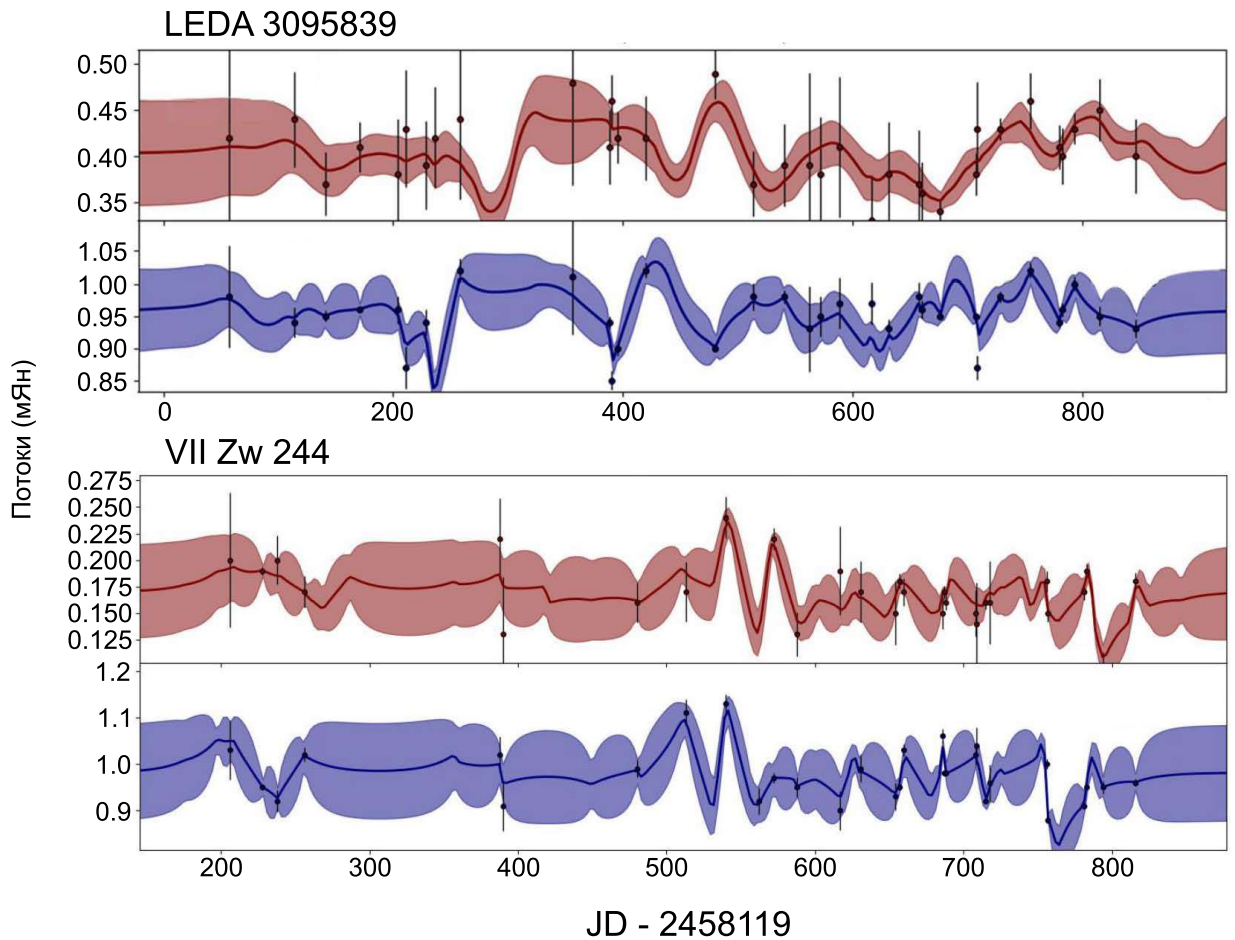


Рисунок 2.3 — Моделирование кривых блеска методом JAVELIN для LEDA 3095839 и VII Zw 244. Чёрными точками отмечены исходные наблюдательные данные с интервалами ошибок. Красные кривые описывают наиболее вероятную модель изменения излучения в эмиссионной линии с вычтенным континуумом, синие кривые – наиболее вероятную модель изменения излучения в континууме. Области, обозначенные бледно-красным и бледно-синим, соответствует областям допустимых значений для моделей кривых блеска. Отсчёт юлианских дат начинается с 1 января 2018 г.

МСМС-сэмплировании. При моделировании использовалось 10000 наборов значений параметров. Моделирование кривых блеска приведено на Рис. 2.3. Полученные значения задержек составляют $\tau = 54.8^{+8.4}_{-9.4}$ дней для LEDA 3095839 и $\tau = 30.7^{+2.1}_{-2.3}$ дней для VII Zw 244. Нижняя и верхняя оценки времени задержки соответствуют границам интервала наиболее высокой плотности апостериорного распределения.

2.3.2 Анализ спектральных данных

Для анализа профиля линии $H\alpha$ в спектре LEDA 3095839 использованы интегрированные спектрополяриметрические данные, дающие более высокое отношение S/N .

После редукции полученных данных все 4 направления поляризации были сложены для получения интегрального распределения энергии по длинам волн. Данный спектральный участок используется для анализа профиля линии $H\alpha$ (Рис. 2.4). Абсолютные значения потоков восстановлены аналогично, как в случае спектральных данных.

Для оценки масс необходимо оценить скорости газа в BLR-области. Для этого первым шагом в анализе профиля эмиссионных линий было произведено вычитание всех узких компонент и получение чистой широкой компоненты $H\alpha$ для LEDA 3095839 и $H\beta$ для VII Zw 244. Анализ профиля проведён методом мультигауссовой декомпозиции.

Разложенный профиль $H\alpha$ для LEDA 3095839 показан на Рис. 2.4 (правая панель вверху). Как видно из рисунка, профиль наблюдаемой эмиссионной линии состоит из двух узких компонент дублета $[NII]$, узкой линии $H\alpha$ и широкой компоненты $H\alpha$, описываемой двумя гауссовыми функциями. Итоговый профиль широкой компоненты за вычетом узких линий представлен на Рис. 2.4 (правая панель внизу). Рассчитаем второй момент скорости $\langle V^2 \rangle$ по широкому профилю линии $H\alpha$:

$$\langle V^2 \rangle = \frac{\sum (V - \langle V \rangle)^2 \times f(V)}{\sum f(V)}, \quad (2.2)$$

где $f(V)$ – поток в линии в шкале скоростей V , а первый момент скорости $\langle V \rangle$ определяется как

$$\langle V \rangle = \frac{\sum V \times f(V)}{\sum f(V)}. \quad (2.3)$$

Тогда, скорость вращения газа в BLR в наблюдаемой линии $H\alpha$ для LEDA 3095839 принимаем равной

$$V_{H\alpha}^2 = \langle V^2 \rangle = 2.3 \times 10^6 \text{ км}^2/\text{с}^2.$$

Аналогичный анализ при помощи мультигауссовой декомпозиции был проделан и для наблюдаемой линии $H\beta$ в объекте VII Zw 244. Разложение профиля

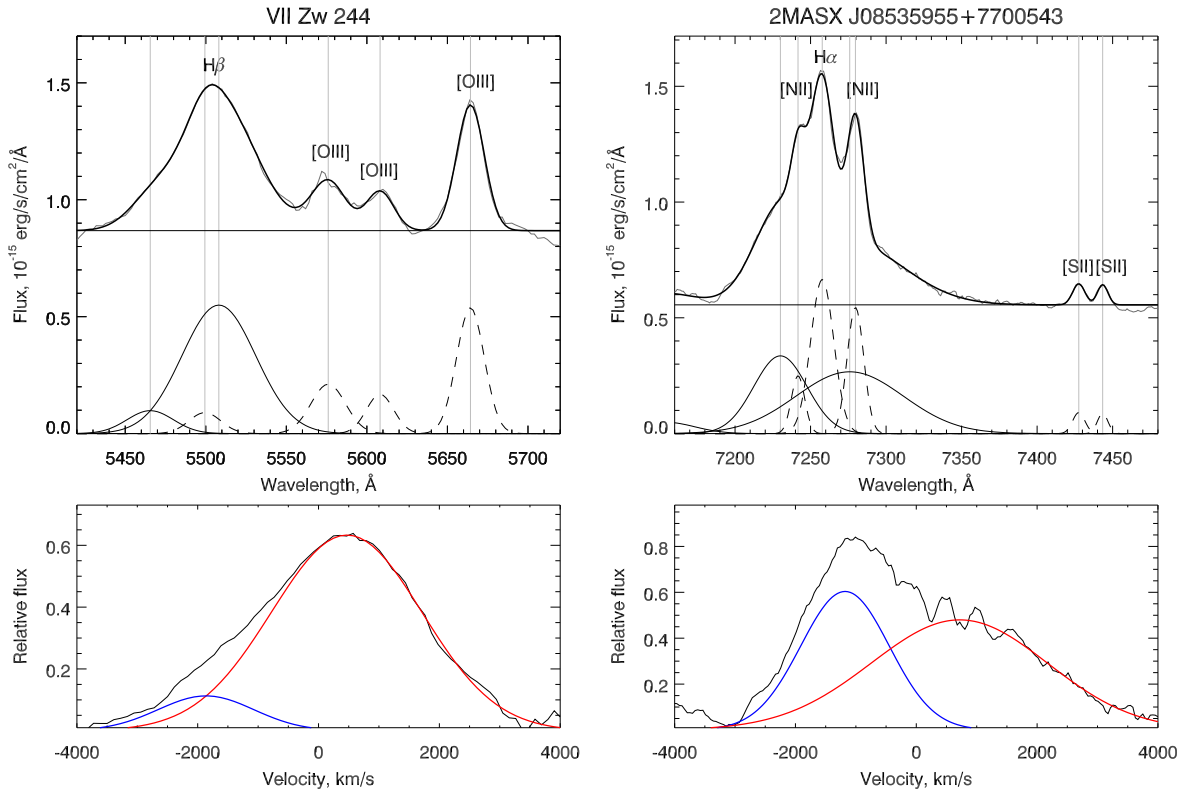


Рисунок 2.4 — Декомпозиция профилей наблюдаемых эмиссионных линий. Верхняя панель: область линии $H\beta$ в спектре галактики VII Zw 244 и разложение области на гауссовы компоненты (слева) и область линии $H\alpha$ в спектре галактики LEDA 3095839 и разложение на гауссовы компоненты (справа). Узкие компоненты линий [OIII] и $H\beta$ для VII Zw 244 и линий [NII] и $H\alpha$ показаны пунктиром. Нижняя панель: профиль линии $H\beta$ в спектре галактики VII Zw 244 (слева) и линии $H\alpha$ в спектре галактики LEDA 3095839 (справа) с вычтенными узкими компонентами. Красными и синими линиями показаны широкие гауссовы профили, смещённые в сторону положительных и отрицательных скоростей соответственно.

представлено на Рис. 2.4 (левая панель сверху). Из профиля линии $H\beta$ вычтены узкие линии [OIII], а также вклад узкой компоненты $H\beta$. Итоговый широкий профиль, описываемый двумя гауссианами, представлен на Рис. 2.4 (левая панель внизу). Второй момент скорости был рассчитан по формуле (2.2). Оценка скорости газа в линии $H\beta$ для VII Zw 244 равна

$$V_{H\beta}^2 = \langle V^2 \rangle = 1.9 \times 10^6 \text{ км}^2/\text{с}^2.$$

В табл. 2 также приводится светимость двух АЯГ на длине волны 5100\AA . Поток f_λ был интегрирован в диапазоне $5000\text{--}5200\text{\AA}$ в системе от-

счёта галактики и поделён на ширину окна интегрирования для получения монохроматической светимости. Предварительно из спектра в этой области было вычтено остаточное влияние профилей H β и приблизительно постоянного [OIII]. Тогда, светимость определяется как

$$\lambda L_{5100} = 4\pi D^2 f_{\lambda},$$

где D — расстояние до АЯГ. Постоянная Хаббла бралась равной $H_0 = 67.4$ (км/с)/Мпк. Вклад галактики-подложки не вычитался. Светимость галактик составила $\lambda L_{5100} = 0.87 \times 10^{44}$ эрг/с для LEDA 3095839 и $\lambda L_{5100} = 1.67 \times 10^{44}$ эрг/с для VII Zw 244.

2.4 Обсуждение полученных оценок

После определения скорости газа в области, излучающей наблюдаемую эмиссионную линию, а также расстояние до этой области, определённое методом эхокартирования, оценим массу СМЧД для двух галактик по формуле (2.1). Безразмерный множитель f будем считать равным единице, определение его величины будет предметом дальнейших исследований. Для галактики LEDA 3095839 $M_{\text{СМЧД}} \sim 2.5 \times 10^7 M_{\odot}$. Для галактики VII Zw 244 измерение показало $M_{\text{СМЧД}} \sim 1.1 \times 10^7 M_{\odot}$.

Таблица 2 — Оценки параметров центральных областей АЯГ. В таблице слева направо даны: название объекта, задержка отклика в эмиссионной линии τ в днях, квадрат скорости газа V_{line}^2 , измеренный по профилю эмиссионной линии, светимость объекта на длине волны 5100\AA λL_{5100} , полученная оценка массы СМЧД $M_{\text{СМЧД}}$ и оценка массы СМЧД $M_{\text{СМЧД}}^{\text{calib}}$, данная в статьях *[68] и **[69]

Объект	τ , дни	V_{line}^2 , $10^6 \text{ км}^2/\text{с}^2$	λL_{5100} 10^{44} эрг/с	$M_{\text{СМЧД}}$ $\text{lg}(M/M_{\odot})$	$M_{\text{СМЧД}}^{\text{calib}}$ $\text{lg}(M/M_{\odot})$
LEDA 3095839	$54.8_{-9.4}^{+8.4}$	2.3	0.87	$7.398_{-0.171}^{+0.153}$	8.228*
VII Zw 244	$30.7_{-2.3}^{+2.1}$	1.9	1.67	$7.049_{-0.075}^{+0.068}$	$7.825_{-0.109}^{+0.087}$ **

До представленных наблюдений оценки масс СМЧД для данных объектов проводились лишь косвенными методами. Массу СМЧД в объекте

LEDA 3095839 оценили в статье [68] по спектру из [64], используя калибровочную зависимость "размер BLR – светимость" из статьи [70]. Полученная оценка составила $M_{\text{SMBH}} \sim 1.7 \times 10^8 M_{\odot}$, что отличается от приведённой в данной работе в ~ 7 раз. Такое отличие объясняется двумя причинами. Первая из них — недостаточное качество спектра, использованного в статье [68], что не позволило провести детальный анализ профилей линий и определить скорость газа с минимальной ошибкой. Также существенной может быть неопределённость, вносимая определением светимости по спектральным данным, от чего в нашей работе мы ушли благодаря привязке спектральных данных к фотометрическим.

В статье [69] оценка массы СМЧД в галактике VII Zw 244 также получена косвенно с использованием калибровки "размер BLR – светимость" из работы [71] и по спектральным данным из статьи [63]. Данная в статье оценка составила $M_{\text{SMBH}} = (6.7 \pm 1.5) \times 10^7 M_{\odot}$. Эта оценка хоть и разнится с полученной в нашей работе в ~ 6 раз, однако близка в пределах интервала ошибок. Вероятно, спектры, данные в статье [63], также не позволили провести детальный анализ профиля H β .

Полученные характеристики исследованных в статье объектов – LEDA 3095839 и VII Zw 244 – сведены в табл. 2. В таблице представлены значения задержки отклика в эмиссионных линиях τ , равные размеру области BLR в световых днях, скорость газа V_{line}^2 , определённая по анализу профилей линий, а также оценки масс в единицах $\lg(M/M_{\odot})$, полученные в данной статье M_{SMBH} и в более ранних работах иных авторов $M_{\text{SMBH}}^{\text{calib}}$.

2.5 Выводы и результаты Главы 2

Мониторинг галактик LEDA 3095839 и VII Zw 244 в течение более двух лет на телескопах САО РАН и применение к полученным временным рядам анализа JAVELIN позволили оценить размеры BLR-областей в ядрах этих активных галактик: $R_{\text{BLR}} = c\tau$, равные $54.8_{-9.4}^{+8.4}$ и $30.7_{-2.3}^{+2.1}$ св. дней или $0.046_{-0.008}^{+0.007}$ и $0.026_{-0.002}^{+0.002}$ парсека соответственно. По спектроскопическим данным, полученным на 6-м телескопе БТА САО РАН, были оценены скорости газа в BLR-областях. На основе новых наблюдательных данных были сделаны оценки масс сверхмас-

сивных чёрных дыр в центрах галактик LEDA 3095839 и VII Zw 244 равные $\lg(M/M_{\odot}) = 7.398_{-0.171}^{+0.153}$ и $\lg(M/M_{\odot}) = 7.049_{-0.075}^{+0.068}$ соответственно.

Глава 3. Спектрополяриметрия АЯГ

Измерение масс СМЧД спектрополяриметрическим методом обладает рядом принципиальных преимуществ перед более популярным к настоящему времени методом эхокартирования. С одной стороны, для применения спектрополяриметрического метода требуется лишь одна эпоха наблюдений вместо длинных временных рядов, что делает этот подход намного более экономичным с точки зрения телескопного времени. С другой стороны, метод эхокартирования позволяет оценить массу с точностью до безразмерного множителя f . Принято считать, что фактор f зависит от ориентации и геометрии области BLR, так что в простейшем случае может быть рассчитан как $f = [h^2 + \sin^2(i)]^{-1}$, где h — отношение высоты толстого диска BLR к его радиусу (или отношение турбулентной скорости к локальной кеплеровской для данного радиуса), а i — угол наклона диска BLR к наблюдателю [72]. Ввиду того, что обе величины h и i неизвестны, множитель f оценивается достаточно грубо и вносит существенную неопределённость в оценку массы СМЧД. Важно, что в отличие от эхокартирования, разрешение скоростей газа в BLR спектрополяриметрическими методами не зависит от ориентации системы, и это выгодно выделяет данный подход.

Метод был предложен в 2015 в работе Афанасьева и Поповича [73], в основе лежит исследование переключения поляризационного угла вдоль профиля широкой линии излучения, которое происходит при экваториальном рассеянии на пылевом торе. Характерная S-образная форма угла плоскости поляризации позволяет определить скорость кеплеровских движений облаков BLR и, следовательно, измерить массу СМЧД. В разумном допущении, что BLR имеет дископодобную форму, а излучение рассеивается преимущественно на внутренней границе пылевого тора — данный механизм приводит к поляризации излучения в широких линиях.

