

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 524.7-82/520.85

Шабловинская Елена Сергеевна

**Исследование центральных областей активных
галактик по наблюдениям в поляризованном свете**

(01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Нижний Архыз — 2021

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

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

Официальные оппоненты: **Киселев Николай Николаевич**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
КрАО РАН
Кравченко Евгения Васильевна
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
АКЦ ФИАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 6 декабря 2021 года в часов на открытом заседании диссертационного совета Д 002.203.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Активные ядра галактик (АЯГ) — это яркие компактные области, излучающие до 90% светимости всей галактики. Сейчас процесс энерговыделения и строение активного ядра принято рассматривать в рамках Унифицированной модели (УМ) [1; 2]. УМ объясняет дихотомию наблюдаемых свойств АЯГ, разделенных на два типа по наличию/отсутствию в их спектрах широких разрешенных эмиссионных линий [3], различной ориентацией ядер относительно наблюдателя при одинаковой в общих чертах внутренней структуре. Центральным источником активного ядра является сверхмассивная черная дыра (СМЧД), окруженная аккреционным диском размером порядка 0.001 пк, что подтверждается недавно полученным изображением тени СМЧД в ядре галактики M87 [4]. Аккреция газа на СМЧД порождает высокоэнергетичное излучение, которое ионизует вещество в более далеких (0.1-0.01 пк) структурах АЯГ. Ионизованный излучением аккреционного диска быстро вращающийся газ комбинирует и переизлучает в эмиссионных линиях, уширенных за счет эффекта Дошлера. Эта область получила название broad line region (BLR), т.е. область формирования широких линий. Снаружи эта область окружена более холодной и оптически толстой материей, т. н. пылевым тором. Пылевой тор является ключевым параметром УМ: именно благодаря тому, что при определенной ориентации АЯГ оптически толстый слой пыли экранирует от наблюдателя излучение центральных областей ядра, в спектрах таких галактик не видны широкие компоненты линий, излучаемых BLR. В таких случаях наблюдаются только узкие компоненты эмиссионных линий, формирующиеся в области NLR (narrow line region, область формирования узких линий), отстоящей от ядра на расстояние более 1 пк. Недавно было доказано, что эта геометрически и оптически толстая область имеет более сложную форму и структуру, отличную от тороидальной [5], но для удобства будем дальше пользоваться устоявшейся терминологией.

Ещё одной важной и необычной особенностью активных галактик является присутствие в спектрах нетепловой компоненты и высокая интенсивность излучения в радиодиапазоне, формирующегося в релятивистских джетах — коллимированных струях вещества, направленных перпендикулярно плоскости галактики. После открытия синхротронного излучения АЯГ по аналогии с излучением Крабовидной туманности стали предполагать, что излучение активных ядер должно быть поляризовано [6]. Вскоре линейная поляризация действительно была обнаружена [см., напр., 7; 8], что дало возможность получать дополнительную информацию о структуре и физических свойствах вещества внутри центральных геометрически неразрешимых областей АЯГ.

Рассмотрим основные механизмы поляризации оптического излучения АЯГ. Излучение становится поляризованным при распространении в

анизотропной среде. Анизотропия может быть вызвана различными механизмами, которые обычно делятся на процессы отражения и рассеяния. Степень поляризации отраженного излучения высока (до 100%), в то время как при прохождении через среду свет обычно поляризуется слабо. Что касается активных ядер, то удобнее разделить поляризационные механизмы на внутренние (внутри центрального парсека) и внешние.

Основные внутренние механизмы поляризации:

- поляризация излучения аккреционного диска за счет переноса излучения в нем [9] и фарадеевского вращения в замагниченной среде [напр., 10; 11]. В частности, наличие магнитного поля в диске порождает зависимость поляризации от длины волны [см. 12, и ссылки внутри];
- синхротронное излучение оптического джета. Наиболее ярко этот эффект проявляется в наблюдениях объектов типа VL Lac, или блазарах, джет которых ориентирован под малым углом к лучу зрения наблюдения. Из-за специфической ориентации излучение джета доминирует над излучением всего ядра, а степень его поляризации велика — может достигать 40% и выше во вспышках [см., напр., 13];
- рассеяние Томсона, Рэлея и пр. в атмосфере аккреционного диска и на других структурах внутри ядра.

