

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Зобниной Дарьи Игоревны «Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

Диссертационная работа Зобниной Д.И. посвящена многодиапазонному исследованию линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик (АЯГ) с использованием радиоинтерферических изображений (РСДБ) и оптических измерений космического телескопа Gaia. Актуальность исследования АЯГ не теряет своей остроты, в том числе и в свете относительно новых результатов, связывающих события их активности и прихода нейтрино сверхвысоких энергий (TeV-PeV). Очевидно, что многоволновые исследования природы центральных областей АЯГ необходимы для построения теории, рассматривающей их как эффективных ускорителей протонов. Получить информацию о физических условиях во внутренних областях АЯГ возможно, изучив переменность линейной поляризации парсековых джетов, так как это позволяет исследовать изменение направления и степени упорядоченности магнитного поля и физические свойства плазмы.

Настоящая работа посвящена решению задач поиска АЯГ со значимыми радио-оптическими сдвигами положений, исследования свойств оптической линейной поляризации и ее переменности в парсековых джетах. Целью работы является изучение конфигурации и степени упорядоченности магнитного поля релятивистской струи и их изменение вдоль и поперек струи. Диссертация состоит из Введения, двух глав, Заключения и одного приложения. Она изложена на 159 страницах, включает 77 рисунков и 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 179 источников.

Глава 1 посвящена детальному анализу интегральной линейной поляризации в оптическом диапазоне представительной выборки 287 АЯГ со значимыми радио-оптическими сдвигами положений, которые определены в радиодиапазоне с помощью РСДБ и в оптическом – по данным космического телескопа Gaia. Анализируются особенности и возможная причина таких сдвигов в системе “аккреционный диск – джет”. Подробно описаны используемые данные и порядок составления выборки исследования. Анализируются поляризационные данные в оптическом диапазоне для АЯГ, в которых обнаружено значимое смещение радио-оптика положений. Описываются наблюдаемая степень и направление поляризации парсековой релятивистской струи, аккреционного диска и пылевого тора, сравниваются с типичными теоретическими. Показано, что объекты со сдвигами положений РСДБ-Gaia вниз по струе имеют большую степень поляризации, чем источники с противоположным направлением. Результат интерпретируется в рамках вклада джета, аккреционного диска, полярных и экваториальных областей рассеяния излучения и пылевого тора в интегральную оптическую поляризацию. Обнаружено, что у большинства источников со сдвигами положений РСДБ-Gaia вниз по выбросу направление оптической поляризации сонаправлено с выбросом и это рассматривается как указание на крупномасштабное тороидальное магнитное поле струи. Результаты, полученные в Главе 1, опубликованы в работе [A1]. Научная значимость проведенного исследования заключается в исследовании структуры и физических условий в системе “аккреционный диск - джет”.

В **Главе 2** исследуется усредненная по времени линейная поляризация и ее переменность в релятивистских парсековых джетах выборки 436 АЯГ на частоте 15 ГГц обзора MOJAVE. Описана процедура построения усредненных по эпохам изображений, а также карт переменности линейной поляризации, получение стековых карт полной и поляризованной интенсивности, степени и направления поляризации. Также построены медианные изображения поляризационной интенсивности и степени поляризации. Диссертантом детально описал алгоритм обработки, картографирование, оценка поправок за смещение Райса, оценка неопределенностей полученных изображений на основе моделирования Монте-Карло.

Анализ РСДБ-карт распределений усредненной степени линейной поляризации АЯГ на 15 ГГц показал ее рост вниз по струе, что может быть вызвано укручением спектрального индекса, ослаблением ударных волн и уменьшением деполяризации. Установлено значимое возрастание степени линейной поляризации к краю струи и асимметричность поперечных профилей поляризационной интенсивности и степени поляризации, что рассматривается вследствие наличия тороидальной или спиральной конфигурации крупномасштабного магнитного поля джета. Исследование стековых РСДБ-карт направления линейной поляризации показало, что наблюдаются три основные характерные распределения: преимущественно вдоль хребтовой линии в пределах центрального канала струи, ортогонально выбросу по всей его ширине, и с постепенным поворотом электрического вектора от локального направления выброса в центральном канале к поперечному у его края. Эти результаты связываются с присутствием спирального магнитного поля, ассоциированного с выбросом, с возможным образованием сдвигового слоя и соответствующей оболочки с продольным полем в результате взаимодействия выброса с окружающей средой. Анализ РСДБ-карт переменности линейной поляризации 436 АЯГ выявил, что переменность направления поляризации в области РСДБ-ядра значимо выше, чем во внешних областях струи. Что может быть следствием искривленности струи в РСДБ-ядре или того, что компоненты с разным направлением поляризации в этой области не разрешаются. Установлены различия направление поляризации в РСДБ-ядрах разных типов АЯГ. Результаты, полученные в Главе 2, опубликованы в работах [А2, А3]. Представленный в исследовании анализ получен на основе интенсивного экспериментального материала, полученного в рамках крупного проекта по исследованию АЯГ - MOJAVE. Использование многоэпоховых измерений позволило учесть влияние переменности объектов на полученный результат.

Научная новизна результатов заключается в том, что впервые был составлен список АЯГ с яркими протяженными оптическими выбросами с использованием данных о линейной поляризации в оптическом диапазоне и о сдвиге радио-оптических положений. Впервые получена информация о конфигурации магнитных полей в релятивистских джетах объектов. На основе предложенного подхода предложен доминирующий источник оптического излучения. Впервые проведен массовый анализ переменности линейной поляризации на представительной выборке ярких АЯГ. Использование общего временного интервала измерений VLBA на масштабе 24 года с высокой скважностью дало возможность оценить переменность поляризации с высокой статистической значимостью.