Несмотря на то, что спектрополяриметрический метод измерения масс обладает рядом неоспоримых преимуществ, его применение пока не столь широко. К настоящему моменту таким способом измерены массы СМЧД небольшого числа АЯГ [~ 30 АЯГ, см. 74; 75] с экваториальным рассеянием, поскольку спектрополяриметрия АЯГ требует наблюдений на крупных телескопах и спе-

специального оборудования, из-за чего методика наблюдений реализуется лишь на нескольких инструментах в мире.

С другой стороны, измерения массы СМЧД могут способствовать дальнейшему определению спина (безразмерного углового момента) $a = cJ / (GM_{\text{СМВН}}^2)$ (где J — угловой момент) сверхмассивной чёрной дыры. Предполагается, что спин играет основополагающую роль в генерации релятивистских джетов в АЯГ, потому его определение является важной проблемой современной астрофизики. Кинетическая мощность релятивистского джета получается путём оценки напряжённости магнитного поля вблизи горизонта событий СМЧД с использованием нескольких механизмов генерации, таких как механизм Блэндрфорда–Знаека [76], механизм Блэндрфорда–Пейна [77] и механизм Гарофало [78]. А параметры магнитного поля в аккреционном диске возможно определить численным методом [79], основанным на базе работы Силантьева и др. [80], из спектрополяриметрических наблюдений зависимости поляризации излучения от длины волны в спектре АЯГ.

Таким образом, спектрополяриметрические исследования АЯГ позволяют эффективно изучать физические характеристики центрального парсека АЯГ, и в данной Главе мы продолжаем исследование описанных ранее активных галактик.

3.1 Наблюдения АЯГ

Наблюдения галактик LEDA 3095839 и VII Zw 244 в спектрополяриметрическом и поляриметрическом режимах проводились на 6-м телескопе БТА с использованием модифицированного спектрографа SCORPIO-2.

Журнал наблюдений представлен в таблице 3, в которой указаны названия объектов, красное смещение z , режим наблюдения, объёмно-фазовая голографическая гризма (VPHG, для спектрополяриметрии) или среднечастотный фильтр из набора SED (для поляриметрии), дата наблюдений, время экспозиции, качество изображения (*seeing*), воздушная масса X и позиционный угол (PA). Как для поляриметрии, так и для спектрополяриметрии в качестве анализатора поляризации используется двойная призма Волластона. Методика наблюдений и редукция данных описана в Главе 1.

Таблица 3 — Журнал наблюдений исследуемых АЯГ на БТА

Объект	z	Режим	VPHG / Фильтр	Дата dd/mm/yy	Экспозиция, с	Seeing	X	PA, градусы
LEDA 3095839	0.109	спеспол	1026@735	03/03/20	300 + 9 × 600	1".7	1.4	106.3
		пол	SED700 SED725	18/11/19	60 + 4 × 80 60 + 4 × 50	1".3	1.2	55.6
VII Zw 244	0.131	спеспол	940@600	12/10/20	6 × 900	1".6	1.3	0.0
			SED700		7 × 180			
		пол	SED725 SED750	07/11/19	7 × 180 7 × 180	2".5	1.3	54.2

Важно отметить, что 18 ноября 2019 г. при поляриметрических наблюдениях LEDA 3095839 зенитное расстояние освещённой на 60% Луны составило $\sim 38^\circ$. 12 октября 2020 г. во время спектрополяриметрических наблюдений VII Zw 244 Луна, освещённая на 19%, поднялась на зенитное расстояние 74° . При этом полученные значения поляризации совпали с измерениями тех же объектов, наблюдавшихся в безлунные ночи.

3.1.1 Спектрополяриметрические наблюдения

В спектрополяриметрическом режиме высота щели составляет $1'$. Оба АЯГ наблюдались с шириной щели $\sim 2''$. Спектральное разрешение определяется шириной щели и используемой спектральной решёткой¹. Спектрополяриметрические данные для LEDA 3095839 получены 3 марта 2020 при суммарной экспозиции ~ 1.6 часа. Гризма VPHG1026@735 с ПЗС-детектором E2V 42-90 (с размером пикселя 13.5×13.5 мк²; в спектральном режиме с бинированием 2×1 даёт кадр размером $\sim 2k \times 2k$ пикселей и масштаб $0''.352 \times 0''.176$ /пиксель²) обеспечили покрытие спектра 5800-9500 Å с FWHM ~ 10 Å. В данной конфигурации также использовался блокирующий фильтр GS-17 для объекта LEDA 3095839 для подавления второго порядка решётки. Отметим, что для LEDA 3095839 мы не приводим красную часть спектра за пределами 8200 Å

¹Подробнее характеристики решёток описаны https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/grisms_eng.html

из-за наличия "фрингов" у ПЗС E2V 42-90 [81], которые осложняют процедуру вычитания фона неба и влекут ухудшение точности результатов.

Спектрополяриметрические данные для VII Zw 244 были получены 12 октября 2020. Суммарная экспозиция составила 1.5 часа. VPHG940@600 с шириной щели 2", с фильтром LP425 (для подавления второго порядка) совместно с ПЗС E2V 261-84 (с размером пикселя 15×15 мк²; в спектральном режиме с бинированием 2×4 , дающим размер кадра $\sim 2k \times 520$ пикселей и масштаб $0''.391 \times 0''.782$ /пиксель²) обеспечили спектральное покрытие 3500-8500 Å с FWHM ~ 12 Å. Наблюдения за объектами сопровождались наблюдениями стандартных поляризованной звезды и звезды с нулевой поляризацией.

Расчёт параметров Стокса проводился по формулам 1.1, 1.2, 1.3, степени линейной поляризации и угла плоскости поляризации по формулам 1.4, 1.5 из Главы 1. Где требовалась производилась поправка за статистическое смещение по формуле 1.6. Поляризация межзвёздной среды (МЗС) и деполяризация атмосферы учитывались с помощью поляриметрических измерений звёзд поля вокруг исследуемых АЯГ.

3.1.2 Поляриметрические наблюдения

В поляриметрическом режиме с двойной призмой Волластона для LEDA 3095839 было получено 5 кадров с экспозицией ~ 1 мин. в интерференционных SED-фильтрах с помощью ПЗС E2V 42-90 с бинированием кадра 2×2 (размер кадра $1k \times 1k$ пикс. и масштабом $0''.352 \times 0''.352$ /пиксель²). Повторяя идею фотометрического эхокартирования, один из фильтров ориентирован на линию H α , а второй - на континуум рядом. Для VII Zw 244 поляриметрические данные получены с тем же ПЗС с аналогичным бинированием в трёх фильтрах (один покрывает линию H α , два других охватывают континуальное излучение вокруг) по 7 кадров с экспозицией по ~ 3 минуты.

В обоих случаях прибор ориентировался таким образом, чтобы в поле зрения каждого направления поляризации находились яркие непременные звёзды (на расстоянии 1'.6 от LEDA 3095839 и на расстоянии 4'.6 от VII Zw 244). Это позволяет применять метод дифференциальной поляриметрии, который сводит к минимуму эффекты атмосферной деполяризации (которые могут достигать

2-3% [55]) и инструментальные ошибки, связанные с пропуском призмы (составляющее около 0.2% по независимым измерениям поляризованных звёзд-стандартов [74]). Методика обеспечила точность поляриметрии около $\sim 0.1\%$ для звёзд поля. В рамках данного исследования полученные поляриметрические данные в фильтрах позволили уточнить среднее значение поляризации в исследуемых АЯГ, а также оценить влияние поляризации МЗС.

3.2 Анализ полученных данных

3.2.1 LEDA 3095839

Континуальная поляризация

Результаты спектрополяриметрии LEDA 3095839 показаны на Рис. 3.1. Спектр приведён в диапазоне длин волн 6500-8200 ÅÅ где расположена смещённая широкая линия H α .

На 1-й панели Рис. 3.1 показан интегральный спектр в единицах ADU (analog digital units) без исправления за кривую чувствительности прибора. Отметим, что в континуальном спектре объекта видны полосы атмосферного поглощения молекулярного кислорода: В-полоса (6860-6917 ÅÅ) и А-полоса (7590-7720 ÅÅ); кроме того, в диапазоне $\sim 7150-7350$ ÅÅ имеется полоса поглощения водяного пара, которая приходится на широкую линию H α . На всех панелях отмечены центры линии H α и узких линий [NII].

Болометрическая светимость

Одним из эффективных методов оценки спина a является определение коэффициента радиационной эффективности $\epsilon(a)$ аккреционного диска, который существенно зависит от значения спина чёрной дыры [82–85]. Радиационная

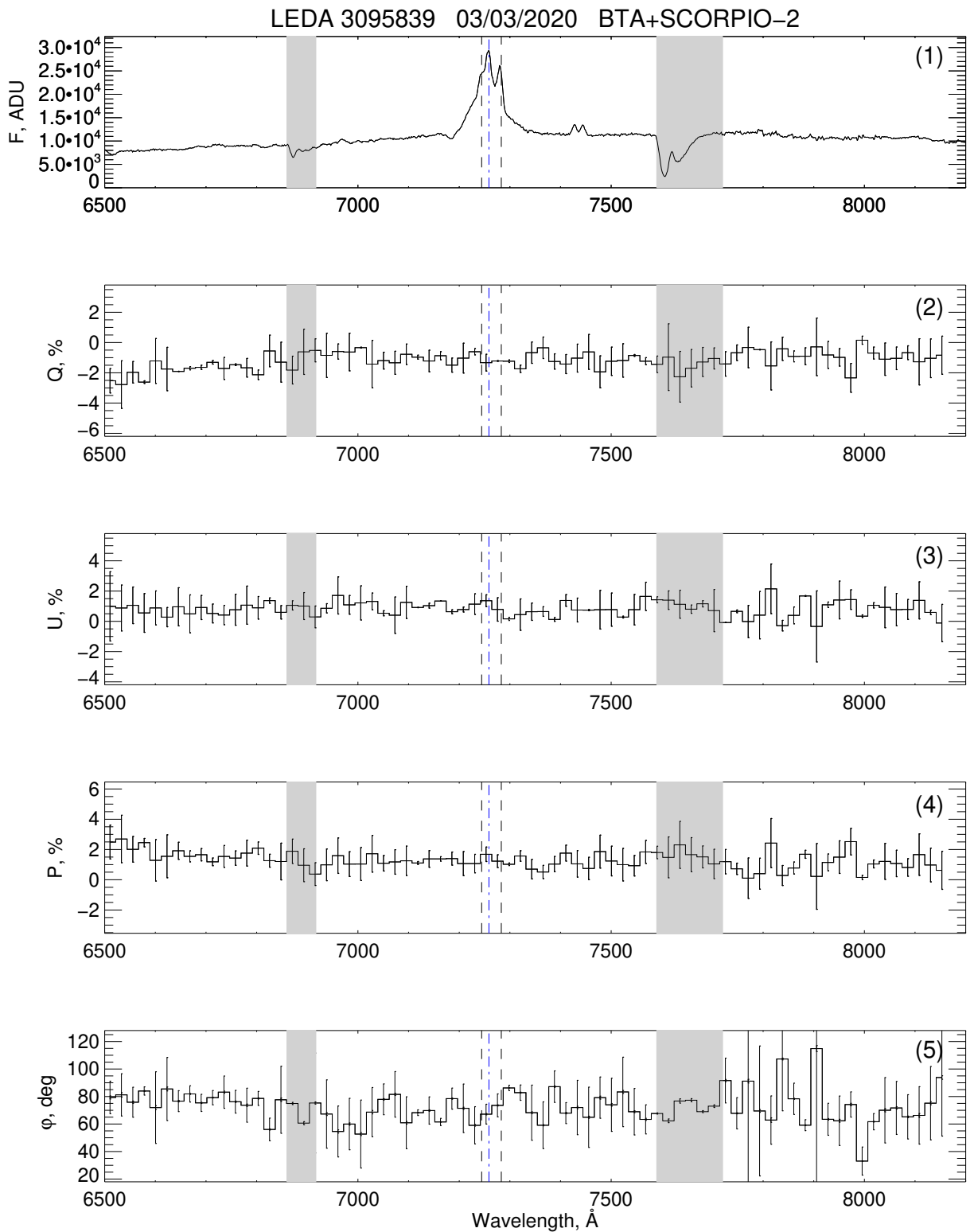


Рисунок 3.1 — Спектрополяриметрические данные для LEDA 3095839 в диапазоне 6500-8200 Å. Сверху вниз: интегральный спектр F в ADU (1), нормированные параметры Стокса Q (2) и U (3), степень поляризации P (4), угол поляризации φ (5). Вертикальная синяя штрихпунктирная линия обозначает положение линии $H\alpha$; вертикальные чёрные штриховые линии обозначают положение узких линий [NII]. Полосы атмосферного поглощения отмечены светло-серыми полосами.

эффективность определяется как $\varepsilon = L_{\text{bol}} / (\dot{M}c^2)$, где L_{bol} — болометрическая светимость АЯГ, а \dot{M} — темп аккреции. При этом значение радиационной эффективности должно лежать в пределах $0.039 < \varepsilon < 0.324$, а спина $-1.0 < a \leq 0.998$ [86]. Отрицательное значение спина соответствует т.н. *ретроградному* вращению, при котором СМЧД и аккреционный диск вращаются в противоположных направлениях.

Используя измеренную в Главе 1 (см. табл. 2) светимость АЯГ на 5100\AA L_{5100} , равную $\log [L_{5100}(\text{erg/s})] = 43.94$, болометрическую светимость можно определить при помощи болометрической поправки BC по формуле $L_{\text{bol}} = L_{5100} \times BC$. Определение болометрической поправки является довольно сложной задачей. В литературе можно найти сильно отличающиеся значения BC [87–91], лежащие в пределах от ~ 5 до ~ 24 . В данном исследовании используется значение $BC = 10.3$ [87], полученное на основании наблюдений более 250 квазаров и на сегодняшний день наиболее часто использующееся для оценки болометрической светимости по оптическим (в системе отсчёта источника) данным, например, в новых работах по данным *JWST* [92]. Тогда мы получаем значение болометрической светимости $\log [L_{\text{bol}}(\text{erg/s})] = 44.95$.

Угол наклона и величина спина

Согласно [82] мы можем численно определить значение спина:

$$\varepsilon(a) = 1 - \frac{R_{\text{ISCO}}^{3/2} - 2R_{\text{ISCO}}^{1/2} + |a|}{R_{\text{ISCO}}^{3/4} \left(R_{\text{ISCO}}^{3/2} - 3R_{\text{ISCO}}^{1/2} + 2|a| \right)^{1/2}}, \quad (3.1)$$

где R_{ISCO} — радиус самой внутренней устойчивой круговой орбиты чёрной дыры, определяемый как:

$$\begin{aligned} R_{\text{ISCO}}(a) &= 3 + Z_2 \pm [(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)]^{1/2} \\ Z_1 &= 1 + (1 - a^2)^{1/3}[(1 + a)^{1/3} + (1 - a)^{1/3}] \\ Z_2 &= (3a^2 + Z_1^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Здесь знак минус используется для сопутствующего вращения ($a \geq 0$), а знак плюс для обратного вращения ($a < 0$).

Существует несколько моделей, связывающих радиационную эффективность с такими параметрами АЯГ, как масса СМЧД $M_{\text{СМЧД}}$, угол i между лучом зрения и осью аккреционного диска и болометрическая светимость L_{bol} [93–97]. Исходя из теоретической модели [95], разработанной для случая геометрически тонкого, оптически толстого аккреционного диска Шакуры-Сюняева [98]:

$$\varepsilon(a) = 0.105 \left(\frac{L_{\text{bol}}}{10^{46} \text{erg/s}} \right) \left(\frac{L_{5100}}{10^{45} \text{erg/s}} \right)^{-1.5} M_8 \mu^{1.5} \quad (3.3)$$

Здесь $M_8 = M_{\text{СМЧД}}/(10^8 M_{\odot})$, $\mu = \cos(i)$, а i – угол наклона между лучом зрения и осью вращения диска.

В расчётах использована величина массы СМЧД, полученная в Главе 2. Также, мы предположили, что поляризованное излучение этого АЯГ формируется в аккреционном диске. Таким образом, на основе полученных поляриметрических данных [$P = (0.9 \pm 0.4)\%$] и механизма Соболева-Чандрасекара [99–101] с учётом фарадеевской деполяризации от магнитного поля [79], мы пришли к выводу, что угол наклона должен удовлетворять условию $35^\circ \lesssim i \lesssim 55^\circ$. Меньшие углы наклона требуют меньшие значения наблюдаемой поляризации (при $i \sim 15^\circ - 20^\circ$ $P \sim 0.2\%$). При больших углах наклона системы модель расходится, поскольку коэффициент радиационной эффективности принимает недопустимые значения. Далее мы рассмотрели три варианта: $i = 35^\circ$, $i = 45^\circ$ и $i = 55^\circ$. В табл. 4 показаны результаты расчётов для первых двух вариантов. Результаты вполне типичны для объектов такого типа [102]. Результаты для $i = 55^\circ$ неубедительны и не позволяют определить значение спина, потому далее такой угол исключается из рассмотрения.

Магнитное поле

При рассмотрении магнитного поля в аккреционном диске обычно предполагается (см., например, [103]), что его зависимость от радиуса имеет степенной вид:

$$B(R) = B_{\text{H}}(R_{\text{H}}/R)^s, \quad (3.4)$$

Таблица 4 — Результаты вычисления масс M_{SMBH} и спинов a для исследуемых объектов. P - степень поляризации в [%], $FWHM$ - полная ширина на полувысоте линии $\text{H}\beta$ в км/с, L_{bol} - болометрическая светимость в эрг/с, l_{E} - соотношение Эддингтона, i - угол наклона в градусах, ε - радиационная эффективность, B_{H} и B_{H}^* - напряжённость магнитного поля на горизонте событий в Гауссах, полученная из спектральных характеристик и поляризационных данных соответственно, s - показатель степени зависимости магнитного поля от радиуса. Для VII Zw 244 оценки массы и угла наклона СМЧД, полученные методом спектрополяриметрии, отмечены символом †.

Объект	P	$FWHM$	$\log(L_{\text{bol}})$	l_{E}	i	$\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot})$	ε	a	$\log(B_{\text{H}})$	$\log(B_{\text{H}}^*)$	s
LEDA 3095839	0.9 ± 0.4	3775	44.95	$0.11^{+0.09}_{-0.05}$	35	$7.881^{+0.153}_{-0.171}$	$0.21^{+0.09}_{-0.07}$	$0.966^{+0.030}_{-0.106}$	$4.06^{+0.24}_{-0.24}$	$3.53^{+0.26}_{-0.53}$	1.77 ± 0.18
				$0.22^{+0.18}_{-0.09}$	45	$7.699^{+0.153}_{-0.171}$	$0.11^{+0.10}_{-0.04}$	$0.736^{+0.226}_{-0.368}$	$4.00^{+0.56}_{-0.34}$	$4.08^{+0.30}_{-1.08}$	1.63 ± 0.23
VII Zw 244	1.4 ± 0.6	3219	45.24	$0.11^{+0.03}_{-0.02}$	18	$8.069^{+0.068}_{-0.075}$	$0.30^{+0.02}_{-0.06}$	$0.996^{+0.002}_{-0.012}$	$4.29^{+0.10}_{-0.13}$	-	-
					$14.3 \pm 3.6^{\dagger}$	$8.29 \pm 0.30^{\dagger}$	-	-	-	-	-

где B_{H} — значение напряжённости магнитного поля на горизонте событий СМЧД в АЯГ, $R_{\text{H}} = GM_{\text{SMBH}} (1 + \sqrt{1 - a^2}) / c^2$ — радиус горизонта событий. Что касается параметра s , то существуют модели с разными значениями этого параметра [103], но для диска Шакуры-Сюняева чаще всего принимается значение $s = 5/4$ [98].