Более тонкие эффекты, как, например, поляризация вследствие появления магнитного поля из-за эффектов ОТО вблизи горизонта событий СМЧД, в данном случае рассматривать не будем. Важно отметить, что внутренние механизмы поляризации суммируются при наблюдениях, так как структуры АЯГ неразрешимы, поэтому однозначное их разделение без дополнительных предположений о вкладе механизмов в излучение затруднено.

Среди внешних механизмов принято выделять два:

- экваториальное рассеяние на пылевом торе;
- полярное рассеяние на конусе ионизации.

Эти механизмы повторяют дихотомию 1-го и 2-го типа АЯГ. Антонуччи [14] обнаружил, что два типа сейфертовских галактик также характеризуются различной ориентацией поляризации: у Sy 1 поляризация чаще параллельна радиооси, а у Sy 2 — перпендикулярна. Позже стало понятно, что такая ориентация связана с тем, что у ядер 1-го типа преобладает экваториальное рассеяние, у 2-го — соответственно, полярное. Такое различие типов галактик вместе с наблюдательным подтверждением наличия двух разных областей рассеяния стало ещё одним фактом в пользу УМ.

Таким образом, изучение поляризации активных ядер позволяет лучше сформировать наше представление об их устройстве и физическом состоянии вещества в этих областях. В связи с этим методы поляриметрии АЯГ в настоящее время активно развиваются, причем основное внимание

уделяется двум направлениям: спектрополяриметрии континуального и эмиссионного излучения АЯГ и поляриметрии в широких полосах, в основном, блазаров. С помощью этих подходов уже достигнуты значительные успехи, однако всё равно остается ряд вопросов, связанных, например, с истечениями и ветрами из центральных областей АЯГ (BLR и аккреционного диска), которые относительно недавно начали рассматриваться в моделях ядер [см., напр., 15]. В частности, неизученным остается влияние истечений на наблюдаемые поляризационные свойства ядра и, в частности, применимость нового спектрополяриметрического метода оценки массы СМЧД [16]. Кроме того, невозможность прямого разрешения в оптическом диапазоне центральных областей АЯГ ведет к тому, что геометрические размеры структур, принятых в рамках УМ, и физическое состояние вещества не определяются прямыми методами. В целом, интенсивное накопление данных о поляризации АЯГ сейчас показывает необходимость создания новых методик, моделей и инструментов для высокоточной поляриметрии слабых объектов.

Целью данной работы является исследование геометрии и кинематики центральных оптически неразрешимых областей АЯГ различных типов с помощью методов оптической поляриметрии.

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

1. Построение численной модели экваториального рассеяния в широких линиях УФ-диапазона и сравнение результатов с данными спектрополяриметрических наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO-2 первичного фокуса 6-м телескопа БТА.
2. Разработка нового метода определения размера области экваториального рассеяния для повышения точности спектрополяриметрического метода определения масс СМЧД в АЯГ.
3. Разработка методов анализа данных длительных поляриметрических мониторингов блазаров для оценки геометрических размеров областей оптического излучения джета.
4. Введение в эксплуатацию фотометра-поляриметра для 1-м телескопа и его методические исследования для проведения с его помощью высокоточных поляриметрических наблюдений внегалактических объектов.

Научная новизна:

1. Впервые проведено численное моделирование поляризации излучения вследствие экваториального рассеяния излучения широкой линии Mg II в случае высокоскоростных истечений из центральных областей активного ядра.
2. Впервые признаки экваториального рассеяния были найдены в поляризованном свете в спектральной линии Mg II в квазаре SBSS

1419+538, что позволило также впервые применить спектрополяриметрический метод измерения массы СМЧД к объекту на красном смещении больше 1.

