

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Федянин

—
г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

*(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу **ЗОБНИНОЙ Дарьи Игоревны** на тему «**Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»*

Основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Зобниной Дарьи Игоревны «Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик» состоит из Введения, двух Глав, Заключения и Приложения. Полный объем диссертации составляет 159 страниц, включая 77 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 179 наименований.

Диссертация посвящена изучению свойств линейной поляризации излучения активных ядер галактик (АЯГ) на парсековых и субпарсековых масштабах, на которых находятся аккреционный диск и релятивистская струя. Эти внутренние области удалось прозондировать с помощью совместного использования радиоинтерферометрии и космического оптического телескопа Gaia, а также РСДБ-наблюдений больших выборок активных ядер галактик, состоящих из сотен источников.

В первой части работы были исследованы АЯГ с значимым сдвигом между положениями оптического центроида яркости и РСДБ и

использование данных об оптической поляризации дало возможность разделить вклады аккреционного диска и парсекового джета в полное оптическое излучение АЯГ. Для большого количества источников, принадлежащих к различным классам, была исследована переменность степени и положения поляризации в РСДБ-ядре и парсековом выбросе на различных временных масштабах с использованием карт индивидуальных наблюдений и усреднённых по всем эпохам наблюдений.

Во **Введении** приведены полное описание диссертации, обзор современного понимания феномена активных ядер галактик и результатов недавних исследований этих объектов на парсековых масштабах в радио- и оптическом диапазонах в полной интенсивности и линейной поляризации. Также в этом разделе обсуждаются актуальность, цели и задачи работы, ее новизна и значимость, описываются основные результаты работы в виде положений, выносимых на защиту, апробация результатов. Дана общая характеристика диссертации с указанием ее краткого содержания.

Первая глава работы посвящена анализу интегральной линейной поляризации в оптическом диапазоне активных ядер галактик со значимыми радио-оптическими сдвигами положений. Глава состоит из 6 разделов. В **Разделе 1.1** приводится обзор исследований источников с различием между положением, определенным в радиодиапазоне с помощью РСДБ, и координатами в оптическом, полученными по результатам наблюдений миссии GAIA. Такие сдвиги характерны для сравнительно большой доли АЯГ, около 9% для выборки каталога RFC (Radio Fundamental Catalogue).

В **Разделе 1.2** приводится описание используемых наблюдательных данных – выборки из 287 источников с значимыми сдвигами, у которых в опубликованной литературе была обнаружена информация об интегральных степени и направлении оптической линейной поляризации.

В **Разделах 1.3 и 1.4** описываются анализ поляризационных данных в оптическом диапазоне и описываются теоретические ожидания излучения от различных областей образования поляризованного оптического излучения в

АЯГ. Обсуждение результатов анализа свойств оптической поляризации приводится в **Разделе 1.5**. Основные выводы **Главы 1** приведены в **Разделе 1.6**. Использование данных об оптической поляризации дало возможность разделить вклады аккреционного диска и парсекового джета в полное оптическое излучение АЯГ.

Глава 2 посвящена изучению усредненной по эпохам линейной поляризации и ее переменности в парсековых выбросах активных ядер на частоте 15 ГГц. Введение в рассматриваемую тему приводится в **Разделе 2.1**.

В **Разделе 2.2** описано построение выборки рассматриваемых АЯГ. Для исследования усредненной по эпохам поляризации и ее переменности использовались данные, полученные в рамках программы мониторинга MOJAVE с длиной наблюдений более 20 лет и типичной скважностью около полугода. Были отобраны источники, для которых имеется не менее 5 эпох поляриметрических наблюдений на частоте 15 ГГц, всего 436 источников. Подавляющее большинство из них – блазары (59% являются квазарами с плоским спектром, 31% – лацертидами), остальные АЯГ – радиогалактики, сейфертовские галактики первого типа и объекты с неопределенным оптическим классом.

В **Разделе 2.3** описана процедура построения усредненных по эпохам изображений, а также карт переменности линейной поляризации.

В **Разделах 2.4 и 2.5** приводится анализ переменности направления поляризации в областях РСДБ-ядра и джета, как целого и исследование поведения переменности поляризации, а также медианной и усреднённой степени поляризации вдоль парсековой струи. Анализ карт усредненной по эпохам поляризации поперек парсековой струи обсуждается в **Разделе 2.6**. В **Разделе 2.7** суммируются выводы **Главы 2**.

В **Заключении** приводятся выводы и перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

В Приложении А приведены усредненные по эпохам изображения и карты переменности линейной поляризации на частоте 15 ГГц парсековых выбросов 15 АЯГ с наиболее богатой/протяженной поляризационной структурой.