В литературе нам не удалось найти информацию о радиосвойствах объекта LEDA 3095839. Так что мы исходили из предположения, что он радиогромкий и обладает джетом. Это позволяет оценить напряжённость магнитного поля, используя подход из [104], только исходя из полученных спектральных данных:

$$B_{\text{H}} = \frac{10^{(5.78 \pm 0.07)} \eta \sqrt{\varepsilon}}{l_{\text{E}}^{(0.295 \pm 0.020)} |a| [\cos(i)]^{3/4}} \left(\frac{10^3 \text{km/s}}{FWHM} \right)^3 \text{G} \quad (3.5)$$

Здесь η - коэффициент, зависящий от модели генерации релятивистского джета (в данном случае $\eta = 1.05^{-0.5}$ [104]), а $FWHM$ - полная ширина на половине максимума спектральной линии $\text{H}\beta$. Мы использовали соотношение Эддингтона $l_{\text{E}} = L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$, где $L_{\text{Edd}} = 1.5 \times 10^{38} M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}$ - Эддингтоновская светимость. Для данного объекта взято значение $V_{\text{line}} = 1.5 \times 10^3$ км/с из Главы 2, пересчитанное как $FWHM = 2.335k^{-0.5}V_{\text{line}}$. Здесь $k \approx 0.88$ [105] - коэффициент, возникающий вследствие того, что в Главе 2 величина V_{line} определена по линии $\text{H}\alpha$. Разница возникает вследствие стратификации вещества BLR-области - область излучения в линии $\text{H}\alpha$ шире области излучения в линии $\text{H}\beta$.

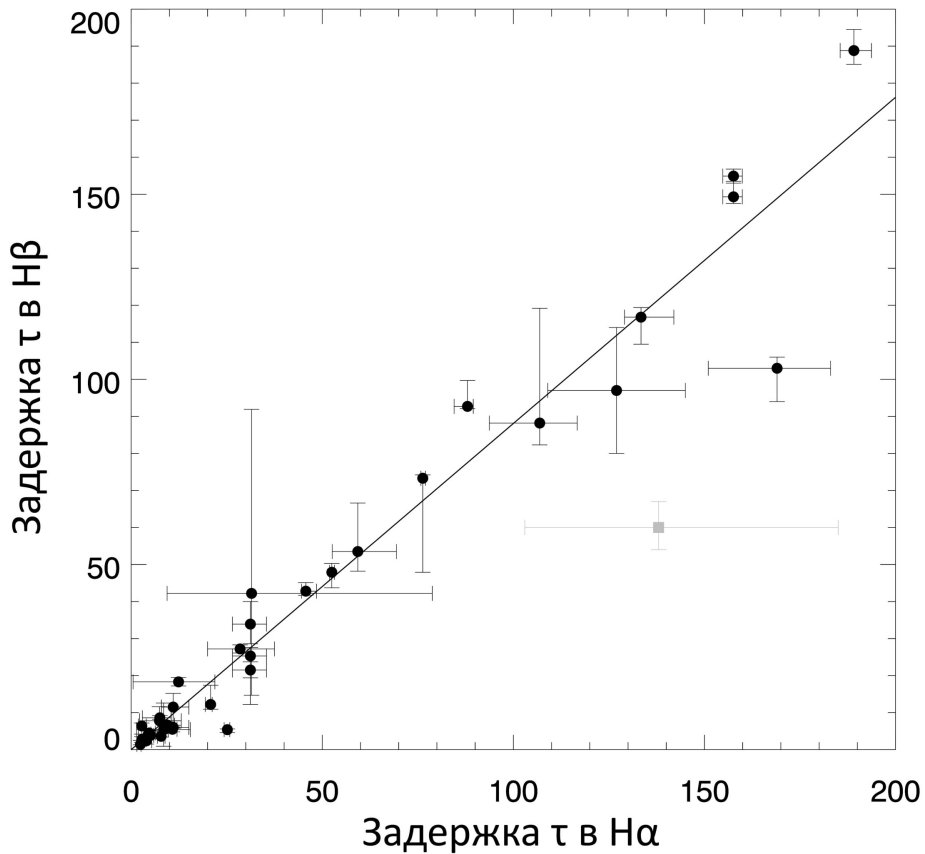


Рисунок 3.2 — Сравнение наблюдаемого запаздывания в линии H β относительно запаздывания в линии H α по данным каталога [106] (чёрным) и мониторинга [107] (серым).

Ввиду различных потенциалов ионизации и задержек в линиях H α и H β будут различными (и, следовательно, ширины спектральных профилей линий). Мы воспользовались данными каталога [106] для 29 АЯГ, для которых эхокартирование дало задержку одновременно в двух линиях — H α и H β , а также данными по Sy 1 ЗС 390.3, полученными из спектрополяриметрического мониторинга на 6-м телескопе БТА [107]. Сравнение наблюдаемого запаздывания в линиях приведено на Рис. 3.2. Наклон прямой составил $k = \tau(\text{H}\beta)/\tau(\text{H}\alpha) = 0.88 \pm 0.03$.

С другой стороны, мы можем воспользоваться методом, основанном на численном моделировании зависящей от длины волны интегральной поляризации излучения аккреционного диска в присутствии магнитного поля. Метод позволяет оценивать геометрию поля (характеристики R_{H} и s из 3.4) в аккреционном диске по характеристикам наблюдаемой поляризации и подробно описан в [79].

Результаты обоих методов показаны в таблице 4. Полученные значения магнитного поля достаточно близки и вполне типичны для объектов такого

типа [79; 108]. Относительно большие ошибки определения магнитного поля связаны со значительными ошибками измерения величины спина и относительно небольшой степенью поляризации.

3.2.2 VII Zw 244

Поляризация в широких линиях

Результаты спектрополяриметрии АЯГ VII Zw 244 показаны на Рис. 3.3. Спектр представлен в диапазоне длин волн 4500-8000 Å и содержит смещённые широкие линии $H\alpha$, $H\beta$ и $H\gamma$. Панели на Рис. 3.3 соответствуют панелям на Рис. 3.1, потому детали опускаются. На спектрах отмечены В- и А-полосы атмосферного поглощения молекулярного кислорода, а также линия излучения молекулярного кислорода 5577Å.

2-я и 3-я панели на Рис. 3.3 показывают параметры Стокса Q и U , бинированные по 32Å, исправленные за пропускание призмы Волластона, но не исправленные за поворотный угол прибора (т.е. ориентация вектора поляризации не приведена к небесной системе отсчёта). Степень P и угол поляризации ϕ бинируются аналогично. Здесь представлены наблюдаемые значения P без коррекции за смещение (формула 1.6).

Во всём наблюдаемом диапазоне параметры Стокса Q и U демонстрируют как небольшую плавную зависимость от длины волны (в основном в случае U), так и резкие вариации в пределах широких линий, где в параметрах Q и U могут быть обнаружены противоположные вариации. Важно отметить, что характер изменений параметров в двух линиях $H\alpha$ и $H\beta$ повторяется с точностью до шума; в линии $H\gamma$ эффект слишком мал и не превышает шума, поэтому дальнейший анализ поляризации в этой линии не проводится. Хорошо видно, что степень поляризации P в широких линиях значительно (на $\sim 1-1.5\%$) отличается от континуального значения, а угол приобретает S-образный профиль с амплитудой, значительно превышающей погрешность измерения. Эти особенности однозначно указывают на наличие экваториального рассеяния в центральных областях АЯГ [109].

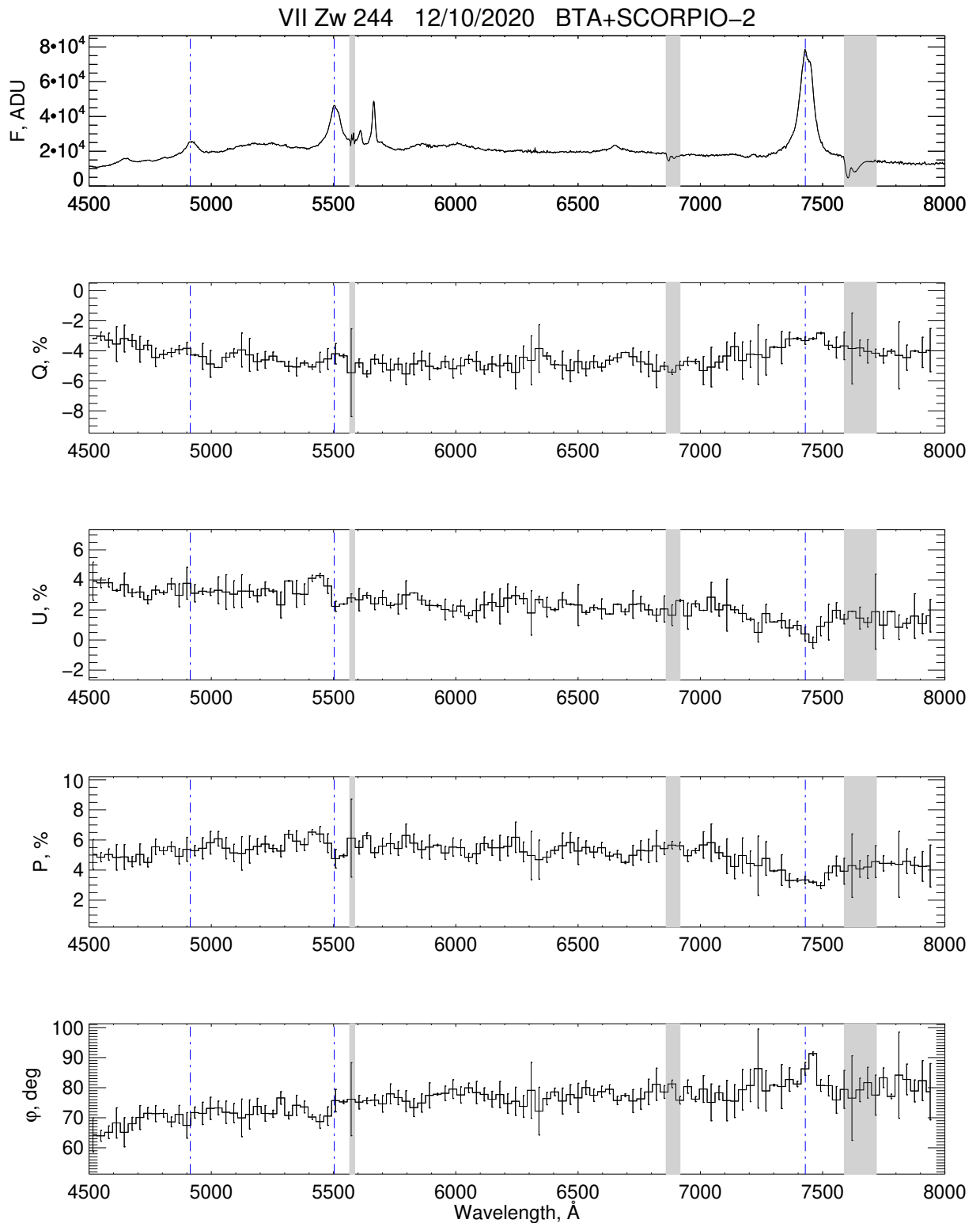


Рисунок 3.3 — Спектрополяриметрические данные для VII Zw 244 в диапазоне 4500-8000 Å. Сверху вниз: интегральный спектр F в единицах ADU (1), нормированные параметры Стокса Q (2) и U (3), степень поляризации P (4), угол поляризации φ (5). Вертикальная синяя штрихпунктирная линия обозначает положение (слева направо) линий $H\gamma$, $H\beta$ и $H\alpha$. Полосы поглощения/излучения атмосферы отмечены светло-серыми прямоугольными областями.

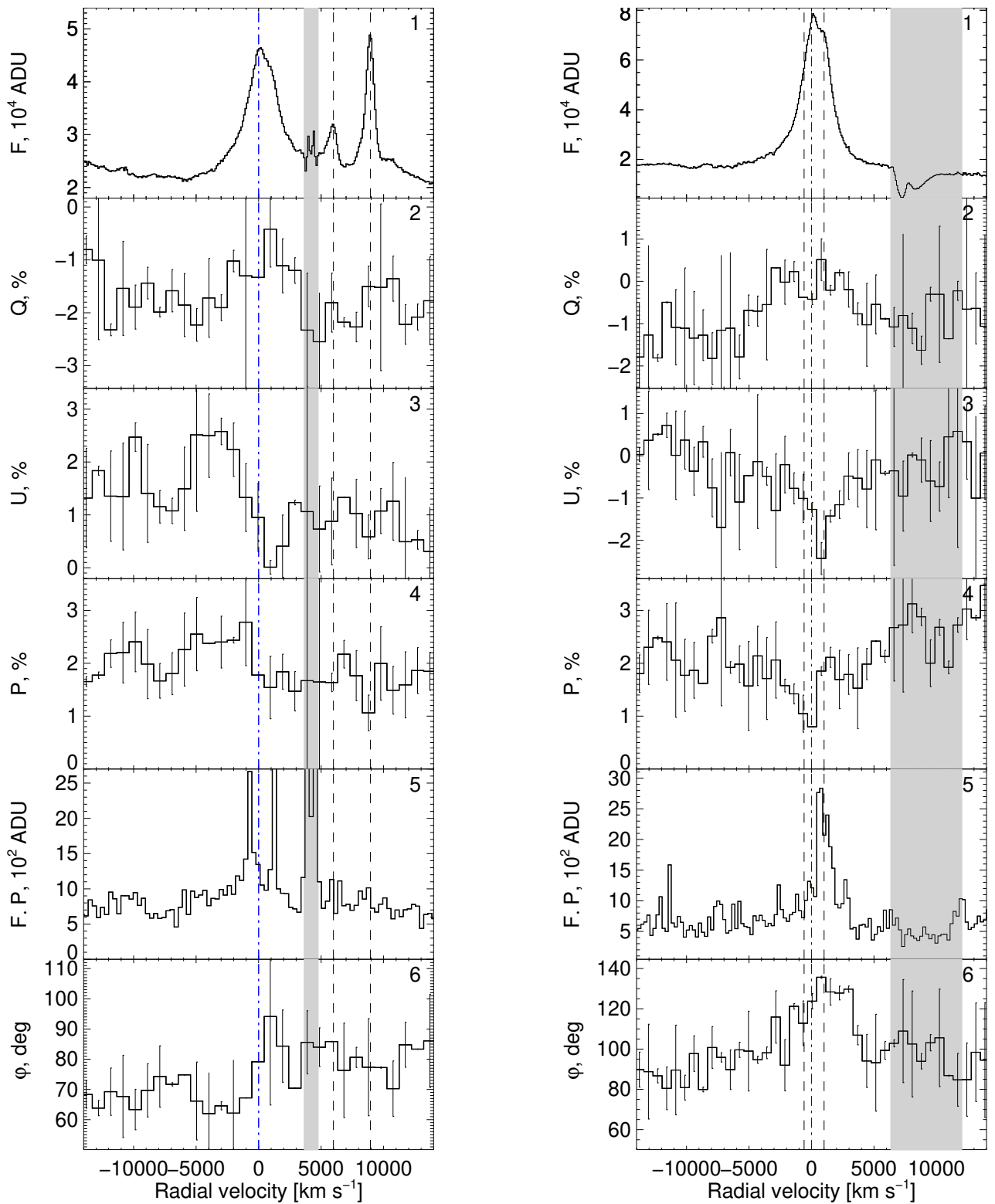


Рисунок 3.4 — Профили линий $H\beta$ (слева) и $H\alpha$ (справа). Сверху вниз: интенсивность естественного света, параметры Стокса Q и U , степень поляризации, поляризованный поток и угол поляризации. Степень поляризации исправлена за смещение (ур. 1.6). Значения на панелях 1 и 5 бинированы по 6\AA , а значения на панелях 2-4 и 6 – по 18\AA . Вертикальными штриховыми линиями отмечены узкие NLR-линии - $[OIII]$ в профиле $H\beta$ и линии $[NII]$ в профиле $H\alpha$. Синяя штрихпунктирная линия соответствует нулевой скорости. Полосы поглощения/излучения атмосферы закрашены светло-серым цветом.

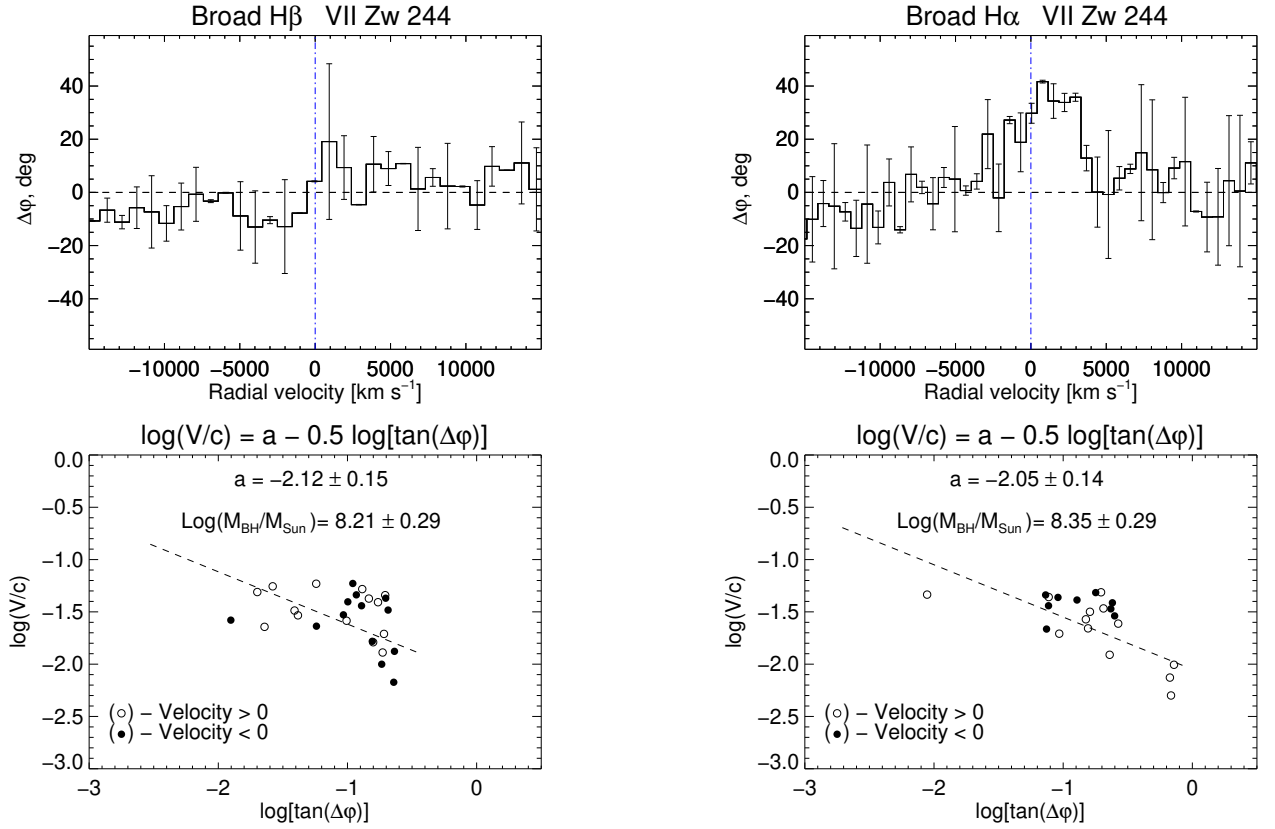


Рисунок 3.5 — Профили угла поляризации в линиях $H\beta$ (слева) и $H\alpha$ (справа). На верхних панелях дано отклонение угла поляризации от среднего значения (горизонтальная штриховая линия). Синие линии отмечают кеплеровское движение. На нижних панелях показана величина $\log(V/c)$ в зависимости от $\log[\tan(\Delta\varphi)]$.