3. Впервые обнаружена систематическая разница между состоянием поляризации двух компонент гравитационно-линзированного квазара Q0957+561, а также зависимость поляризации континуума в компонентах от длины волны.
4. Впервые предложен метод поляриметрического эхокартирования в широких линиях АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием, позволяющий напрямую оценивать размер области экваториального рассеяния.
5. Впервые на основе высокоточного поляриметрического мониторинга с высоким временным разрешением блазара S5 0716+714 сделана оценка линейного размера геликального магнитного поля на расстоянии менее 0.01 пк от ядра, отождествляемого с излучающей областью, около 10 а.е.

Научная и практическая значимость:

1. Численный расчет поляризации вследствие экваториального рассеяния в УФ линии Mg II показал возможность применения спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД даже в присутствии высокоскоростных истечений из ядра, на основе чего метод был успешно применен к исследованиям двух галактик на красных смещениях больше 1.
2. Представленный в диссертации новый метод эхокартирования в широких поляризованных линиях позволяет получать прямые оценки размера области экваториального рассеяния (или внутреннего радиуса пылевого тора) в АЯГ 1-го типа. Это позволяет повысить точность спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД и дать более точные оценки радиуса сублимации пыли в АЯГ по сравнению с данными наблюдений в ИК диапазоне.
3. Полученные в диссертации данные длительного поляриметрического мониторинга объекта типа BL Lac демонстрируют возможность получения оценки линейных размеров оптически неразрешаемых областей джета вблизи СМЧД.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе численной модели доказана возможность применения спектрополяриметрического метода оценки масс СМЧД в УФ линии Mg II даже в случае высокоскоростных истечений из ядра.
2. По данным спектрополяриметрических наблюдений в широкой линии Mg II гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ($z = 1.41$) обнаружено, что экваториальное рассеяние не является здесь доминирующим механизмом поляризации излучения. Сделано предположение о возможном комплексном влиянии эффектов

- микро- и макролинзирования на излучение внутренних областей квазара и прецессии системы диск-джет.
3. Разработан новый метод определения внутреннего радиуса пылевого тора, основанный на идее эхокартирования в широких эмиссионных линиях в поляризованном свете АЯГ 1-го типа с экваториальным рассеянием. На примере активной галактики Mrk 6 показано, что измеряемый размер области рассеяния соответствует эмпирическим оценкам радиуса сублимации пыли и позволяет значительно уточнить размер пылевого тора относительно оценок, полученных по данным ИК наблюдений.
 4. На основе поляриметрического мониторинга блазара S5 0716+714 обнаружена внутрисуточная переменность блеска и направления поляризации с периодом ~ 1.5 часов. Построена геометрическая модель поляризованного излучения джета и дана оценка линейным размерам геликального магнитного поля, отождествляемого с излучающей областью размером ~ 10 а.е. на расстоянии менее 0.01 пк от ядра. Стабильность области формирования оптического поляризованного излучения подтверждена повторными наблюдениями на телескопе Цейсс-1000 с прибором "Стокс-поляриметр".
 5. Исследованы параметры разработанного и введенного в строй фотометра-поляриметра для 1-м телескопа САО РАН "Стокс-поляриметр". Продемонстрирована возможность реализации с этим прибором точности измерения линейной поляризации 0.1-0.2% для объектов до 16 зв.в.

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

1. "The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows", Германия, Потсдам, 02-07.09.2018 — стендовый доклад, "Intraday variability of blazar s5 0716+714 in polarized light", Shablovinskaya E.
2. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 18-21.12.2018 — устный доклад, "Внутрисуточная переменность вектора поляризации блазара S5 0716+714", Шабловинская Е.С., Афанасьев В.Л.
3. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН, 24-26.04.2019 — устный доклад, "Прямое измерение массы SMBH в далёком квазаре SBS 1419+538 методами спектрополяриметрии", Шабловинская Е.С., Savic D.
4. "12th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", Сербия, Врдник, 03-07.06.2019 — устный доклад, "Intraday