Актуальность выполненной работы не вызывает сомнений. Поляриметрические исследования активных ядер галактик являются одним из основных способов получения информации о процессах, протекающих в близких окрестностях сверхмассивной чёрной дыры, прежде всего о магнитных полях, которые играют определяющую роль в экстракции энергии в АЯГ и в развитии и эволюции релятивистских джетов. Наблюдения в различных частотных диапазонах, прежде всего в оптическом и радио, позволяют исследовать различные области в АЯГ. Высокая точность новых астрометрических измерений миссии Gaia позволила построить выборку АЯГ с значимыми сдвигами между оптическими центроидами яркости и положениями максимумов РСДБ и изучить особенности поляризационных свойств таких источников, что позволило разделить вклады аккреционного диска и джета в оптическое излучение источника. Изучение постоянной компоненты линейной поляризации парсековых джетов по усреднённым картам и её переменности является актуальным, потому что позволяет исследовать изменение направления и степени упорядоченности магнитного поля, свойства турбулентности и непрозрачности излучения плазмы.

Наиболее важные и новые результаты. По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, все – в высокорейтинговом журнале MNRAS. Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также на астрофизическом семинаре АКЦ-ФИАН и семинаре отдела наблюдательной астрофизики ФИАН-МФТИ. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что

подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы. Новые результаты, представленные в диссертации:

Основные **результаты** работы заключаются в следующем:

1. Использование данных об оптической поляризации дало возможность разделить вклады аккреционного диска и парсекового джета в полное оптическое излучение АЯГ. Установлено, что источники со значимыми радио-оптическими сдвигами положений вниз по выбросу имеют бóльшую степень поляризации, чем объекты, у которых положение в оптическом диапазоне ближе к центральной машине. Этот результат подтверждает гипотезу о том, что аккреционный диск, доминирующий в полном оптическом излучении, смещает центроид Gaia-изображения ближе к началу джета и порождает сдвиг РСДБ – Gaia в этом направлении, а оптический протяженный выброс – наоборот, что способствует возникновению сдвига вниз по струе. Направление оптической поляризации сонаправлено с джетом у источников с радио-оптическими смещениями по течению выброса.

2. Направление поляризации в парсековом выбросе на частоте наблюдения 15 ГГц более стабильно, чем в РСДБ-ядре. Причиной более высокой переменности направления поляризации в РСДБ-ядре могут быть неразрешенные поляризованные компоненты и/или изгиб выброса. Также было показано, что переменность направления поляризации в РСДБ-ядрах квазаров выше, чем в лацертидах.

3. Анализ медианной и усреднённой степени поляризации, а также переменности направления поляризации на 15 ГГц вдоль парсекового выброса АЯГ показал, что с удалением от РСДБ-ядра степень поляризации увеличивается до значений 20% – 30%, а направление становится более стабильным. Вклад в эти тренды могут давать уменьшение фарадеевского вращения и угла закрутки магнитного поля, ослабление ударных волн и смягчение спектра излучающих частиц вниз по струе. Также уменьшение степени переменности направления поляризации вдоль джета указывают на

увеличение упорядоченности и стабильности направления магнитного поля с увеличением расстояния от РСДБ-ядра.

4. Распределения усредненной по эпохам степени и направления поляризации на 15 ГГц поперек парсековой струи оказались связаны. В квазарах степень поляризации имеет U- или W-образный профиль, а направление – либо перпендикулярно оси джета, либо сонаправлено с ней в центральном канале выброса и перпендикулярен ей на его краях. В лацертидах направление поляризации в основном параллельно джету, а поперечный профиль m – квазиплоский. Такие распределения указывают на существование спирального магнитного поля в струе и оболочку с полоидальным полем вокруг парсекового выброса, образующуюся в результате взаимодействия джета с окружающей средой.

Научное значение полученных в диссертации результатов состоит в том, что проведённый анализ оптических и радио наблюдений увеличивает степень нашего понимания процессов, протекающих в АЯГ в окрестности центральной сверхмассивной чёрной дыры, прежде всего даёт много информации о структуре магнитного поля и степени его упорядоченности в ядре и джете на масштабах парсека.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что разработанные в процессе ее выполнения методы и модели могут быть использованы другими авторами.

Замечания по содержанию диссертации.

1. Общее замечание: в тексте автор активно использует необщепотребительную терминологию, калькированную с англоязычной. Например, используется выражение «стековые карты» или «баис». В английском языке есть «stacked maps» и «statistical bias» и статьи, в которых участвовал автор, были написаны на английском, но в диссертации хотелось бы видеть нормальный перевод на русский.

2. Структура диссертации неоптимальна и работа кажется громоздкой. Для работы размером в 159 страниц двух глав явно недостаточно. Лучше было бы разбить минимум на три главы – по числу статей, на которых основана диссертация.

3. В работе используются 4 близких термина: «струя», «джет», «выброс», «истечение». Они используются вперемешку и не совсем понятно, описывают ли они одно и то же? Если бы в работе были введены определения этих базовых понятий или указано, что автор использует их как синонимы, то это позволило бы избежать этой неясности.