Поскольку дальнейший анализ поляризованного спектра объекта будет касаться только профилей двух широких линий, на Рис. 3.4 представлены спектральные данные $H\alpha$ и $H\beta$, пересчитанные в интервале скоростей от -14000 до 14000 км/с относительно центров линий. Панели 1 и 5 демонстрируют поток F и поляризованный поток $F \cdot P$ в отсчётах; параметры Стокса Q и U (панели 2 и 3) исправлены за поляризацию звёзд поля, рассчитанную по данным поляриметрии в фильтрах (поправка равна 3.1% для Q и -1.8% для U). Степень поляризации P и угол φ пересчитываются из параметров Стокса Q и U с учётом поправки за смещение (фактор Райса составляет около 0.67). Для большей наглядности параметры Q , U , P и φ бинированы по 18\AA ; спектр F представлен с разрешением 2\AA , поляризованный спектр $F \cdot P$ – с разрешением 6\AA .

Измерение массы СМЧД

Как показано в [73] спектрополяриметрические наблюдения галактик с экваториальным рассеянием позволяют измерять массы СМЧД независимо от угла наклона системы к наблюдателю. Излучение дифференциально вращающегося BLR-диска отражается от области экваториального рассеяния так, что наблюдатель регистрирует характерные особенности в широких линиях в поляризованном свете, в частности, S-образный профиль угла поляризации, который является маркером кеплеровского движения в диске. Изменение угла поляризации вдоль широкой линии связано со скоростью вращения газа в BLR как:

$$\log(V/c) = a - 0.5 \log[\text{tg}(\Delta\varphi)] \quad (3.6)$$

где $\Delta\varphi$ - относительные вариации угла поляризации (см Рис. 3.5), а коэффициент -0.5 согласуется с предположением о кеплеровском движении BLR. Параметр 'а' является функцией M_{SMBH} и может быть записан как

$$a = 0.5 \log \left[\frac{GM_{\text{SMBH}} \cos^2(\theta)}{c^2 R_{\text{sc}}} \right] \quad (3.7)$$

где R_{sc} - внутренний радиус области рассеяния, а θ - угол между BLR и плоскостью рассеивателя. Из предположения компланарности мы полагаем $\theta = 0$, что вносит неопределённость в измерение массы не более $\sim 10\%$. Тогда масса СМЧД может быть выражена следующим образом:

$$\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}) \approx 10.25 + 2a + \log(R_{\text{sc}}) \quad (3.8)$$

В уравнении 3.8 параметр 'а' определяется из наблюдательных данных, а размер области рассеяния R_{sc} определяется косвенными методами. Обычно считается, что R_{sc} характеризует внутреннюю границу газопылевой области (называемой пылевым тором). В настоящее время для определения размера тора применяются три метода, два из которых основаны на ИК-наблюдениях: интерферометрия в ближнем и среднем ИК-диапазонах (например, [110]) и ИК-эхокартирование [см, например, 111]. Третий метод [36] подразумевает эхокартирование в поляризованном свете и будет подробнее описан в Главе 4.

Лю и др. [112] представили результаты эхокартирования пылевого тора галактики VII Zw 244 в полосах WISE W1 (~ 3.4 мк) и W2 (~ 4.5 мк). ИК-излучение показывает задержку примерно в 340-360 дней относительно оптического излучения, что указывает на размер области, излучающей в ИК-диапазоне.

Однако наблюдательные ИК-методы локализуют глубокие области пылевого тора, где оптическая толщина составляет $\gg 1$, а экваториальное рассеяние происходит в области, где оптическая толщина порядка 1 и преобладает рассеяние на электронах [113]. Интересно отметить, что первый результат предложенного нового метода на основе эхокартирования в поляризованном свете для галактики Mrk 6 показал, что измеренное значение R_{sc} оказалось вдвое меньше размера пылевого тора, оценённого по ИК-данным. Это позволяет предположить, что для VII Zw 244 $R_{sc} \approx 170$ св. дней.

Более того, мы можем рассчитать значение R_{sc} на основе масштабного отношения из [74]. Согласно этой работе $R_{sc} \simeq 5.1 R_{BLR}$, где мы берём ранее измеренное значение размера области BLR $R_{BLR} = 30.7_{-2.3}^{+2.1}$ св. дн. Тогда $R_{sc} \simeq 157$ св. дней. Это значение оказывается примерно равным половине размера пылевой области в ИК-диапазоне, и далее мы будем использовать его для измерения массы СМЧД.

Поскольку для VII Zw 244 признаки экваториального рассеяния были обнаружены в двух широких линиях, приведём профили переключения угла поляризации для $H\alpha$ и $H\beta$ (Рис. 3.5). На верхних панелях показаны вариации угла поляризации относительно среднего уровня. В обеих линиях видно, что $\Delta\varphi$ справа от центра линии принимает положительные значения; при этом левое отрицательное крыло профиля обнаруживается только в линии $H\beta$. Хотя профиль угла поляризации $H\alpha$ не является симметричным, как это предсказывает модель чисто кеплеровского движения, на основе выборки, приведённой в работе [74], можно найти близкие примеры асимметричного переключения угла поляризации, например у Mrk 1501 (см. Рис. 4 в статье). Можно предположить, что синее крыло профиля линии $H\alpha$ подвержено деполяризации, что может быть связано с радиальными истечениями из области [см., например, 114].

На нижних панелях Рис. 3.5 показана зависимость логарифма скорости газа в линии $\log(V/c)$ от логарифма тангенса вариаций поляризационного угла $\log[\text{tg}(\Delta\varphi)]$. Независимо от асимметрии профиля линии $H\alpha$ точки данных измеренных значений скорости газа $\log(V/c)$ чётко показывают линейную зависимость от $\log[\text{tg}(\Delta\varphi)]$ в обеих эмиссионных линиях, что является важным

подтверждением наблюдаемого кеплероподобного движения. Фиттирование наблюдаемых точек линейной регрессией позволило измерить $a = -2.12 \pm 0.15$ для $H\beta$ и -2.05 ± 0.14 для $H\alpha$. В случае обеих широких линий измерения масс оказываются близкими: $\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}) = 8.21 \pm 0.29$ для $H\beta$ и 8.35 ± 0.29 для $H\alpha$. Заметим, что если принять $R_{\text{sc}} = 350$ св. дней, как это следует из ИК-наблюдений, то $\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}) \approx 8.6$, что согласуется с полученным выше измерением в пределах погрешности. Также важно отметить, что полученная здесь погрешность рассчитывалась как дисперсия отклонения измеренных значений скорости газа в широкой линии от кеплеровских из предположения случайного распределения величин. Как видно из [74], 0.2-0.3 dex является типичной погрешностью при спектрополяриметрических измерениях массы.

Болометрическая светимость

Используя измеренную ранее светимость из табл. 2 $\log [L_{5100}(\text{erg/s})] = 44.22$ и болометрическую поправку $BC = 10.3$, получаем $\log [L_{\text{bol}}(\text{erg/s})] = 45.24$. Отметим, что в работе [115] получено близкое значение $\log [L_{5100}(\text{erg/s})] = 44.16$.

Угол наклона и величина спина

Как показано в работе [74], угол наклона АЯГ можно получить путём сравнения двух независимых измерений массы СМЧД. Оценка массы СМЧД, полученная из эхокартирования, получается с точностью до безразмерного множителя f (см. формулу 2.1) [см. 34]: $M_{\text{SMBH}} = f \times (R_{\text{BLR}} V_{\text{line}}^2 G^{-1}) = f \times V.P.$, где $V.P.$ – так называемое вириальное произведение. В Главе 2 мы получили значение массы СМЧД при $f = 1$, поэтому для VII Zw 244 $\log(V.P./M_{\odot}) = 7.05_{-0.08}^{+0.07}$. Сравнивая $V.P.$ с измерением массы $\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}) = 8.3 \pm 0.3$, полученной из спектрополяриметрического подхода, мы получаем $f = 21.1 \pm 10.1$. Согласно [116], множитель f связан с кинематикой, геометрией и наклоном BLR-облаков и определяется как $f = [h^2 + \sin^2(i)]^{-1}$, где h - отношение высоты толсто-

го диска BLR к радиусу (или отношение турбулентной скорости к локальной кеплеровской скорости для данного радиуса), которое можно принять $h = 0$ для геометрически тонких дисков. Тогда для VII Zw 244 угол наклона равен $i = (14.3 \pm 3.6)^\circ$. Также обратим внимание, что хотя средний угол наклона АЯГ с экваториальным рассеянием составляет $\sim 35^\circ$, объекты с $i \sim 14^\circ$ уже были обнаружены ранее в выборке АЯГ с экваториальным рассеянием, например, Mrk 1148 [74].

Используя ранее описанный подход [102] и массу, полученную из эхокартирования в Главе 2, получаем, что $i \gtrsim 18^\circ$. Более того, в работе [117] получено независимо значение $i \approx 15^\circ$ для VII Zw 244 по количественной оценке вклада светимости тора в общее ИК-излучение. То есть, полагая $i \approx 18^\circ$, теперь возможно оценить величину спина СМЧД. Результаты оценок спина представлены в таблице 4. $a \approx 0.996$ является довольно типичным значением для объектов данного типа.

Также интересно заметить, что через год после публикации результатов [118], представленных в Главе 2, в работе Ху и др. [119] были получены близкие значения временной задержки (совпадающие в пределах погрешностей). Для расчёта $V.P.$ они измерили скорость по σ_{line} (квадратный корень из второго момента) по rms-спектру (среднеквадратичное отклонение потока относительно его среднего значения вдоль длин волн). Авторы получили меньшие значения вириального произведения, чем в [118], где скорость газа измерялась по σ_{line} по спектру, полученному в одну эпоху, но с высоким отношением S/N и декомпозицией и вычитанием узких компонент вблизи линии H β (подробно описывалось в Главе 2). Таким образом, $V.P.$ из [119] по сравнению со спектрополяриметрическим измерением массы даёт угол наклона системы $\sim 11^\circ$, из чего можно заключить, что их измерение вириального произведения, вероятно, несколько занижено (пусть и незначительно).

Магнитное поле

VII Zw 244 является радиотихим [120], однако, согласно недавним исследованиям [121–123], радиотихие АЯГ могут иметь джеты и механизмы излучения подобные радиогромким объектам. Исходя из этого мы решили, что было бы по-

лезно попробовать применить метод из [104] (уравнение 3.5) и к данному АЯГ. Для этого объекта мы берём значение V_{line} из Главы 2 [118] и рассчитываем $FWHM = 2.335 \cdot V_{\text{line}}$, поскольку в этом случае V_{line} относится к линии H β .

Этот объект обладает экваториальным рассеянием, что не позволяет рассматривать аккреционный диск как единственный источник поляризации. Таким образом, определить напряжённость магнитного поля по методу [79] не представляется возможным.

Результат показан в таблице 4. Полученное значение магнитного поля также вполне типично.

3.3 Выводы и результаты Главы 3

В данной главе мы приводим и анализируем спектрополяриметрические данные, полученные на БТА для двух активных галактик 1-го типа.

Измеренные поляризационные свойства были использованы для изучения механизмов поляризации и определения физических параметров исследуемых АЯГ. Наметим следующие выводы:

- для LEDA 3095839 в поляризованном спектре признаков экваториального рассеяния обнаружено не было. В то же время мы измерили уровень континуальной поляризации как $(0.9 \pm 0.4)\%$, которая генерируется, как мы предполагаем, в аккреционном диске. Используя подход из [95] мы пришли к выводу, что для данного объекта имеет смысл рассмотреть два варианта: угол наклона $i \approx 35^\circ$ и $i \approx 45^\circ$. Таким образом, мы получили значения спина $a = 0.966_{-0.106}^{+0.030}$ и $a = 0.736_{-0.368}^{+0.226}$ и напряжённости магнитного поля на горизонте событий СМЧД $\log(B_{\text{H}}[G]) = 4.06_{-0.24}^{+0.24}$ и $\log(B_{\text{H}}[G]) = 4.00_{-0.34}^{+0.56}$ соответственно. Также мы оценили напряжённость магнитного поля и показатель степени s зависимости магнитного поля от радиуса в аккреционном диске по поляриметрическим данным с использованием модели [79] для этих двух случаев: $\log(B_{\text{H}}^*[G]) = 3.53_{-0.53}^{+0.26}$, $s = 1.77 \pm 0.18$ and $\log(B_{\text{H}}^*[G]) = 4.08_{-1.08}^{+0.30}$, $s = 1.63 \pm 0.23$.
- для VII Zw 244 обнаружены признаки экваториального рассеяния в широких линиях, как H α , так и в H β . Это позволило измерить массу СМЧД как $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 8.3 \pm 0.3$. Сравнение полученной массы с

полученными результатами в Главе 2 позволило измерить угол наклона системы $i = (14.3 \pm 3.6)^\circ$, что позволило использовать подход из [95] (измерение с использованием светимости АЯГ) в предположении, что $i \approx 18^\circ$ (минимально возможное значение для этого объекта в данном методе). Этот подход даёт нам значение спина $a = 0.996_{-0.012}^{+0.002}$ и напряжённость магнитного поля на горизонте событий СМЧД $\log(B_H[G]) = 4.29_{-0.13}^{+0.10}$.

Глава 4. Поляриметрическое эхокартирование АЯГ

Ввиду того, что центральный парсек в АЯГ остаётся в оптических наблюдениях пространственно неразрешимыми, область, где BLR переходит в пылевой тор, сравнительно слабо изучена. Незнание лестницы расстояний структур вещества в окрестностях СМЧД ограничивает применение и развитие теоретических моделей [например, 124; 125] для определения радиуса сублимации пыли в АЯГ. Вызывающе и то, что в большинстве случаев теоретические прогнозы вовсе не согласуются с наблюдениями.

В 2020 в работе [36] авторами была предложена идея измерения расстояния до области экваториального рассеяния R_{sc} по поиску временной задержки между переменностью поляризованного излучения в широкой линии и переменностью континуума. Вычитание из поляризованного потока в линии континуального излучения минимизирует влияние прочих механизмов поляризации, что позволяет ассоциировать временную задержку именно с рассеянием в экваториальной области. Новый подход был успешно протестирован на примере галактики Mrk 6, однако изначально измерения были основаны на спектрополяриметрическом мониторинге, что делает такую задачу чрезвычайно дорогостоящей в смысле телескопного времени на самых крупных инструментах (вроде 6-м БТА). Важно помнить, что спектрополяриметрический мониторинг к тому же требует соответствующих приборов, а такой конфигурацией снабжено лишь несколько обсерваторий в мире. Естественным образом встал вопрос расширения успешно адаптированного метода фотометрического эхокартирования АЯГ до поляриметрических наблюдений. Фактически, описание метода, данное в Главе 2, расширяется введением в оптическую схему анализатора поляризации, а именно – двойной призмы Волластона. Среднеполосные фильтры так же спектрально ориентируются полосами пропускания на широкую эмиссионную линию и континуум возле. Таким образом, задача по исследованию ещё одной пространственно ненаблюдаемой области может быть выполнена теперь и на малых телескопах. С одной стороны, это расширяет наше представление об устройстве АЯГ, с другой – повышает точность спектрополяриметрического метода измерения масс СМЧД. Как было показано в Главе 3 – метод подразумевает знание R_{sc} , а именно поляриметрическое эхокартирование наиболее точно определяет данную характеристику.

В данной Главе опишем адаптацию метода поляриметрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах и представим первые результаты по исследованию АЯГ.

4.1 Поляриметрические наблюдения АЯГ

С начала 2020 в тёмное время мы проводим поляриметрический мониторинг двух активных галактик 1-го типа с экваториальным рассеянием Mrk 335 и Mrk 509 на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН [44] ($f/13.3$ в фокусе Кассегрена) и 1.82 телескопе Коперника ($f/9$ в фокусе Кассегрена) обсерватории Асыяго-Чима-Экар. Эти объекты входят в выборку АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием [74], которые были отобраны для поляриметрического мониторинга [см. выборку в 126]. Оба объекта яркие ($V \approx 13 - 14$ зв.в) и пригодны для наблюдений в летне-осенний период, когда погодные условия в САО наиболее стабильны. В связи с этим к настоящему времени для Mrk 335 и Mrk 509 накоплено больше всего наблюдательных эпох.

На телескопе Цейсс-1000 в разное время мы использовали приборы StoP и MAGIC, позволяющие проводить наблюдения в среднеполосных SED-фильтрах с ширинами полос пропускания порядка $\sim 250 \text{ \AA}$. В обоих случаях с двойной призмой Волластона в качестве анализатора поляризации применялся метод дифференциальной поляриметрии, что в совокупности минимизирует влияние атмосферной деполяризации и значительно увеличивает точность поляриметрических наблюдений.

С конца 2020 года в наблюдениях использовался прибор MAGIC. Сохраняя все достоинства прибора-предшественника в технике поляриметрических наблюдений (достигается точность измерения линейной поляризации до 0.1% для звездообразных источников до 16 зв.величины), новый фокальный редуктор обладает бóльшим полем зрения ($\text{FoV} \sim 6'.5$), что позволяет использовать несколько локальных звёзд-стандартов в поле объекта при дифференциальной поляриметрии, необходимых для коррекции как потока, так и пропускания поляризационных каналов (см. формулы 1.1, 1.2, 1.3).