- variability of the polarization vector in AGN S5 0716+714", Shablovinskaya E., Afanasiev V.
5. "Diversity of the Local Universe", Нижний Архыз, CAO РАН, 30.09-04.10.2019 — стендовый доклад, "The intraday variations of the polarization vector direction in blazar S5 0716+714", Shablovinskaya E., Afanasiev V.
 6. "IV Conference on Active Galactic Nuclei and Gravitational Lensing", Сербия, Баня Ждрело, 12-15.11.2019 — устный доклад, "Type 1 AGN reverberation mapping in polarized light", Shablovinskaya E., Afanasiev V., Popovic L. C.
 7. "EAS 2020", online, 1-3.07.2020 — устный доклад, "The intraday variations of the polarization vector direction in blazar S5 0716+714", Shablovinskaya E., Afanasiev V.
 8. "XII Serbian-Bulgarian Astronomical Conference", online, 25-29.09.2020 — устный доклад, "A new approach to measuring the size of the dust sublimation region in AGNs", Shablovinskaya E., Afanasiev V., Popovic L. C.
 9. "Towards a panchromatic understanding of the polarization of Active Galactic Nuclei", online, 1-11.12.2020 — устный доклад, "New capabilities of AGN polarimetry with small telescopes", Shablovinskaya E., Afanasiev V., Popovic L. C., Uklein R., Malygin E.

Публикации по теме диссертации

1. **Shablovinskaya E. S.**, Afanasiev V. L.; "The intraday variations of the polarization vector direction in radio source S5 0716+714", Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol. 482, Issue 4, pp. 4322-4328 (2019)
2. **Shablovinskaya E.**, Afanasiev, V.; "Intraday variability of the polarization vector in AGN S5 0716+714", Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, Vol. 50, Issue 1, pp. 341-349 (2020)
3. **Shablovinskaya E. S.**, Afanasiev V. L., Popović L. Č.; "Measuring the AGN Sublimation Radius with a New Approach: Reverberation Mapping of Broad Line Polarization", Astrophys. J., Vol. 892, Issue 2, p. 118 (2020)
4. Savić Đ., Popović L. Č., **Shablovinskaya E.**, Afanasiev V. L.; "Estimating supermassive black hole masses in active galactic nuclei using polarization of broad Mg II, H α , and H β lines", Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol. 497, Issue 3, pp. 3047-3054 (2020)
5. В. Л. Афанасьев, **Е. С. Шабловинская**, Р. И. Уклеин, Е. А. Мalyгин; "Стокс-поляриметр для 1-метрового телескопа", Астрофиз. Бюл., том 76, 1, с. 120–126 (2021)

6. Popović L. Č., Afanasiev V. L., Shablovinskaya E. S., Ardilanov V. I., Savić Dj.; "Spectroscopy and polarimetry of the gravitationally lensed quasar Q0957+561", A&A, Vol. 647, id.A98, 11 pp. (2021)

Личный вклад автора

В работах [1], [2] — получение наблюдательного материала на 6-м телескопе с прибором SCORPIO-2, обработка и анализ поляриметрических данных, построение геометрической модели формирования поляризации в джете; совместное обсуждение результатов. В работе [3] — анализ архивных спектрополяриметрических данных, разработка метода оценки радиуса сублимации в АЯГ. В работе [4] — разработка идеи продления метода спектрополяриметрии на далекие АЯГ, совместное обсуждение результатов. В работе [5] — получение наблюдательного материала на 6-м телескопе с прибором SCORPIO-2, обработка и анализ поляриметрических данных, обсуждение результатов наравне с соавторами. В работе [6] — получение наблюдательного материала на 1-м телескопе Цейсс-1000, методическая работа по введению в эксплуатацию нового поляриметра.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 127 страниц, включая 33 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 208 наименований.

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 режиме поляриметрии и обработки поляриметрических данных. В **разделе 1.1** вводится математический формализм параметров Стокса, а также понятия степени и угла плоскости поляризации, которые далее будут использоваться в работе. В **разделе 1.2** даны описания нескольких наиболее распространенных в астрономических наблюдениях типов анализаторов поляризации – пластины Савара, дихроичного поляроида и анализаторов на основе призмы Волластона. Особое внимание уделяется преимуществам и недостаткам их использования при поляриметрии различных типов объектов. Из-за того, что используемый в диссертации материал был получен на нескольких приборах, в **разделе 1.3** описываются особенности работы в режимах поляриметрии и спектрополяриметрии с двумя типами анализаторов – одинарной и двойной призмами Волластона на приборе SCORPIO-2 на 6-м телескопе (**раздел 1.3.1**) и двойной призмой Волластона с новым поляриметром "СтоП" на 1-м телескопе (**раздел 1.3.2**). Во всех случаях