4. Для описания одного из подклассов блазаров используется термин «кварзары». Это также может вводить в заблуждение, так как кварзары могут и не быть блазарами. К блазарам относятся кварзары с плоским радиоспектром, которые составляют лишь часть от всего множества кварзаров. Стоило бы упомянуть, что в работе термин «кварзары» применяется к этому множеству АЯГ.

5. В работе практически везде аккуратно описываются статистические значимости обсуждаемых эффектов, но есть и исключения. Например, на стр. 20 говорится, что «медианное угловое расстояние между координатами в радио- и оптическом диапазонах составило ≈ 1.2 мсек дуги» без упоминания величины ошибки измерений. На стр. 23: «При этом медианная величина смещения РСДБ – Gaia равнялась 1.2 мсек дуги. Количество источников со значимыми радио-оптическими сдвигами положений составило примерно 900.» без описания оценки значимости.

6. В разделах 1.2 и 1.3 описывается процедура отбора источников со сдвигом вверх и вниз по джету и анализа значимости. Стр. 24: «Также предполагалось, что источник имеет сдвиг вниз по струе ($\Psi = 0^\circ$), если у него $\Psi \in (-45^\circ, +45^\circ)$, и вверх по джету ($\Psi = 180^\circ$), если $\Psi \in (180^\circ - 45^\circ, 180^\circ + 45^\circ)$ ». Стр. 27: «Значимость пика оценивалась, как доля реализаций, в которых количество источников с $-30^\circ < EVPA < 30^\circ$ больше, чем в случае

равномерного распределения.» Непонятно, почему отличаются пороговые величины?

7. Некоторые важные детали представлены как утверждения, без обоснования. Например, на стр. 46: «Ширина джета на таких изображениях зависит от продолжительности мониторинга АЯГ: чем дольше наблюдается источник, тем шире детектируется струя, пока не проявится вся ее поперечная структура.»

8. Недостаточно чётко описано влияние фарадеевского вращения на наблюдаемую поляризацию. Стр. 80: «В квазарах, в среднем, наблюдается более высокая мера фарадеевского вращения по сравнению с лацертидами». Внутренняя RM источника отличается от наблюдаемой в $(1+z)^2$ раз, необходимо чётко артикулировать о какой из мер вращения идёт речь? Авторы, очевидно, понимают это, так как в одном из анализов специально использовали ограничение по z : «Поскольку объекты данных оптических классов имеют разное распределение по z (Раздел 2.2 и Рисунок 2.4), то выбирались источники в таком диапазоне, чтобы медианы распределений квазаров и лацертид были близки. Это оказался диапазон по z от 0.15 до 0.5. В него попадают 29 квазаров и 25 лацертид. Значимой разницы между σ_{EVR} в данных источниках нет.», но не хватает описания этого эффекта в основном тексте работы.

9. Стр. 88: «Таким образом, возрастание σ_{EVR} с r_{along} является свидетельством увеличения стабильности направления магнитного поля вниз по струе.» Вместо «возрастания» по смыслу следует читать «уменьшение».

10. На картах поляризации поперек джета, например на рис. 2.35, видно, что степень поляризации на краях устремляется к величинам 60-80%, что близко к теоретически возможному пределу для электронов, распределённых по степенному закону в однородном магнитном поле. Стоило бы чуть больше внимания уделить обсуждению этого интересного результата.

11. Стр. 90: «РСДБ-наблюдения показывают, что старение способствует изменению спектрального индекса на ~ -0.6 в парсековых джетах АЯГ [121; 122]. Результатом этого является возрастание степени поляризации на ~ 0.1 ». Здесь было бы уместно привести характерные значения степени поляризации, спектрального индекса и показателя степени электронов.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация Д.И. Зобниной представляет значительный вклад в исследование релятивистских джетов от активных ядер галактик, в первую очередь свойств магнитного поля, оказывающем определяющее влияние на поведение джетов. Используя данные наблюдений в оптическом и радиодиапазонах, диссертант смог разработать метод разделения вкладов аккреционного диска и парсекового джета в полное оптическое излучение АЯГ. Анализ диссертантом наблюдений показал, что стабильность направления поляризации и степень поляризации растёт по мере удаления от ядра, что указывает на увеличение упорядоченности и стабильности направления магнитного поля. Было показано, что распределения усредненной по эпохам степени и направления поляризации на 15 ГГц поперек парсековой струи связаны, причем зависимости различаются для квазаров и лацертид. Эта установленная связь проливает свет на поперечное распределение магнитного поля в джете и его структуру.

Результаты диссертации опубликованы в 3 статьях в ведущем международном рецензируемом журнале и имеют на данный момент 28 цитирований, что указывает на научный и практический интерес в астрономическом сообществе.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Зобниной Дарьи Игоревны «Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия».

Отзыв составлен и принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 19 членов Совета из 28. Результаты голосования: «за» – 19; «против» – 0; «воздержалось» – 0. Протокол № 20 от «07» февраля 2024 г.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

К.А. Постнов