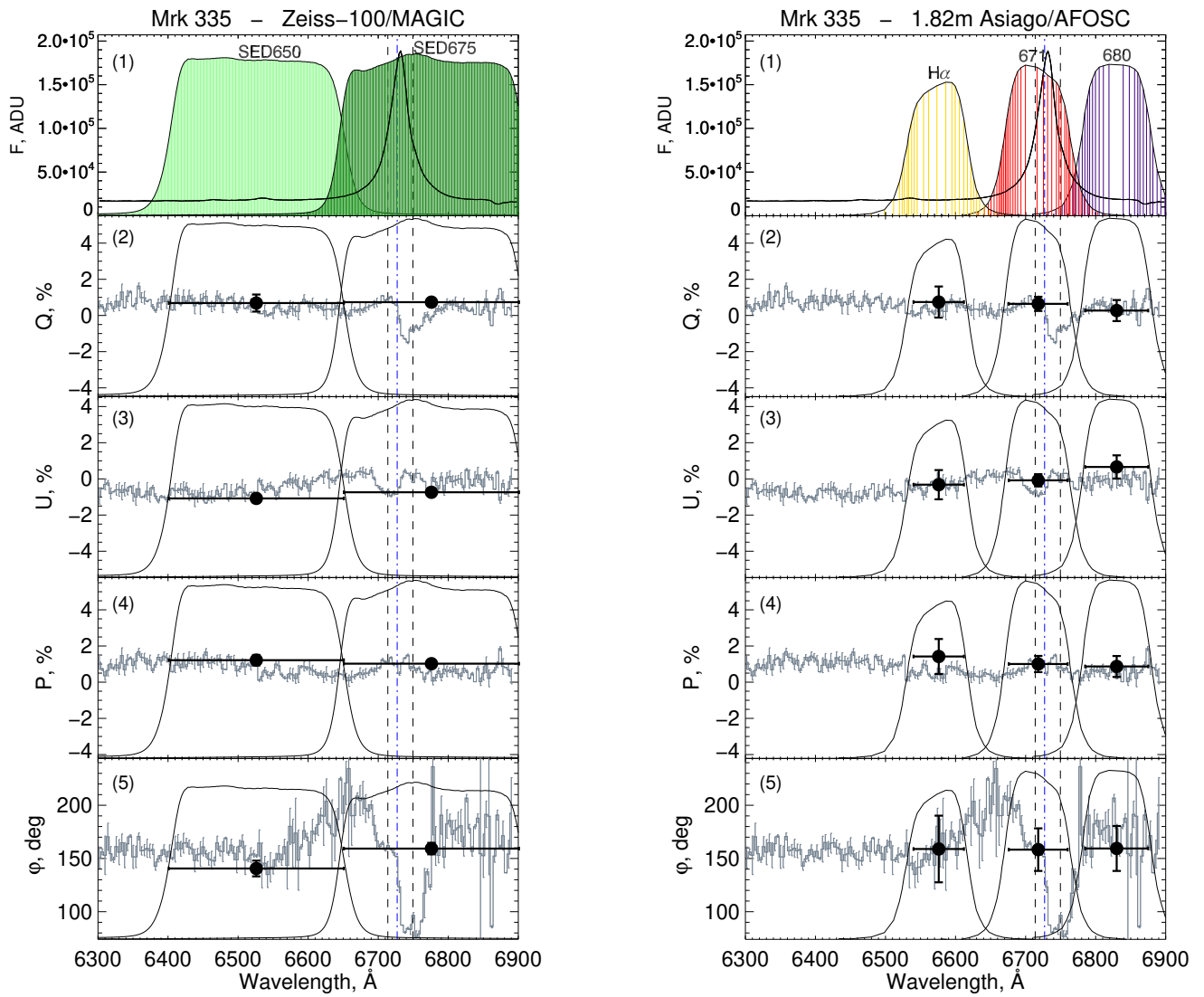


Рисунок 4.1 — Спектрополяриметрические данные для Mrk 335 из [74], полученные 09/11/2013 с наложенными полосами пропускания выбранных фильтров. Слева: кривые пропускания SED675 (тёмно-зелёный) и SED650 (светло-зелёный). На панелях 2-5 - поляриметрические данные, полученные с помощью Цейсс-1000/MAGIC 01/11/2022, наложены чёрными точками. Справа: кривые пропускания фильтров $H\alpha$ (жёлтый), 671 (красный), и 680 (фиолетовый). На панелях 2-5 - данные поляриметрии, полученные с помощью AFOSC 31/10/2022, наложены чёрными точками. На обоих рисунках: поток в единицах ADU (1), параметры Стокса Q (2) и U (3) в %, степень поляризации P в % (4), угол поляризации ϕ в градусах (5).

В обсерватории Асыяго данные были получены с помощью двойной призмы Волластона в качестве анализатора поляризации, установленной в прибор AFOSC.

Таблица 5 — Исследуемые АЯГ и рассчитанные ожидаемые значения параметров поляризации (Q , U , P и φ) в фильтрах, использованных в наблюдениях, по данным [74]. Важно отметить, что ранее опубликованные данные по объектам Mrk 335 были уточнены после более тщательной обработки.

Объект	Фильтры	Q , %	U , %	P , %	φ , °
Mrk 335	SED675	0.28	-0.16	0.71	160.6
	SED650	0.55	-0.51	0.83	162.2
	680	0.41	-0.14	0.62	167.3
	671	0.12	-0.13	0.82	149.3
	H α	0.40	-0.34	0.60	161.1
Mrk 509	SED675	0.74	-0.63	1.02	159.0
	SED650	0.63	-0.60	0.92	158.8

В течение наблюдательной ночи получались калибровочные данные, детально описанные в Главе 1. Для каждого фильтра делалась серия снимков (не менее 7 кадров в каждом фильтре), время экспозиции выбиралось в зависимости от погодных условий и обычно составляло от 2 до 5 минут. Каждый кадр обрабатывался независимо, а статистическая оценка производилась путём усреднения случайной величины робастными методами, дающими её несмещённую оценку. В таком случае поляриметрические ошибки представляют собой стандартное отклонение робастного распределения.

Наблюдения АЯГ сопровождалась наблюдениями поляризованных и неполяризованных стандартных звёзд. Характеристики приборов и методика наблюдений, а также редукция данных детальнее описана в Главе 1.

4.1.1 Описание метода

В течение двух лет проводились наблюдения галактик Mrk 335 и Mrk 509, наличие экваториального рассеяния у которых было подтверждено ранее спектрополяриметрическими наблюдениями на 6-м БТА САО РАН. Обе галактики наблюдались поляриметрически последовательно в нескольких среднеполосных фильтрах, полосы пропускания которых спектрально ориентированы на излучение широкой линии H α и на континуум рядом с линией. Отметим, что мы

наблюдаем именно широкую линию $H\alpha$, поскольку эффект экваториального рассеяния в ней наиболее выражен. Пример подбора фильтров для наблюдений показан на Рис. 4.1 и 4.5. Наблюдения проводились примерно раз в месяц в зависимости от погодных условий и согласно выделенному телескопному времени для выполнения программ.

Величины эффекта поляризации вследствие экваториального рассеяния при наблюдениях обоих исследуемых АЯГ в среднеполосных фильтрах для широкой линии и континуума мы оценили на основе полученных ранее спектрополяриметрических данных [74]. Поскольку пропускание среднеполосных фильтров измерено в лаборатории, обозначим его как функцию $filter(\nu)$ и свёрнём с распределением параметров поляризации ξ_ν [может быть $Q(\nu)$, $U(\nu)$ в процентах] по частотам исследуемых АЯГ, чтобы определить их ожидаемые значения X (в терминах Q , U , P , φ) в конкретных фильтрах по формуле:

$$X = \frac{\int \xi_\nu \cdot filter(\nu) \cdot d\nu}{\int filter(\nu) \cdot d\nu} \quad (4.1)$$

Анализ полученных оценок приведён в Таблице 5. Интересно отметить, что в случае, когда наблюдения проводятся в подобной конфигурации, когда один из фильтров ориентирован на континуум, а второй — так, что в него целиком попадает поток от широкой эмиссионной линии $H\alpha$, разница нормированных параметров Стокса между континуумом и линией невелика и не превышает $\sim 0.4\%$, что сопоставимо с ошибкой измерения линейной поляризации для АЯГ ($0.1-0.2\%$ в хороших погодных условиях). Разница степени поляризации в двух фильтрах не превышает $\sim 0.1-0.2\%$, а разница угла поляризации составляет не более 20 градусов.

4.2 Анализ полученных данных

Мы проводили поляриметрические наблюдения АЯГ на 1-м и 1.82-м телескопах в 2020-2022 годах. Однако погода и выделенное в рамках расписаний время не позволили нам наблюдать объекты с необходимой каденцией, а общее количество данных на кривых блеска не превосходит 25 эпох.

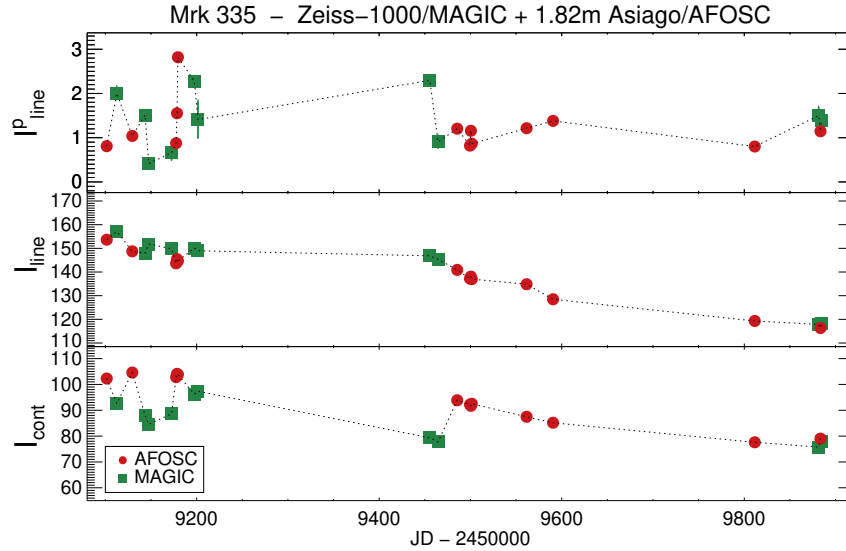


Рисунок 4.2 — Кривые блеска Mrk 335. Сверху вниз: поляризованный поток в широкой линии I_{line}^p , интегральный поток в широкой линии I_{line} с вычтенным континуумом и интегральный континуальный поток I_{cont} . Потоки даны в мЯн. Красные кружки используются для обозначения данных AFOSC, а зелёные квадраты - для данных MAGIC. Для AFOSC поток в широкой линии представляет собой сумму потоков, измеренных в двух фильтрах (671 и 680).

4.2.1 JAVELIN-анализ кривых блеска Mrk 335

Mrk 335 ($z = 0.025$, RA 00 06 19.5 Dec +20 12 10.6 J2000) известная Sy1 галактика с узкими линиями. Признаки экваториального рассеяния в широких линиях впервые наблюдались в спектрополяриметрических данных Mrk 335 в [127]. Сильное переключение угла поляризации вдоль профиля линии $\text{H}\alpha$ было подтверждено в [74]; здесь мы приводим те же данные, полученные на 6-м БТА САО РАН на Рис. 4.1. Как видно, вариации угла поляризации составляют около $\pm 50^\circ$, но изменения степени поляризации относительно континуума незначительны. На Рис. 4.1, слева наложены поляриметрические данные, полученные на Цейсс-1000/MAGIC 01/11/2022; на Рис. 4.1, справа приведены данные поляриметрии, полученные с помощью AFOSC 31/10/2022 в обсерватории Асыяго. Заметим здесь, что во всех случаях обнаруживаются лишь незначительные различия параметров поляризации между континуумом и широкими линиями.

Всего было получено 10 эпох поляриметрических данных Mrk 335 с помощью MAGIC и 13 эпох с помощью AFOSC. К сожалению, из-за разной яркости звёзд поля в фильтрах, используемых в MAGIC и AFOSC, мы не смогли ис-

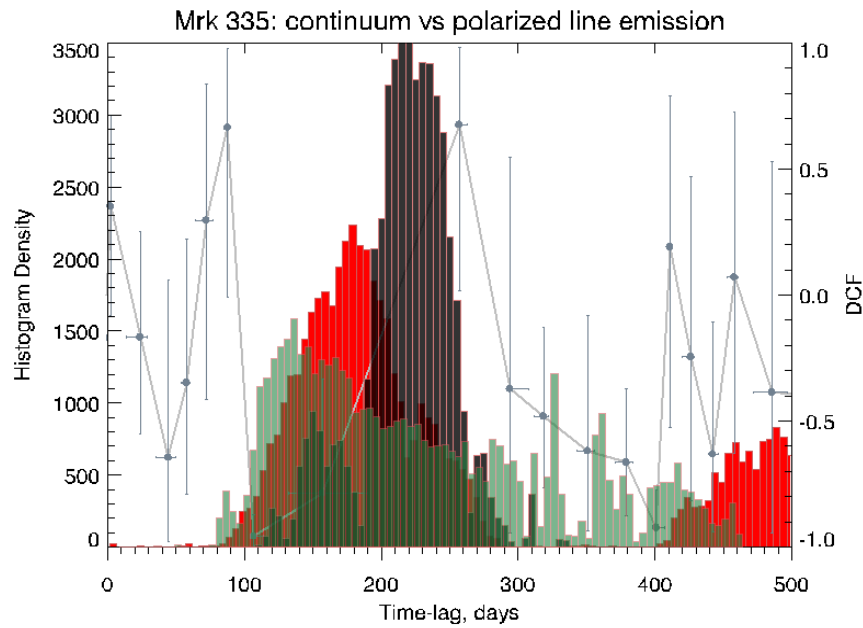


Рисунок 4.3 — Анализ временной задержки переменности поляризованного излучения широкой линии I_{line}^p относительно переменного излучения континуума I_{cont} для Mrk 335. Гистограммы демонстрируют результаты JAVELIN-анализа кривых по данным AFOSC (красная гистограмма), MAGIC (зелёная гистограмма) и объединённых данных, смещённых во времени (чёрная гистограмма). Слева по оси ординат N — частота встречаемости наборов значений параметров при MCMC-сэмплировании. При моделировании использовалось 5000 наборов значений параметров. Серой кривой даны результаты анализа с помощью ZDCF объединённых данных, смещённых во времени (значения даны на y-axis справа).

пользовать одну и ту же локальную звезду поля. При анализе данных MAGIC мы использовали звезду [GKG2008] 5 в качестве опорной на расстоянии $\sim 1'.3$ от источника и звезду TYC 1184-771-1 на расстоянии $\sim 2'.5$ для данных AFOSC. Кривые блеска потоков поляризованной и интегральной широкой линии и в континууме показаны на Рис. 4.2. Для данных AFOSC поток в широкой линии представляет собой сумму потоков, измеренных в двух фильтрах (671 и 680). Во всех случаях потоки даны в мЯн. Можно видеть, что, несмотря на кривые в широкой линии, кривые блеска континуального излучения ведут себя по-разному в наборах данных, полученных с помощью MAGIC и AFOSC. Это способствовало разъединению кривых при дальнейшем анализе во избежание систематических ошибок.

Для поиска временной задержки между кривыми блеска мы проводили анализ, используя два подхода. В качестве основного инструмента анализа мы использовали код JAVELIN [66; 67; 128], широко применяемый в рамках кампаний по эхокартированию АЯГ во всём мире. На Рис. 4.3 приведены результаты JAVELIN-анализа временной задержки поляризованного излучения широкой линии I_{line}^p относительно переменного излучения континуума I_{cont} для данных AFOSC (красная гистограмма) и MAGIC (зелёная гистограмма). Дополнительно мы провели совместный анализ обеих кривых блеска, объединив их так, что одна из кривых блеска сдвинута по времени относительно другой более чем на продолжительность целого периода мониторинга. Результаты анализа этой синтетической кривой показаны на Рис. 4.3 чёрным цветом и несут дополнительную информацию. Аналогичным образом на Рис. 4.4 дан анализ временной задержки неполяризованного излучения широкой линии I_{line} относительно континуума I_{cont} . Также для оценки задержки между кривыми блесками мы использовали код ZDCF [129; 130]. В отличие от обычного кросс-корреляционного метода, ZDCF не предполагает, что кривые блеска являются плавными, а также использует разбиение на равные популяции и Z-преобразование Фишера. Это исправляет ошибки дискретных корреляционных функций и даёт более надёжный метод оценки CCF разреженных кривых блеска. Отдельно для кривых блеска MAGIC и AFOSC кросс-корреляционный анализ с помощью ZDCF не показал результата из-за больших неопределённостей, вызванных малым количеством точек. Результаты оценки задержки между объединёнными синтетическими кривыми дан на Рис. 4.3 и 4.4 серым цветом.

Анализ задержки между I_{line}^p и I_{cont} не показывают однозначного пика для Mrk 335. На Рис. 4.3 видно, что гистограмма оценок временных задержек по данным AFOSC и MAGIC близка, около 180 и 150 дней соответственно, но пик распределений запаздывания имеет погрешность 25-40%. Синтетические данные показывают два пика при 224 ± 24 дня и 157 ± 18 дней, где данные ошибки формально рассчитаны как стандартные отклонения заданных гауссовых пиков. Здесь более крупный пик определённо является артефактом, так как повторяется при анализе фотометрических данных (Рис. 4.4). Второй пик в ~ 4 раза слабее первого, но его положение примерно совпадает с другими оценками. Таким образом, мы видим тенденцию кривых блеска I_{line}^p показывать запаздывание примерно на 150-180 дней. Однако такой временной лаг близок к полугодию, характеризующему типичную продолжительность наблюдатель-

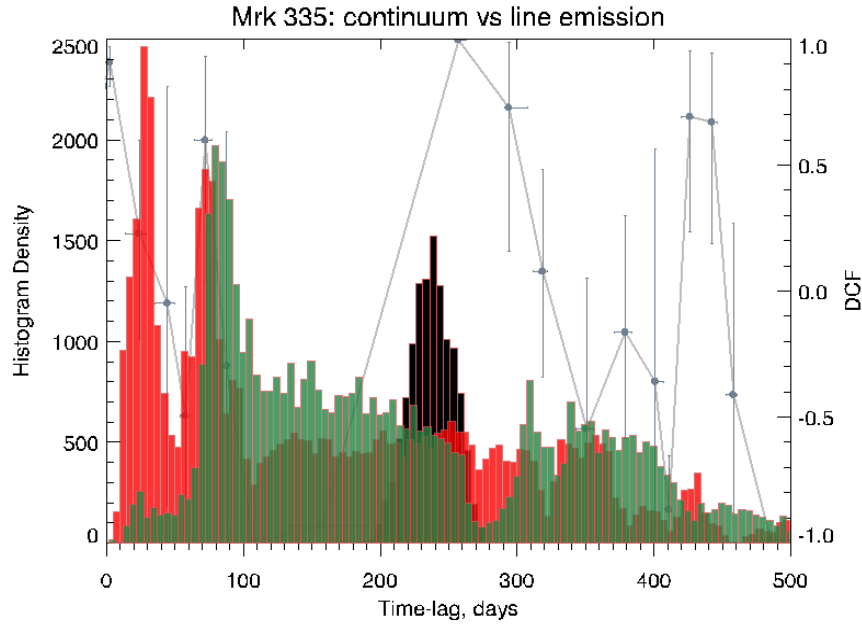


Рисунок 4.4 — Анализ временной задержки переменности излучения широкой линии I_{line} относительно переменного излучения континуума I_{cont} для Mrk 335. Цветные гистограммы и метки аналогичны обозначениям на Рис. 4.3.