кратко приводится последовательность обработки наблюдательного материала и формулы для расчётов параметров Стокса. Также, поскольку прибор "СтоП" был введен в опытную эксплуатацию в начале 2020 года, в разделе 1.3.2 дано описание режимов наблюдений и приводятся результаты методических исследований поляриметрической моды – оценка уровня инструментальной поляризации и достигаемая точность измерения степени и угла поляризации в сравнении с аналогичными измерениями на приборе ММРР (Multi-Mode Photometer Polarimeter).

Вторая глава посвящена численным моделям расчёта поляризации излучения центральных областей АЯГ при экваториальном рассеянии на внутренней границе пылевого тора. Для АЯГ 1-го типа, где экваториальное рассеяние является доминирующим механизмом поляризации в широких линиях, существует метод спектрополяриметрического измерения масс СМЧД [16], описание которого мы приводим в **разделе 2.1**. Особый интерес представляет продление спектрополяриметрического метода на линии УФ-диапазона, что необходимо для исследования объектов на больших красных смещениях. Одной из подходящих линий является линия Mg II (2798Å), однако в её профиле, как отмечается многими авторами, обыкновенно присутствуют признаки радиальных движений перпендикулярно плоскости диска со скоростями несколько тысяч км/с. Поскольку поляризация крайне чувствительна к геометрии и кинематике области излучения и рассеяния, была рассмотрена численная модель экваториального рассеяния в широких линиях H α , H β и Mg II в предположении наличия высокоскоростных истечений вещества и некруговых движений в диске BLR с помощью пакета STOKES (**раздел 2.2**). Описание начальных параметров численной модели дается в **разделе 2.3**: в классическую модель центральных областей АЯГ были добавлены потоки вещества, двигающиеся под углом 60° к экваториальной плоскости со скоростями 6000 км/с. Анализ полученных результатов (**раздел 2.4**) показал, что несмотря на то, что поляризационный профиль линии Mg II имеет ряд особенностей, нехарактерных для линий H α и H β , профиль линии в поляризованном свете адекватно описывает кеплеровские движения в BLR. Согласно расчетам, представленным в **разделе 2.5**, вносимая радиальными истечениями ошибка оценки массы СМЧД по спектрополяриметрии в линии Mg II меньше 35%, что сравнимо со случайными ошибками. В **разделе 2.6** полученные результаты обсуждаются и показывается, что данный метод может быть применен к наблюдениям линий коротковолнового диапазона даже в случае АЯГ с экстремальными истечениями.

Проверка результатов численных моделей, описанных во второй главе, на реальных наблюдениях далеких квазаров приводится в **третьей главе**, где анализируются спектрополяриметрические данные двух АЯГ 1-го типа.

Раздел 3.1 содержит описание исследования квазара SBS 1419+538 ($z = 1.86$). На основе спектрополяриметрических данных в линии Mg II в излучении SBS 1419+538 были обнаружены особенности профиля угла плоскости поляризации, характерные для случая экваториального рассеяния, что позволило дать оценку массы центральной СМЧД – $\log(M_{\text{SMBH}}/M_{\odot}) = 9.72 \pm 0.29$ (**раздел 3.1.1**). В **разделе 3.1.2** показано, что данная оценка в пределах точности измерения совпала с рассчитанной нами по эмпирической зависимости "размер BLR – светимость", при этом светимость квазара оказалась равной 30% критической.