ных периодов источника, и меньше промежутков между этими периодами. Это может указывать на то, что измеренное значение является артефактом анализа. Кроме того, мы провели анализ данных временной задержки I_{line} относительно I_{cont} , чтобы оценить R_{BLR} , если это возможно. Гистограммы JAVELIN для данных AFOSC и MAGIC, а также анализ синтетических кривых блеска методом ZDCF указывают на предполагаемую задержку от 73 ± 18 до 87 ± 17 дней. Данные AFOSC отдельно демонстрируют пик на значении 27 ± 17 дней, что близко к частоте наблюдений (около 1 раза в месяц) и может быть артефактом анализа.

4.2.2 JAVELIN-анализ кривых блеска Mrk 509

Как и в случае с Mrk 335, Mrk 509 ($z = 0.035$, RA 20 44 09.8 Dec -10 43 24.7 J2000) наблюдался в спектрополяриметрическом режиме сначала в [127], а затем в [74]. Последние данные использованы на Рис. 4.5. Как видно из рисунка, для наблюдений мы выбрали два среднеполосных (FWHM $\sim 250 \text{ \AA}$) фильтра, ориентированных на широкую линию и континуум вблизи. Наложённые данные поляриметрии были получены с Цейсс-1000/MAGIC 29/08/2021. Как и в

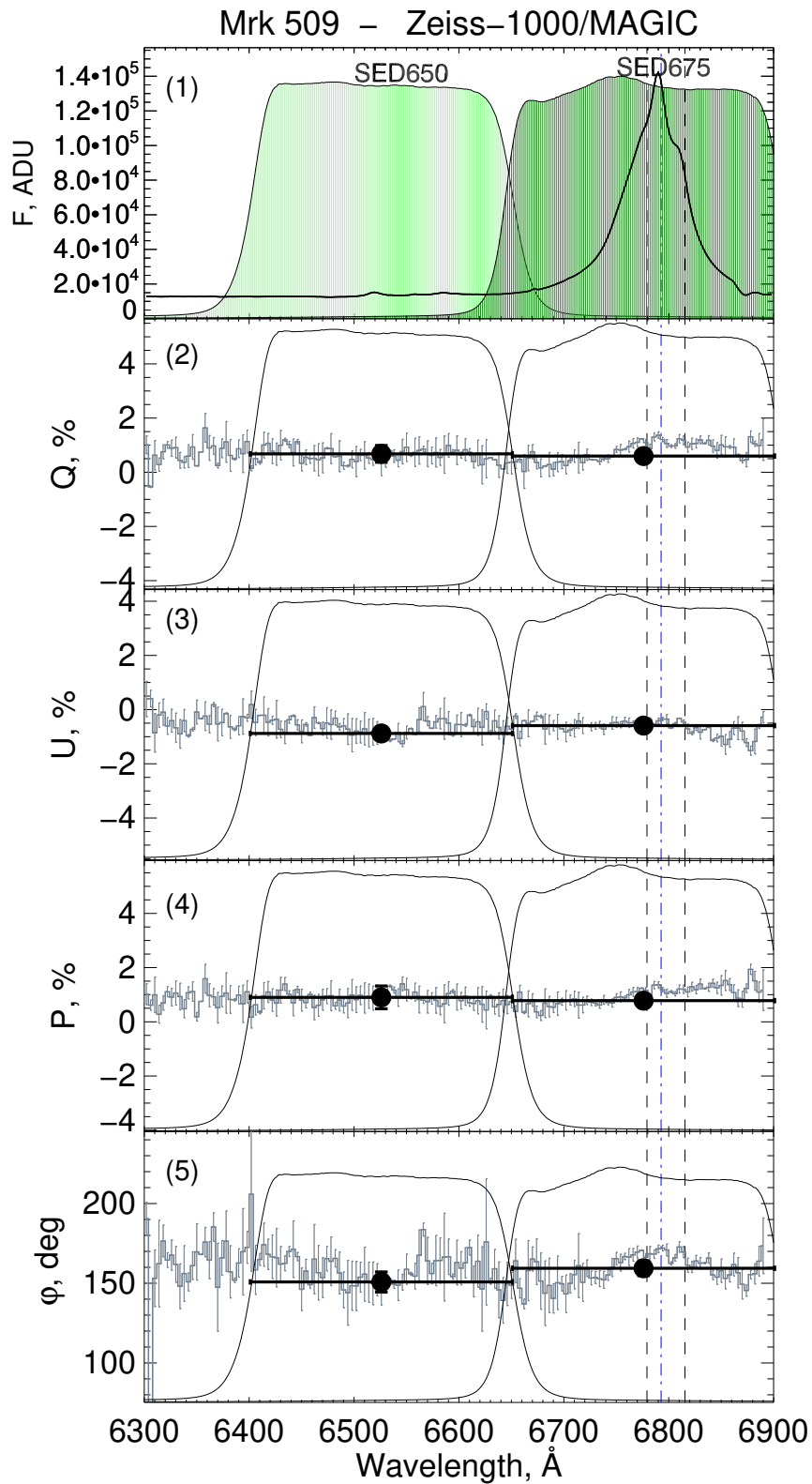


Рисунок 4.5 — Кривые пропускания SED-фильтров на спектрополяризметрических БТА данных (опубликованы в [74])

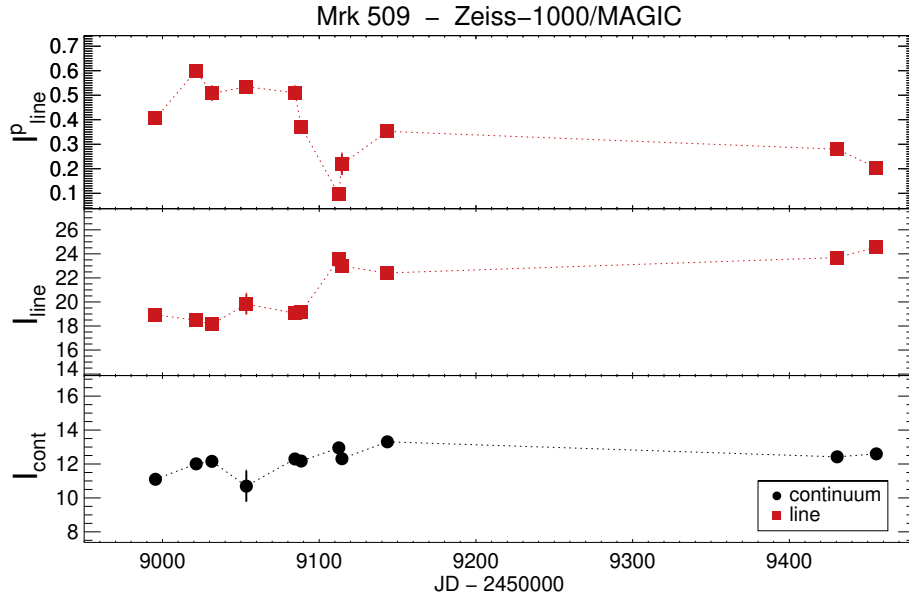


Рисунок 4.6 — Кривые блеска Mrk 509, полученные с помощью MAGIC. Сверху вниз: поляризованный поток в широкой линии I_{line}^p и интегральный поток в широкой линии I_{line} с вычтенным континуумом и интегральный поток в континууме I_{cont} . Потоки представлены в единицах мЯн.

случае с Mrk 335, у Mrk 509 наблюдается лишь небольшая разница в параметрах поляризации между континуумом и широкими полосами, более заметная в вариациях угла поляризации.

Поскольку объект можно наблюдать всего четыре месяца в году, в 2020-2021 годах мы набрали всего 11 эпох с помощью Zeiss-1000/MAGIC. При анализе данных в качестве опорной использовалась звезда TYC 5760-1396-1, находящаяся поблизости на расстоянии $\sim 1'.5$ от источника. Кривые блеска показаны на Рис. 4.6. Для всех измеренных потоков I_{line}^p , I_{line} и I_{cont} наблюдается переменность, а паттерн переменности I_{line}^p отличается от других кривых блеска. Также на кривых виден большой разрыв между эпохами наблюдений, связанный с невозможностью наблюдать объект равномерно в течение года.

Для оценки временной задержки в широкой поляризованной линии к полученным данным применялся код JAVELIN. Оказалось, что, несмотря на малое количество эпох, анализ выявил однозначный пик на $114_{-8.8}^{+12.7}$ св. дней (Рис. 4.7). Мы также применили анализ JAVELIN к данным, полученным только в 2020 году, исключая эпохи 2021 года, и получили такую же временную задержку. Это измерение соответствует размеру газопылевой области ~ 0.1 пк. Стоит обратить внимание, что анализ ZDCF не показал значительной корреляции. Кроме того, мы провели анализ данных за 2020 год на предмет обнаружения временной за-

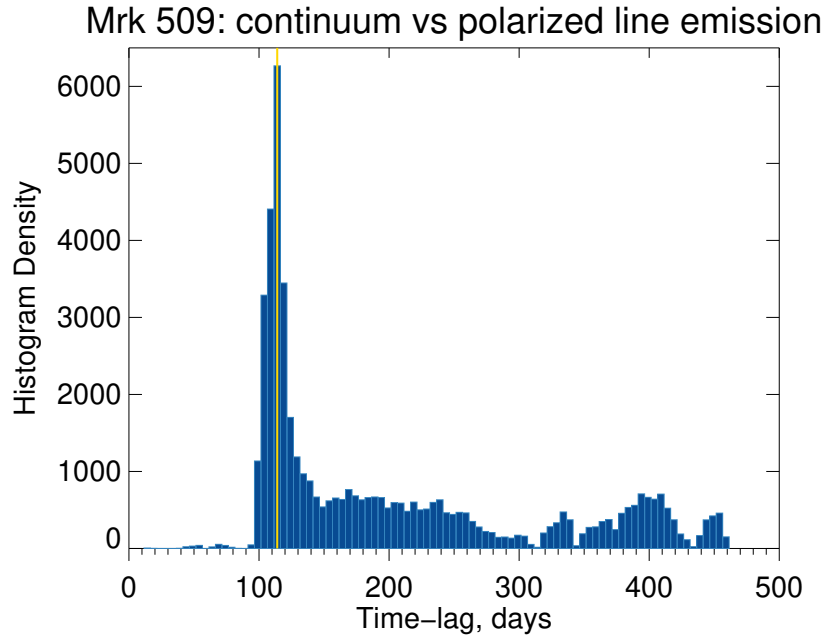


Рисунок 4.7 — Анализ временной задержки излучения в широкой поляризованной линии I_{line}^p относительно переменного континуального потока I_{cont} для Mrk 509. Гистограмма показывает результаты анализа JAVELIN на основе данных MAGIC. По оси y показана частота встречаемости наборов значений параметров при MCMC-сэмплировании. При моделировании использовалось 10000 наборов значений параметров. Оценка задержки, равная $114_{-8.8}^{+12.7}$ дней, показана жёлтой вертикальной линией.

держки I_{line} относительно I_{cont} , чтобы измерить R_{BLR} , как и в случае анализа данных Mrk 335. Гистограмма JAVELIN показана на Рис. 4.8 и демонстрирует два чётких пика на 39 ± 5 дней и на 85 ± 11 дней (что составляет примерно 39 ± 5 дней $\times 2$). Учитывая, что медианная частота наблюдений в 2020 г. составляет ~ 16 дней, мы не можем однозначно сделать вывод о происхождении двугорбого распределения.

4.3 Обсуждение полученных результатов

С 2020 г. из-за отсутствия удовлетворяющей нашим требованиям стабильной погоды в двух задействованных в проекте обсерваториях (САО РАН и Асыяго) мы не достигли желаемой каденции при наблюдении исследуемых объектов, а общее количество полученных эпох достигло 23 только для Mrk 335.

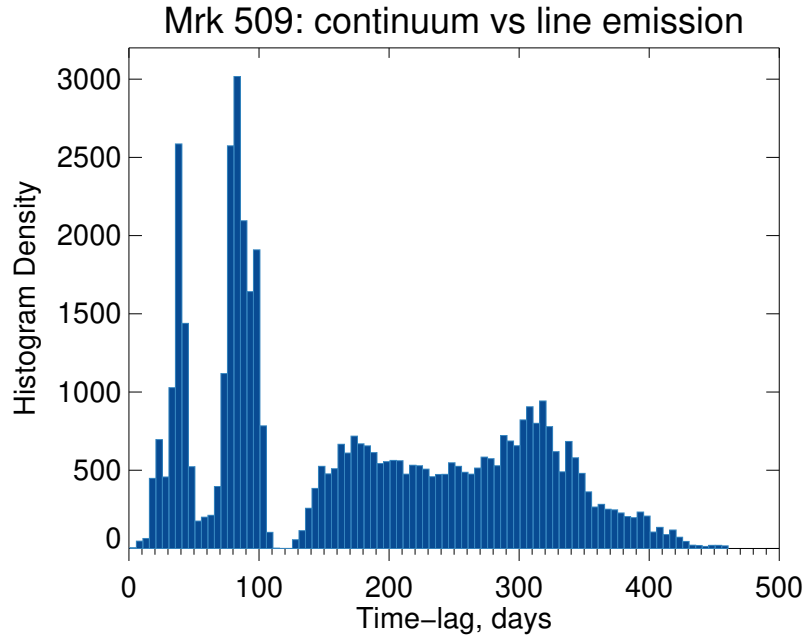


Рисунок 4.8 — Анализ временной задержки излучения широкой линии I_{line} по отношению к переменному континуальному потоку I_{cont} для Mrk 509. Гистограмма показывает результаты анализа JAVELIN на основе данных MAGIC. По оси y показана частота встречаемости наборов значений параметров при МСМС-сэмплировании. При моделировании использовалось 10000 наборов значений параметров.

Несмотря на это, нам удалось получить некоторые результаты для исследуемых объектов Mrk 335 и Mrk 509, представленные в данной Главе. Поскольку эти АЯГ подробно изучаются в различных многоволновых кампаниях, здесь мы обсуждаем полученные результаты в сравнении с измерениями, приведёнными в литературе, чтобы выяснить, надёжны ли предоставленные оценки.

Mrk 335 интенсивно изучался в ходе многочисленных кампаний по эхокартированию. Размер R_{BLR} был измерен: $16.4^{+5.2}_{-3.2}$ [131; 132], $17.3^{+4.9}_{-4.3}$ [133], $15.7^{+3.4}_{-4.0}$ [71], 14.3 ± 0.7 [134; 135], $10.6^{+1.7}_{-2.9}$ [95], $17.0^{+2.5}_{-3.2}$ св. дней [136] в широкой линии H β и $20.5^{+2.0}_{-2.8}$ св. дней [37] в широкой линии H α . Приведённые оценки размера BLR в ~ 10 раз превышают размер аккреционного диска в ~ 1 св. день [137]. Согласно масштабному соотношению из [74], $R_{\text{sc}} \simeq 5.1 R_{\text{BLR}}$, поэтому R_{sc} для Mrk 335 можно оценить как ~ 70 св. дней. ИК-эхокартирование в диапазоне K дало $R_{\text{IR}} \approx 166$ св. дней [138], что в два раза превышает значение, полученное с использованием масштабного соотношения. Лю и соавт. [112] определили размер пылевой области в $WISE$ $W1$ полосе $R_{W1} \approx 1300$ св. дней. По соотношению размеров пылевых областей в разных полосах $R_K : R_{W1} = 0.6 : 1$, $R_{W1} : R_K = 0.6 : 1$, приведённому

в той же статье, $R_K \approx 770$ св. дней, что намного больше, чем другие оценки, и не выглядит надёжной оценкой. Таким образом, значение временной задержки поляризованной эмиссионной линии ожидается в диапазоне $\sim 70 - 170$ дней. Результатом мониторинга в поляризованном свете в данном исследовании стало обнаружение задержки 150-180 дней, что хорошо согласуется с ожидаемым размером пылевой области для Mrk 335. Однако, мы предпочитаем дистанцироваться от однозначной констатации такого результата, в первую очередь потому, что такая оценка может быть вызвана артефактом анализа, поскольку она близка к значению в полгода. Причём, эта оценка длиннее продолжительности периодов наблюдения данного АЯГ, но меньше промежутков между ними. Кроме того, JAVELIN-анализ предоставил широкие пики с большой погрешностью 25-40%, что не добавляет убедительности. Более того, результаты анализа соответствующих фотометрических данных не соотносятся с уже известными оценками R_{BLR} для Mrk 335. Эти факты дают основания для сомнения в убедительности полученного результата.

Галактика Sy1 Mrk 509 также изучалась в нескольких кампаниях, охватывающих весь электромагнитный спектр [см., например, обзор 139]. Размер R_{BLR} был измерен как $76.7^{+6.3}_{-6.0}$ [131; 132] и $79.6^{+6.1}_{-5.4}$ св. дней [71] в широкой линии H β . По нашим оценкам, основанным на максимальном значении двухпиковой гистограммы на Рис. 4.8 $R_{\text{BLR}} = 85 \pm 11$ св. дней, что совпадает с измерениями, опубликованными в литературе. Однако мы всё ещё не можем объяснить наличие второго пика при анализе, соответствующего вдвое меньшей задержке. Измерения R_{BLR} предсказывают очень протяжённую BLR-область, которая намного больше (в ~ 40 раз), чем размер аккреционного диска в ~ 2 св. дня [140; 141], с одной стороны, и всего в ~ 2 раза меньше, чем результат ИК-эхокартирования в K-полосе $R_{\text{IR RM}} \approx 131$ св. дней [138]. Участники коллаборации GRAVITY [142] разрешили структуру горячего газа в Mrk 509 с помощью интерферометрии в ближнем ИК-диапазоне на VLTI и измерили размер пылевой области $R_{\text{IR IF}} \approx 296 \pm 30$ св. дней. Используя приведённые измерения R_{BLR} и масштабное соотношение из [74], ожидаемое значение $R_{\text{sc}} \approx 408$ св. дней. Поскольку соотношение $R_{\text{IR IF}} > R_{\text{IR RM}}$ предсказывалось ранее [см. 36, и ссылки внутри], ожидается также, что R_{sc} должен быть меньше пылевых структур в АЯГ. В ходе описанного мониторинга мы измерили $R_{\text{sc}} \approx 114^{+12.7}_{-8.8}$ св. дней, или ~ 0.1 пк. Сравнение с интерферометрическими данными в ближнем ИК касательно тора [142] показывает, что область экваториального рассеяния вдвое меньше ра-

диуса пылевой структуры в ИК-диапазоне, что аналогично полученному ранее результату для Mrk 6 в [36]. Однако наше измерение R_{sc} , хотя и согласуется с измерениями размера пылевой области, полученными двумя независимыми методами, составляет всего $\sim 1.3-1.6R_{BLR}$. В целом, все остальные оценки размеров структур внутри центрального парсека Mrk 509, полученные независимо, указывают на то, что оценка R_{BLR} , вероятно, несколько завышена, например, вследствие наличия наблюдаемых у Mrk 509 истечений, связанных с активностью [например, 143].

4.4 Выводы и результаты Главы 4

В данной Главе мы описали адаптацию на малых телескопах нового метода измерения расстояния до области экваториального рассеяния в АЯГ 1-го типа, предложенного в работе [36], посредством расширения ранее адаптированного метода фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах.

Также в Главе представлены первые результаты поляриметрического эхокартирования в поляризованных широких линиях, проведённых на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН и на 1.82-м телескопе Коперника обсерватории Асьяго. С 2020 мы получили первые результаты для двух активных галактик 1-го типа с экваториальным рассеянием, а именно Mrk 335 и Mrk 509.

- Для Mrk 335 измеренный размер пылевой области $R_{sc} \sim 150-180$ св. дней. Этот результат совпадает со значениями, предсказанными в отношении нескольких оценок пылевой структуры в ИК-диапазоне и измерений R_{BLR} с помощью кампаний оптического эхокартирования.
- Для Mrk 509 измерен $R_{sc} \approx 114_{-8.8}^{+12.7}$ св. дней или ~ 0.1 пк. Это в 2 раза меньше радиуса пылевой структуры в ИК-диапазоне.

Заключение

Несмотря на то, что в настоящее время структура и механизм энерговыделения в АЯГ считаются в общих чертах понятными, поиск ответов на вопросы, связанные с более тонкими особенностями строения активных ядер, не теряют актуальности. В рамках данной работы были проведены исследования АЯГ 1-го типа с помощью различных оптических методов. Комбинация фотометрических, поляриметрических, спектральных и спектрополяриметрических наблюдательных техник позволяет существенно детализировать структуру и строение ядер и получить принципиально новую информацию о них. Результаты, полученные в ходе исследования, позволяют сделать следующие выводы.

- Адаптирована методика фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах. С её помощью в ходе многолетнего мониторинга для активных галактик LEDA 3095839 и VII Zw 244 впервые измерены размеры BLR-областей $R_{\text{BLR}} = 54.8_{-9.4}^{+8.4}$ св. дня и $R_{\text{BLR}} = 30.7_{-2.3}^{+2.1}$ св. дня соответственно.
- Для активной галактики LEDA 3095839 по спектральным данным оценены скорость газа в BLR $V_{H\alpha} = 1.5 \cdot 10^3$ км/с, светимость $\lambda L_{5100} = 0.87 \cdot 10^{44}$ эрг/с, напряжённость магнитного поля на горизонте событий $\log(B_{\text{H}}[G]) = 4.06_{-0.24}^{+0.24}$ и $\log(B_{\text{H}}[G]) = 4.00_{-0.34}^{+0.56}$ при углах наклона системы $i = 35^\circ$ и $i = 45^\circ$. На основе данных поляриметрии и эхокартирования даны оценки массы СМЧД $\log(M_{\text{СМЧД}}/M_{\odot}) = 7.9 \pm 0.2$, спина СМЧД $a = 0.966_{-0.106}^{+0.030}$, напряжённости магнитного поля на горизонте событий $\log(B_{\text{H}}^*[G]) = 3.53_{-0.53}^{+0.26}$, а также степени зависимости магнитного поля от радиуса $s = 1.77 \pm 0.18$ для угла наклона $i = 35^\circ$. Для наклона системы $i = 45^\circ$ $\log(M_{\text{СМЧД}}/M_{\odot}) = 7.699_{-0.171}^{+0.153}$, спин $a = 0.736_{-0.368}^{+0.226}$, $\log(B_{\text{H}}^*[G]) = 4.08_{-1.08}^{+0.30}$, $s = 1.63 \pm 0.23$.
- Для активной галактики VII Zw 244 по спектральным данным оценены скорость газа в BLR $V_{H\beta} = 1.4 \cdot 10^3$ км/с, светимость $\lambda L_{5100} = 1.67 \cdot 10^{44}$ эрг/с. В поляризованных спектрах обнаружены признаки экваториального рассеяния и измерена масса СМЧД $\log(M_{\text{СМЧД}}/M_{\odot}) = 8.3 \pm 0.3$ и спин СМЧД $a = 0.966_{-0.012}^{+0.002}$, напряжённость магнитного поля на горизонте событий $\log(B_{\text{H}}[G]) = 4.29_{-0.13}^{+0.10}$. В комбинации с методом эхокартирования измерен угол наклона системы $i = (14.3 \pm 3.6)^\circ$.

- Адаптирован метод поляриметрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН с фокальным редуктором MAGIC. Для активных галактик Mrk 335 и Mrk 509 определены расстояния до области экваториального рассеяния $R_{sc} \sim 150-180$ св. дней и $R_{sc} \approx 114_{-8.8}^{+12.7}$ св. дня соответственно.

Благодарности

Автор благодарит и с глубоким уважением вспоминает первого научного руководителя своей работы – **Афанасьева В.Л.** Он непрерывно разжигал и поддерживал интерес к исследованиям, был идейным вдохновителем, способствовал развитию экспериментальной эрудиции. Значительная часть наблюдательных данных, лежащих в основе диссертации, была получена с помощью созданной им аппаратуры для 1-м и 6-м телескопов.

Автор выражает благодарность **Моисееву А.В.**, под руководством которого данная диссертация была завершена, за внимательные замечания, расширение научного кругозора и поддержку созданных им приборов. Существенный вклад в проведённые наблюдения внесли инженеры САО, в частности **Перепелицын А.Е.** и **Комаров В.В.** Также автор благодарен **Фатхуллину Т.А.** и **Емельянову Э.В.** за предоставление разработанной ими аппаратуры для наблюдений на 1-м телескопе.

Автор благодарит всех причастных к данной работе коллег лаборатории СФВО: от молодых сотрудников, делящихся опытом наблюдений, до инженеров, делящихся опытом работы с приборами; включая всех коллег, технически поддерживающих аппаратуру, разработанную в лаборатории, с помощью которой проводились наблюдения для данной диссертации. Также сотрудников лаборатории ПР **Афанасьеву И.В.** и **Мурзина В.А.** за расширение знаний об устройстве ПЗС. Автор признателен коллегам из ГАО РАН **Пиотровичу М.Ю.**, **Булиге С.Д.** и **Нацвлишвили Т.М.** за крайне продуктивное взаимодействие в совместных научных исследованиях.

Наконец, особую благодарность автор выражает **Шабловинской Е.С.** и **Уклеину Р.И.** за совместную плодотворную работу, без которой данная диссертация не была бы возможной.

Список литературы

1. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion / K. Gebhardt [и др.] // *ApJL*. — 2000. — Август. — 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. — Август. — 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. Т. 586 / под ред. J. C. Wheeler, H. Martel. — 10.2001. — С. 363—381. — (American Institute of Physics Conference Series). — arXiv: [astro-ph/0105230](https://arxiv.org/abs/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](https://arxiv.org/abs/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](https://arxiv.org/abs/1211.2816) [[astro-ph.CO](#)].
6. *Kormendy, J.* Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies / J. Kormendy, L. C. Ho // *ARA&A*. — 2013. — Август. — Т. 51, № 1. — С. 511—653. — arXiv: [1304.7762](https://arxiv.org/abs/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 // *ARA&A*. — 2014. — Август. — Т. 52. — С. 589—660. — arXiv: [1403.4620](https://arxiv.org/abs/1403.4620) [[astro-ph.GA](#)].
8. *Daly, R. A.* Estimates of black hole spin properties of 55 sources / R. A. Daly // *MNRAS*. — 2011. — Июнь. — Т. 414, № 2. — С. 1253—1262. — arXiv: [1103.0940](https://arxiv.org/abs/1103.0940) [[astro-ph.CO](#)].
9. *Cherepashchuk, A. M.* Black holes in binary stellar systems and galactic nuclei / A. M. Cherepashchuk // *Physics Uspekhi*. — 2014. — Апрель. — 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 *ARA&A*. — 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](https://arxiv.org/abs/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 \[astro-ph.CO\]](#).
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 \[astro-ph.GA\]](#).
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 \[astro-ph.GA\]](#).
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. — Нояб. — Т. 940, № 1. — С. 28. — arXiv: [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 \[astro-ph.GA\]](#).
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 / C. Y. Kuo [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](https://arxiv.org/abs/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](https://arxiv.org/abs/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. — A73. — arXiv: [1109.1848](https://arxiv.org/abs/1109.1848) [[astro-ph.CO](#)].
38. *Moiseev, A.* Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes / A. Moiseev, A. Perepelitsyn, D. Oparin // *Experimental Astronomy*. — 2020. — Сент. — Т. 50, № 2/3. — С. 199—214. — arXiv: [2005.14598](https://arxiv.org/abs/2005.14598) [[astro-ph.IM](#)].
39. *Emelianov, E. V.* "ММРР — multi-mode photometer-polarimeter. Оптическая схема и система управления прибором" / E. V. Emelianov, Т. А. Fatkhullin. IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (Нижний Архыз, Россия, 24-27 сентября 2019), 223-228.
40. Stokes-polarimeter for 1-meter telescope / V. Afanasiev [и др.] // arXiv e-prints. — 2021. — Янв. — arXiv:2101.05945. — arXiv: [2101.05945](https://arxiv.org/abs/2101.05945) [[astro-ph.IM](#)].
41. *Afanasiev, V. L.* Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects / V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev // *Baltic Astronomy*. — 2011. — Авг. — Т. 20. — С. 363—370. — arXiv: [1106.2020](https://arxiv.org/abs/1106.2020) [[astro-ph.IM](#)].

42. *Afanasieva, I. V.* Study of distortions in statistics of counts in CCD observations using the fano factor / I. V. Afanasieva // *Astrophysical Bulletin*. — 2016. — ИЮЛЬ. — Т. 71, № 3. — С. 366—370. — arXiv: [1608.06177](https://arxiv.org/abs/1608.06177) [[astro-ph.IM](#)].
43. *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing* / W. H. Press [и др.]. — 3-е изд. — USA : Cambridge University Press, 2007.
44. *Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation* / V. V. Komarov [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2020. — ОКТ. — Т. 75, № 4. — С. 486—500.
45. *Maksutov, D. D.* *Astronomical Optics* / D. D. Maksutov. — Moscow : Gostehizdat, 1946.
46. *Danjon, A.* *Lunettes et telescopes - Theorie, conditions d'emploi, description, réglage* / A. Danjon, A. Couder. — 1935.
47. *Terebizh, V. Y.* Optimal Baffle Design in a Cassegrain Telescope / V. Y. Terebizh // *Experimental Astronomy*. — 2001. — ОКТ. — Т. 11, № 3. — С. 171—191.
48. *Stokes, G. G.* On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources / G. G. Stokes // *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. — 1851. — ЯНВ. — Т. 9. — С. 399.
49. *Nikulin, N. S.* On the Circular Polarization of Some Peculiar Objects / N. S. Nikulin V. M. Kuvshinov, A. B. Severny // *ApJL*. — 1971. — Дек. — Т. 170. — С. L53.
50. *Landstreet, J. D.* Search for Optical Circular Polarization in Quasars and Seyfert Nuclei / J. D. Landstreet, J. R. P. Angel // *ApJL*. — 1972. — ИЮНЬ. — Т. 174. — С. L127.
51. Optical circular polarization in quasars / D. Hutsemékers [и др.] // *A&A*. — 2010. — СЕНТ. — Т. 520. — С. L7. — arXiv: [1009.4049](https://arxiv.org/abs/1009.4049) [[astro-ph.CO](#)].
52. *Marin, F.* Modeling optical and UV polarization of AGNs. III. From uniform-density to clumpy regions / F. Marin, R. W. Goosmann, C. M. Gaskell // *A&A*. — 2015. — Май. — Т. 577. — A66. — arXiv: [1503.05311](https://arxiv.org/abs/1503.05311) [[astro-ph.HE](#)].
53. *Pernechele, C.* Device for optical linear polarization measurements with a single exposure / C. Pernechele, E. Giro, D. Fantinel // *Polarimetry in Astronomy*. Т. 4843 / под ред. S. Fineschi. — 02.2003. — С. 156—163. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).

54. A novel quadruple beam imaging polarimeter and its application to Comet Tanaka-Machholz 1992 X / E. H. Geyer [и др.] // *Ap&SS*. — 1996. — Сент. — Т. 239, № 2. — С. 259—274.
55. *Afanasiev, V. L.* Technique of polarimetric observations of faint objects at the 6-m BTA telescope / V. L. Afanasiev, V. R. Amirkhanyan // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — Окт. — Т. 67, № 4. — С. 438—452. — arXiv: [1510.05269 \[astro-ph.IM\]](#).
56. *Simmons, J. F. L.* Point and interval estimation of the true unbiased degree of linear polarization in the presence of low signal-to-noise ratios / J. F. L. Simmons, B. G. Stewart // *A&A*. — 1985. — Янв. — Т. 142, № 1. — С. 100—106.
57. *Shablovinskaya, E. S.* The intraday variations of the polarization vector direction in radio source S5 0716+714 / E. S. Shablovinskaya, V. L. Afanasiev // *MNRAS*. — 2019. — Февр. — Т. 482, № 4. — С. 4322—4328. — arXiv: [1810.07594 \[astro-ph.GA\]](#).
58. Universal focal reducer for small telescopes / V. L. Afanasiev [и др.] // *Astronomische Nachrichten*. — 2022. — Янв. — Т. 343, № 1/2. — e210104. — arXiv: [2112.02486 \[astro-ph.IM\]](#).
59. *Afanasiev, V. L.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope / V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev // *Astronomy Letters*. — 2005. — Март. — Т. 31, № 3. — С. 194—204. — arXiv: [astro-ph/0502095 \[astro-ph\]](#).
60. SCORPIO-2 guiding and calibration system in the prime focus of the 6-m telescope / V. L. Afanasiev [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Окт. — Т. 72, № 4. — С. 458—468. — arXiv: [1711.03569 \[astro-ph.IM\]](#).
61. Reverberation Measurements for 17 Quasars and the Size-Mass-Luminosity Relations in Active Galactic Nuclei / S. Kaspi [и др.] // *ApJ*. — 2000. — Апр. — Т. 533, № 2. — С. 631—649. — arXiv: [astro-ph/9911476 \[astro-ph\]](#).
62. Medium-band photometric reverberation mapping of AGNs at $0.1 < z < 0.8$. Techniques and sample / E. Malygin [и др.] // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. — 2020. — Янв. — Т. 50, № 1. — С. 328—340. — arXiv: [1911.10984 \[astro-ph.IM\]](#).
63. *Boroson, T. A.* The Emission-Line Properties of Low-Redshift Quasi-stellar Objects / T. A. Boroson, R. F. Green // *ApJS*. — 1992. — Май. — Т. 80. — С. 109.

64. An AGN sample with high X-ray-to-optical flux ratio from RASS. I. The optical identification / J. Y. Wei [и др.] // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1999. — Ноябрь. — Т. 139. — С. 575–599.
65. Photometric Reverberation Mapping of AGNs at $0.1 < z < 0.8$. I. Observational Technique / R. I. Uklein [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2019. — Дек. — Т. 74, № 4. — С. 388–395. — arXiv: [1911.04073](https://arxiv.org/abs/1911.04073) [[astro-ph.GA](#)].
66. Application of Stochastic Modeling to Analysis of Photometric Reverberation Mapping Data / Y. Zu [и др.] // *ApJ*. — 2016. — Март. — Т. 819. — С. 122. — arXiv: [1310.6774](https://arxiv.org/abs/1310.6774).
67. On reverberation mapping lag uncertainties / Z. Yu [и др.] // *MNRAS*. — 2020. — Февр. — Т. 491, № 4. — С. 6045–6064. — arXiv: [1909.03072](https://arxiv.org/abs/1909.03072) [[astro-ph.GA](#)].
68. *Xu, Y.* Evidence of the Link between Broad Emission Line Regions and Accretion Disks in Active Galactic Nuclei / Y. Xu, X.-W. Cao // *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Февр. — Т. 7, № 1. — С. 63–70.
69. *Tilton, E. M.* Ultraviolet Emission-line Correlations in HST/COS Spectra of Active Galactic Nuclei: Single-epoch Black Hole Masses / E. M. Tilton, J. M. Shull // *ApJ*. — 2013. — Сент. — Т. 774, № 1. — С. 67. — arXiv: [1307.6560](https://arxiv.org/abs/1307.6560) [[astro-ph.CO](#)].
70. Reverberation Measurements for 17 Quasars and the Size-Mass-Luminosity Relations in Active Galactic Nuclei / S. Kaspi [и др.] // *ApJ*. — 2000. — Апр. — Т. 533, № 2. — С. 631–649. — arXiv: [astro-ph/9911476](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911476) [[astro-ph](#)].
71. The Radius-Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei: The Effect of Host-Galaxy Starlight on Luminosity Measurements. II. The Full Sample of Reverberation-Mapped AGNs / M. C. Bentz [и др.] // *ApJ*. — 2009. — Май. — Т. 697, № 1. — С. 160–181. — arXiv: [0812.2283](https://arxiv.org/abs/0812.2283) [[astro-ph](#)].
72. Calibration of the virial factor f in supermassive black hole masses of reverberation-mapped AGNs / L.-M. Yu [и др.] // *MNRAS*. — 2019. — Сент. — Т. 488, № 2. — С. 1519–1534. — arXiv: [1907.00315](https://arxiv.org/abs/1907.00315) [[astro-ph.GA](#)].
73. *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](https://arxiv.org/abs/1501.07730) [[astro-ph.GA](#)].