Для гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 ($z = 1.41$) была также сделана попытка обнаружения признаков экваториального рассеяния в линии Mg II, что описывается в **разделе 3.2**. Здесь в отличие от SBS 1419+538 ни в линии Mg II, ни в линии CIII], которая также попала в наблюдаемый спектральный диапазон, следы экваториального рассеяния не обнаружены. Это может быть объяснено тем, что в центральных областях Q0957+561 присутствует деполяризующая среда, как, например, в случае 3C390.3, который так же, как и Q0957+561, является радио-громким источником. Также, расстояние между областью излучения широких линий и экраном рассеяния мало, из-за чего амплитуда эффекта мала и не наблюдается ввиду ошибок измерений. Однако в ходе работы были обнаружены ранее неизвестные свойства объекта: на основе спектрополяриметрических данных мы определили, что состояние поляризации двух компонент линзированного квазара отлично друг от друга, а угол поляризации изменяется с длиной волны. Эти выводы были подтверждены с помощью дополнительных поляриметрических наблюдений квазара в широких фильтрах с более высокой точностью, данных в **разделе 3.2.2**. Эти результаты обсуждаются в **разделе 3.2.3**. Подобные эффекты нехарактерны для гравитационного линзирования и требуют дополнительных наблюдений.

В **четвертой главе** представлен новый метод оценки размера области экваториального рассеяния на основе метода эхокартирования в поляризованном свете. Из-за неразрешимости центральных областей АЯГ проблема измерения расстояний существует и для BLR (**раздел 4.1.1**), и для пылевого тора (**раздел 4.1.2**), а в рамках спектрополяриметрического метода определения масс СМЧД особое место занимает необходимость оценки расстояния до области экваториального рассеяния, которую приходится рассчитывать косвенно (**раздел 4.1.3**). В этом случае ожидаемая вносимая неопределенность оценки массы СМЧД оказывается порядка фактора 2-4. Новый подход описывается в **разделе 4.2**: так как эмиссионное излучение облаков BLR изначально не поляризовано, показано, что в случае АЯГ 1-го типа экваториальное рассеяние является единственным механизмом, вносящим значительную поляризацию в излучение

широких линий. Сравнение кривых блеска интегрального потока континуума и поляризованного потока в линии демонстрирует временную задержку, соответствующую расстоянию от континуального источника (аккреционного диска) до области рассеяния. Применение такого нового подхода к спектрополяриметрическому мониторингу известной сейфертовской галактики Mrk 6, проведенному в 2010-2013 гг. на телескопе БТА с прибором SCORPIO-2, позволило оценить размер области ~ 100 св. дней (раздел **разделе 4.3**). Как показывает анализ этого результата, сделанный в **разделе 4.4**, наша оценка оказалась в 2 раза меньше, чем полученные ранее с помощью интерферометрии пылевого тора в ближнем ИК-диапазоне, что позволило увеличить точность определения массы СМЧД на основе спектрополяриметрии.

В отличие от сейфертовских галактик, поляризация объектов типа BL Lac имеет нетепловую синхротронную природу и генерируется в релятивистском джете, направленном на наблюдателя, размер и строение которого пока невозможно изучать с помощью прямых методов. В рамках данной работы, мы исследовали один из наиболее ярких и переменных объектов — блазар S5 0716+714, особенности которого описываются в **разделе 5.1**, методом длительного поляриметрического мониторинга с высоким временным разрешением. Описанные в **разделе 5.2** наблюдения проводились на БТА с прибором SCORPIO-2 (**раздел 5.2.1**) в течение целой ночи (около 9 часов), что позволило выявить движение вектора поляризации на малых временных масштабах: переключения направления происходили с периодом порядка 1.5 часов, и такой же период демонстрировали и вариации блеска. Это соответствует размеру сечения оптического джета порядка 10 а.е., что стало принципиально новым результатом. Спустя два года мы повторили наблюдения S5 0716+714 на 1-м телескопе с помощью прибора "СтоП" (**раздел 5.2.2**). Анализ последних данных подтвердил результат, полученный ранее на БТА, и показал, что структура джета, излучающая в оптическом диапазоне, имеет постоянные размеры. Сравнение с литературными поляриметрическими данными S5 0716+714 и других блазаров приведено в **разделе 5.3** и показывает, что быстрая переменность направления вектора поляризации распространена для этой группы объектов. Для объяснения вращения вектора поляризации в **разделе 5.4** описывается построенная нами простую геометрическую модель движения плазмы в геликальном магнитном поле конического джета, где показано, что характер поведения вектора поляризации на QU -плоскости может быть описан в рамках данной модели с учетом прецессии магнитного поля. Обсуждение этих результатов дано в **разделе 5.5**.