74. *Afanasiev, V. L.* Spectropolarimetry of Seyfert 1 galaxies with equatorial scattering: black hole masses and broad-line region characteristics / V. L. Afanasiev, L. Č. Popović, A. I. Shapovalova // MNRAS. — 2019. — Февр. — Т. 482, № 4. — С. 4985—4999. — arXiv: [1810.12164](#) [[astro-ph.GA](#)].
75. *Savić, Đ. V.* The First Supermassive Black Hole Mass Measurement in Active Galactic Nuclei Using the Polarization of Broad Emission Line Mg II / Đ. V. Savić, L. Č. Popović, E. Shablovinskaya // ApJL. — 2021. — Ноябрь. — Т. 921, № 1. — С. L21. — arXiv: [2109.12154](#) [[astro-ph.GA](#)].
76. *Blandford, R. D.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes / R. D. Blandford, R. L. Znajek // MNRAS. — 1977. — Май. — Т. 179. — С. 433—456.
77. *Blandford, R. D.* Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets / R. D. Blandford, D. G. Payne // MNRAS. — 1982. — ИЮНЬ. — Т. 199. — С. 883—903.
78. *Garofalo, D.* The evolution of radio-loud active galactic nuclei as a function of black hole spin / D. Garofalo, D. A. Evans, R. M. Sambruna // MNRAS. — 2010. — АВГ. — Т. 406. — С. 975—986. — arXiv: [1004.1166](#).
79. *Piotrovich, M.* Determination of the Magnetic Field Strength and Geometry in the Accretion Disks of AGNs by Optical Spectropolarimetry / M. Piotrovich, S. Buliga, T. Natsvlishvili // Universe. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 7, № 6. — С. 202.
80. Magnetic fields of AGNs and standard accretion disk model: testing by optical polarimetry / N. A. Silant'ev [и др.] // A&A. — 2009. — Ноябрь. — Т. 507. — С. 171—182. — arXiv: [0909.1207](#).
81. Astronomical Camera Based on a CCD261-84 Detector with Increased Sensitivity in the Near-Infrared / I. Afanasieva [и др.] // Photonics for Solar Energy Systems IX. — 2023. — ИЮЛЬ. — Т. 10, № 7. — С. 774. — arXiv: [2307.02190](#) [[astro-ph.IM](#)].
82. *Bardeen, J. M.* Rotating Black Holes: Locally Nonrotating Frames, Energy Extraction, and Scalar Synchrotron Radiation / J. M. Bardeen, W. H. Press, S. A. Teukolsky // ApJ. — 1972. — Дек. — Т. 178. — С. 347—370.

83. *Novikov, I. D.* Astrophysics of black holes. / I. D. Novikov, K. S. Thorne // Black Holes (Les Astres Occlus) / под ред. С. Dewitt, В. S. Dewitt. — New York : Gordon, Breach, 1973. — С. 343—450.
84. *Krolik, J. H.* Making black holes visible: accretion, radiation, and jets / J. H. Krolik // 2007 STScI Spring Symposium on Black Holes. — 09.2007. — С. 309—321. — arXiv: [0709.1489 \[astro-ph\]](#).
85. *Krolik, J. H.* The Relationship between Accretion Disks and Jets / J. H. Krolik, J. F. Hawley, S. Hirose // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 27. Т. 27. — 03.2007. — С. 1—7. — (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series).
86. *Thorne, K. S.* Disk-Accretion onto a Black Hole. II. Evolution of the Hole / K. S. Thorne // ApJ. — 1974. — Июль. — Т. 191. — С. 507—520.
87. Spectral Energy Distributions and Multiwavelength Selection of Type 1 Quasars / G. T. Richards [и др.] // ApJS. — 2006. — Окт. — Т. 166. — С. 470—497. — eprint: [astro-ph/0601558](#).
88. *Hopkins, P. F.* An Observational Determination of the Bolometric Quasar Luminosity Function / P. F. Hopkins, G. T. Richards, L. Hernquist // ApJ. — 2007. — Янв. — Т. 654, № 2. — С. 731—753. — arXiv: [astro-ph/0605678 \[astro-ph\]](#).
89. Modelling accretion disc emission with generalized temperature profile and its effect on AGN spectral energy distribution / H. Cheng [и др.] // MNRAS. — 2019. — Авг. — Т. 487, № 3. — С. 3884—3903. — arXiv: [1906.00157 \[astro-ph.HE\]](#).
90. *Netzer, H.* Bolometric correction factors for active galactic nuclei / H. Netzer // MNRAS. — 2019. — Окт. — Т. 488, № 4. — С. 5185—5191. — arXiv: [1907.09534 \[astro-ph.GA\]](#).
91. Universal bolometric corrections for active galactic nuclei over seven luminosity decades / F. Duras [и др.] // A&A. — 2020. — Апр. — Т. 636. — A73. — arXiv: [2001.09984 \[astro-ph.GA\]](#).
92. UNCOVER: A NIRSpect Census of Lensed Galaxies at $z=8.50-13.08$ Probing a High AGN Fraction and Ionized Bubbles in the Shadow / S. Fujimoto [и др.] // arXiv e-prints. — 2023. — Авг. — arXiv:2308.11609. — arXiv: [2308.11609 \[astro-ph.GA\]](#).

93. *Davis, S. W.* The Radiative Efficiency of Accretion Flows in Individual Active Galactic Nuclei / S. W. Davis, A. Laor // *ApJ*. — 2011. — Февр. — Т. 728. — С. 98. — arXiv: [1012.3213](#).
94. Can we measure the accretion efficiency of active galactic nuclei? / S. I. Raimundo [и др.] // *MNRAS*. — 2012. — ЯНВ. — Т. 419. — С. 2529—2544. — arXiv: [1109.6225](#).
95. Supermassive Black Holes with High Accretion Rates in Active Galactic Nuclei. I. First Results from a New Reverberation Mapping Campaign / P. Du [и др.] // *ApJ*. — 2014. — Февр. — Т. 782. — С. 45. — arXiv: [1310.4107](#).
96. *Trakhtenbrot, B.* The Most Massive Active Black Holes at $z \sim 1.5-3.5$ have High Spins and Radiative Efficiencies / B. Trakhtenbrot // *ApJL*. — 2014. — ИЮЛЬ. — Т. 789. — С. L9. — arXiv: [1405.5877](#).
97. A catalogue of optical to X-ray spectral energy distributions of $z \approx 2$ quasars observed with Swift - I. First results / D. Lawther [и др.] // *MNRAS*. — 2017. — ИЮНЬ. — Т. 467, № 4. — С. 4674—4710. — arXiv: [1702.05444](#) [[astro-ph.GA](#)].
98. *Shakura, N. I.* Black holes in binary systems. Observational appearance. / N. I. Shakura, R. A. Sunyaev // *A&A*. — 1973. — Т. 24. — С. 337—355.
99. *Sobolev, V. V.* A treatise on radiative transfer. / V. V. Sobolev. — Princeton, N.J. : Van Nostrand, 1963.
100. *Chandrasekhar, S.* Radiative transfer. / S. Chandrasekhar. — Oxford : Clarendon Press, 1950.
101. Polarization of Radiation and Basic Parameters of the Circumnuclear Region of Active Galactic Nuclei / Y. N. Gnedin [и др.] // *Astrophysics*. — 2015. — Дек. — Т. 58. — С. 443—452.
102. *Piotrovich, M. Y.* Determination of supermassive black hole spins in local active galactic nuclei / M. Y. Piotrovich, S. D. Buliga, T. M. Natsvlishvili // *Astronomische Nachrichten*. — 2022. — ИЮНЬ. — Т. 343, № 5. — e10020. — arXiv: [2205.10623](#) [[astro-ph.HE](#)].
103. *Pariev, V. I.* Extending the Shakura-Sunyaev approach to a strongly magnetized accretion disc model / V. I. Pariev, E. G. Blackman, S. A. Boldyrev // *A&A*. — 2003. — АВГ. — Т. 407. — С. 403—421. — arXiv: [astro-ph/0208400](#) [[astro-ph](#)].

104. Determination of magnetic field strength on the event horizon of supermassive black holes in active galactic nuclei / M. Y. Piotrovich [и др.] // MNRAS. — 2020. — ИЮНЬ. — Т. 495, № 1. — С. 614—620. — arXiv: [2004.07075 \[astro-ph.HE\]](#).
105. Photometric Reverberation Mapping of AGNs at $0.1 < z < 0.8$. I. Observational Technique / R. I. Uklein [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2019. — Дек. — Т. 74, № 4. — С. 388—395. — arXiv: [1911.04073 \[astro-ph.GA\]](#).
106. *Bentz, M. C.* The AGN Black Hole Mass Database / M. C. Bentz, S. Katz // PASP. — 2015. — ЯНВ. — Т. 127. — С. 67. — arXiv: [1411.2596](#).
107. Spectropolarimetric monitoring of active galaxy 3C 390.3 with 6-m telescope SAO RAS in the period 2009-2014 / V. L. Afanasiev [и др.] // MNRAS. — 2015. — АПР. — Т. 448, № 3. — С. 2879—2889. — arXiv: [1501.07519 \[astro-ph.GA\]](#)
108. *Daly, R. A.* Black Hole Spin and Accretion Disk Magnetic Field Strength Estimates for More Than 750 Active Galactic Nuclei and Multiple Galactic Black Holes / R. A. Daly // ApJ. — 2019. — НОЯБ. — Т. 886, № 1. — С. 37. — arXiv: [1905.11319 \[astro-ph.HE\]](#).
109. Equatorial scattering and the structure of the broad-line region in Seyfert nuclei: evidence for a rotating disc / J. E. Smith [и др.] // MNRAS. — 2005. — МАЙ. — Т. 359. — С. 846—864. — eprint: [astro-ph/0501640](#).
110. 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 \[astro-ph.GA\]](#).
111. Dust Reverberation Mapping in Distant Quasars from Optical and Mid-infrared Imaging Surveys / Q. Yang [и др.] // ApJ. — 2020. — СЕНТ. — Т. 900, № 1. — С. 58. — arXiv: [2007.02402 \[astro-ph.GA\]](#).
112. *Lyu, J.* Mid-IR Variability and Dust Reverberation Mapping of Low- z Quasars. I. Data, Methods, and Basic Results / J. Lyu, G. H. Rieke, P. S. Smith // ApJ. — 2019. — НОЯБ. — Т. 886, № 1. — С. 33. — arXiv: [1909.11101 \[astro-ph.GA\]](#).
113. AGN black hole mass estimates using polarization in broad emission lines / D. Savić [и др.] // A&A. — 2018. — ИЮНЬ. — Т. 614. — A120. — arXiv: [1801.06097 \[astro-ph.GA\]](#).

114. Estimating supermassive black hole masses in active galactic nuclei using polarization of broad Mg II, H α , and H β lines / Đ. Savić [и др.] // MNRAS. — 2020. — Сент. — Т. 497, № 3. — С. 3047–3054. — arXiv: [2007.11475 \[astro-ph.GA\]](#).
115. *Lani, C.* Intrinsic AGN SED & black hole growth in the Palomar-Green quasars / C. Lani, H. Netzer, D. Lutz // MNRAS. — 2017. — Окт. — Т. 471, № 1. — С. 59–79. — arXiv: [1705.06747 \[astro-ph.GA\]](#).
116. Calibration of the virial factor f in supermassive black hole masses of reverberation-mapped AGNs / L.-M. Yu [и др.] // MNRAS. — 2019. — Сент. — Т. 488, № 2. — С. 1519–1534. — arXiv: [1907.00315 \[astro-ph.GA\]](#).
117. *Zhuang, M.-Y.* The Infrared Emission and Opening Angle of the Torus in Quasars / M.-Y. Zhuang, L. C. Ho, J. Shanguan // ApJ. — 2018. — Авг. — Т. 862, № 2. — С. 118. — arXiv: [1806.03783 \[astro-ph.GA\]](#).
118. Measurement of the Supermassive Black Hole Masses in Two Active Galactic Nuclei by the Photometric Reverberation Mapping Method / E. A. Malygin [и др.] // Astronomy Letters. — 2020. — Нояб. — Т. 46, № 11. — С. 726–733. — arXiv: [2103.05801 \[astro-ph.GA\]](#).
119. Supermassive Black Holes with High Accretion Rates in Active Galactic Nuclei. XII. Reverberation Mapping Results for 15 PG Quasars from a Long-duration High-cadence Campaign / C. Hu [и др.] // ApJS. — 2021. — Март. — Т. 253, № 1. — С. 20.
120. *Laor, A.* On the origin of radio emission in radio-quiet quasars / A. Laor, E. Behar // MNRAS. — 2008. — Окт. — Т. 390, № 2. — С. 847–862. — arXiv: [0808.0637 \[astro-ph\]](#).
121. Absorbed relativistic jets in radio-quiet narrow-line Seyfert 1 galaxies / M. Berton [и др.] // A&A. — 2020. — Апр. — Т. 636. — A64. — arXiv: [2003.02654 \[astro-ph.GA\]](#).
122. *Silpa, S.* Looking at Radio-Quiet AGN with Radio Polarimetry / S. Silpa, P. Kharb // arXiv e-prints. — 2022. — Янв. — arXiv:2201.03877. — arXiv: [2201.03877 \[astro-ph.GA\]](#).
123. Strong lensing reveals jets in a sub-microJy radio-quiet quasar / P. Hartley [и др.] // MNRAS. — 2019. — Май. — Т. 485, № 3. — С. 3009–3023. — arXiv: [1901.05791 \[astro-ph.GA\]](#).

124. *Barvainis, R.* Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei / R. Barvainis // *ApJ*. — 1987. — Сент. — Т. 320. — С. 537–544.
125. *Barvainis, R.* Dust Reverberation: A Model for the Infrared Variations of Fairall 9 / R. Barvainis // *ApJ*. — 1992. — Дек. — Т. 400. — С. 502.
126. Polarimetric Reverberation Mapping in Medium-Band Filters / E. Shablovinskaya [и др.] // *Universe*. — 2023. — Янв. — Т. 9, № 1. — С. 52. — arXiv: [2301.05267](https://arxiv.org/abs/2301.05267) [[astro-ph.GA](#)].
127. A spectropolarimetric atlas of Seyfert 1 galaxies / J. E. Smith [и др.] // *MNRAS*. — 2002. — Сент. — Т. 335. — С. 773–798. — eprint: [astro-ph/0205204](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0205204).
128. Quasar Accretion Disk Sizes from Continuum Reverberation Mapping from the Dark Energy Survey / D. Mudd [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Авг. — Т. 862, № 2. — С. 123. — arXiv: [1711.11588](https://arxiv.org/abs/1711.11588) [[astro-ph.GA](#)].
129. *Alexander, T.* Is AGN Variability Correlated with Other AGN Properties? ZDCF Analysis of Small Samples of Sparse Light Curves / T. Alexander // *Astronomical Time Series*. Т. 218 / под ред. D. Maoz, A. Sternberg, E. M. Leibowitz. 01.1997. — С. 163. — (Astrophysics and Space Science Library).
130. *Alexander, T.* Improved AGN light curve analysis with the z-transformed discrete correlation function / T. Alexander // arXiv e-prints. — 2013. — Февр. — arXiv:1302.1508. — arXiv: [1302.1508](https://arxiv.org/abs/1302.1508) [[astro-ph.IM](#)].
131. *Wandel, A.* Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. I. Comparing the Photoionization and Reverberation Techniques / A. Wandel, B. M. Peterson, M. A. Malkan // *ApJ*. — 1999. — Дек. — Т. 526, № 2. — С. 579–591. — arXiv: [astro-ph/9905224](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905224) [[astro-ph](#)].
132. Reverberation Measurements for 17 Quasars and the Size-Mass-Luminosity Relations in Active Galactic Nuclei / S. Kaspi [и др.] // *ApJ*. — 2000. — Апр. — Т. 533, № 2. — С. 631–649. — arXiv: [astro-ph/9911476](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911476) [[astro-ph](#)].
133. Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database / B. M. Peterson [и др.] // *ApJ*. — 2004. — Окт. — Т. 613, № 2. — С. 682–699. — arXiv: [astro-ph/0407299](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0407299) [[astro-ph](#)].

134. Reverberation Mapping Results for Five Seyfert 1 Galaxies / C. J. Grier [и др.] // *ApJ*. — 2012. — Август. — Т. 755, № 1. — С. 60. — arXiv: [1206.6523 \[astro-ph.CO\]](#).
135. A Reverberation Lag for the High-ionization Component of the Broad-line Region in the Narrow-line Seyfert 1 Mrk 335 / C. J. Grier [и др.] // *ApJL*. — 2012. — ЯНВ. — Т. 744, № 1. — С. L4. — arXiv: [1110.6179 \[astro-ph.CO\]](#).
136. Supermassive Black Holes with High Accretion Rates in Active Galactic Nuclei. XII. Reverberation Mapping Results for 15 PG Quasars from a Long-duration High-cadence Campaign / C. Hu [и др.] // *ApJS*. — 2021. — Март. — Т. 253, № 1. — С. 20.
137. Accretion disc sizes from continuum reverberation mapping of AGN selected from the ZTF survey / V. K. Jha [и др.] // *MNRAS*. — 2022. — Апрель. — Т. 511, № 2. — С. 3005–3016. — arXiv: [2109.05036 \[astro-ph.GA\]](#).
138. Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in 17 Seyfert Galaxies / S. Koshida [и др.] // *ApJ*. — 2014. — Июнь. — Т. 788, № 2. — С. 159. — arXiv: [1406.2078 \[astro-ph.GA\]](#).
139. Multiwavelength campaign on Mrk 509. I. Variability and spectral energy distribution / J. S. Kaastra [и др.] // *A&A*. — 2011. — Октябрь. — Т. 534. — A36. — arXiv: [1107.0656 \[astro-ph.CO\]](#).
140. Optical continuum photometric reverberation mapping of the Seyfert-1 galaxy Mrk509 / F. Pozo Nuñez [и др.] // *MNRAS*. — 2019. — Декабрь. — Т. 490, № 3. — С. 3936–3951. — arXiv: [1912.10319 \[astro-ph.GA\]](#).
141. The First Swift Intensive AGN Accretion Disk Reverberation Mapping Survey / R. Edelson [и др.] // *ApJ*. — 2019. — ЯНВ. — Т. 870, № 2. — С. 123. — arXiv: [1811.07956 \[astro-ph.HE\]](#).
142. The resolved size and structure of hot dust in the immediate vicinity of AGN / GRAVITY Collaboration [и др.] // *A&A*. — 2020. — Март. — Т. 635. — A92. — arXiv: [1910.00593 \[astro-ph.GA\]](#).
143. The IBISCO survey. I. Multiphase discs and winds in the Seyfert galaxy Markarian 509 / M. V. Zanchettin [и др.] // *A&A*. — 2021. — Ноябрь. — Т. 655. — A25. — arXiv: [2107.06756 \[astro-ph.GA\]](#).