В **Заключении** приводится описание основных результатов, достигнутых в рамках данного исследования.

Список литературы

1. *Antonucci, R.* Unified models for active galactic nuclei and quasars. / R. Antonucci // Annual Review of Astron and Astrophys. — 1993. — янв. — т. 31. — с. 473–521.
2. *Urry, C. M.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei / C. M. Urry, P. Padovani // PASP. — 1995. — сент. — т. 107. — с. 803. — arXiv: [astro-ph/9506063](#) [[astro-ph](#)].
3. *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.
4. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole / Event Horizon Telescope Collaboration [и др.] // ApJL. — 2019. — апр. — т. 875, № 1. — с. L1. — arXiv: [1906.11238](#) [[astro-ph.GA](#)].
5. *Hönig, S. F.* Redefining the Torus: A Unifying View of AGNs in the Infrared and Submillimeter / S. F. Hönig // ApJ. — 2019. — окт. — т. 884, № 2. — с. 171. — arXiv: [1909.08639](#) [[astro-ph.GA](#)].
6. *Dibai, E. A.* / E. A. Dibai, N. M. Shakhovskoi // Astronomicheskij Tsirkulyar. — 1966. — янв. — т. 375. — с. 1.
7. Discovery of High Optical Polarisation of a Radio Object with Continuous Optical Spectrum 4C 47.08 (OE 400) / Y. S. Efimov [и др.] // Astronomicheskij Tsirkulyar. — 1979. — март. — т. 1040. — с. 3–5.
8. Infrared and optical polarimetry of the radio elliptical IC 5063 (PKS2048-57) : discovery of a highly polarized non-thermal nucleus. / J. H. Hough [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1987. — февр. — т. 224. — с. 1013–1018.
9. *Beloborodov, A. M.* Polarization Change Due to Fast Winds from Accretion Disks / A. M. Beloborodov // ApJL. — 1998. — апр. — т. 496, № 2. — с. L105–L108. — arXiv: [astro-ph/9802128](#) [[astro-ph](#)].
10. *Gnedin, Y. N.* Polarization of radiation from a strongly magnetized accretion disk: The asymptotic spectral distribution / Y. N. Gnedin, N. A. Silant'ev, P. S. Shternin // Astronomy Letters. — 2006. — янв. — т. 32, № 1. — с. 39–44.
11. Magnetic fields of AGNs and standard accretion disk model: testing by optical polarimetry / N. A. Silant'ev [и др.] // A&A. — 2009. — нояб. — т. 507, № 1. — с. 171–182. — arXiv: [0909.1207](#) [[astro-ph.CO](#)].
12. Spectropolarimetric observations of active galactic nuclei with the 6-m BTA telescope / V. L. Afanasiev [и др.] // Astronomy Letters. — 2011. — май. — т. 37, № 5. — с. 302–310. — arXiv: [1104.3690](#) [[astro-ph.GA](#)].

13. Probing the Inner Jet of the Quasar PKS 1510-089 with Multi-Waveband Monitoring During Strong Gamma-Ray Activity / A. P. Marscher [и др.] // *ApJL*. — 2010. — февр. — т. 710, № 2. — с. L126—L131. — arXiv: [1001.2574](https://arxiv.org/abs/1001.2574) [[astro-ph.CO](#)].
14. *Antonucci, R. R. J.* Optical polarization position angle versus radio source axis in radio galaxies / R. R. J. Antonucci // *Nature*. — 1982. — окт. — т. 299, № 5884. — с. 605—606.
15. Failed Radiatively Accelerated Dusty Outflow Model of the Broad Line Region in Active Galactic Nuclei. I. Analytical Solution / B. Czerny [и др.] // *ApJ*. — 2017. — сент. — т. 846, № 2. — с. 154. — arXiv: [1706.07958](https://arxiv.org/abs/1706.07958) [[astro-ph.GA](#)].
16. *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](#)].

Шабловинская Елена Сергеевна

Исследование центральных областей активных галактик по наблюдениям в поляризованном свете

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

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

Типография _____