Обоснованность положений, выносимых на защиту. Достоверность полученных результатов основывается на использовании измерений инструментов мирового класса, проведенными апробированными и стандартными астрономическими методами. Полученные результаты проверены стандартными статистическими методами (рандомизированный тест, бутстрап, Монте-Карло статистическое моделирование).

Диссертация изложена ясным научным языком, применяемые методы и алгоритмы описаны детально, используемые подходы четко обоснованы. Иллюстрации и таблицы в тексте Диссертация объективно сопровождают изложение. Цели диссертации, представленные во Введении, достигнуты, поставленные задачи решены, что отображено в выводах каждой главы. Работа заслуживает высокой оценки.

Замечания по содержанию работы:

1. *Глава 1.* Сдвиги положений объектов в оптике и радио авторы рассматривают с точки зрения физических условий в АЯГ (структура, излучение). При этом полно не раскрыта информация об ошибках измерений координат, например систематических. На стр. 21 указано, что “примерно у 2/3 источников погрешности были малы” без указания количественной меры, особенно оставшейся трети.

2. Глава 1. В работе рассматриваются объекты со значимым сдвигом радио и оптического положения. Используемые измерения РСДБ и Gaia проведены одновременно, информация о поляризации оптического излучения получена также в разные эпохи. Не обсуждается возможное влияние переменности излучения АЯГ на выявленные сдвиги. Обычно положение РСДБ ядра считается неизменным, а рождение новых компонент джета может его незначительно сдвигать. Об этом упоминается только в Главе 2, однако лучше об этом сказать в первой главе, где этот вопрос возникает сразу.

3. Глава 1, выборку исследования составляют АЯГ, распределенные в широком диапазоне красных смещений z . При рассмотрении средних сдвигов положений оптических координат и координат РСДБ-астрометрии используется угловая мера и не анализируется абсолютное расстояние в системе отчета источника, которое можно оценить, если известно z . Так как далее сдвиг положений оптика-радио связывается в т.ч. с особенностями структуры объекта, такая информация была бы полезной.

4. Глава 2, стр. 80, “В нашем исследовании кол-во источников больше и типичный временной интервал существенно шире, чем в [34]”. Также трудно сравнивать временной интервал измерений без перехода в систему отчета источников.

5. Глава 2, Выводы, стр. 7: “Такие наблюдаемые распределения поляризации указывают на спиральное магнитное поле в парсековой струе и возможное наличие оболочки ...”. Один из интересных выводов главы, но про него сказано мало. Здесь можно подкрепить результат уже известными ранее примерами, а анализ их структуры и поляризации (при наличии) мог бы подтвердить предположения автора.

Замечания к формулировкам:

1. Автореферат, Актуальность темы, предложение: “Квazarы типично находятся на больших красных смещениях...”. Квazarы детектируются в широком диапазоне красных смещений, по последним данным радиогромкие квazarы обнаружены на $z > 6$, поэтому медиана/среднее z у них больше, чем у других объектов. Но они также находятся и на малых красных смещениях.

2. Глава 1, п. 1.3, стр. 25. Выборка исследования разбивается на подвыборку квazarов и лацертид, хотя лацертиты могут быть квazarами. Или под квazarами подразумеваются блазары типа flat-spectrum radio quasars (FSRQ)?

3. Глава 1. Часто по тексту встречаются качественные оценки, которые не подкреплены количественной мерой (средние или диапазонные): “малы”, “с большей точностью”.

4. Глава 2: Баис → байес.

5. Глава 2, стр. 46, фраза “Подавляющее большинство исследуемых АЯГ наблюдаются под малым углом к лучу зрения” → “Релятивистский джет подавляющего большинства исследуемых АЯГ ориентирован близко к лучу зрения наблюдателя”.

6. Глава 2, стр. 93: плотность потока → спектральная плотность потока.

7. Работа состоит из двух больших глав, что вызывает трудности при чтении для восприятия ее содержания. Оптимальным было бы разбиение работы на три главы.

Вышеизложенные замечания не влияют на полученные в диссертационном исследовании результаты, их значимость и достоверность.

Полнота представления результатов. Результаты диссертации полностью отражены в трех публикациях и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Результаты, выносимые на защиту, опубликованы в трех статьях в высокорейтинговом научном издании первого квартиля. Вклад соискателя в публикации соизмерим с вкладом остальных соавторов и объективно отражен в диссертации. В одной из работ, посвященной переменности линейной поляризации в АЯГ, соискатель является первым автором. Актуальность и значимость полученных результатов подтверждается большим числом цитирований работ. Работа, опубликованная в 2020 г., имеет 15 цитирований и две работы, опубликованные в 2023 г., имеют 4 и 11 цитирований (самоцитирования исключены). В

открытом доступе (VizieR Online Data Catalog) опубликованы два каталога измерений поляризационных свойств исследуемых АЯГ. Результаты, выносимые на защиту, апробированы на 9-ти российских и международных конференциях.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Заключение. Диссертация Зобниной Дарьи Игоревны «Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик» является законченным и самостоятельным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне. Диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением ВАК РФ о порядке присуждения степени кандидата наук, а соискатель Зобнина Дарья Игоревна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».


Официальный оппонент


Сотникова Ю.В.

Сотникова Юлия Владимировна
кандидат физико-математических наук,
01.03.02 - "Астрофизика и радиоастрономия"
заместитель директора по научной работе

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
п. Нижний Архыз,
Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская республика,
Россия 369167
Телефон: +7(87878) 46336
Факс: +7(87878) 46315
lacerta999@gmail.com

11 марта 2024 г.

Подпись Ю.В. Сотниковой удостоверяю:

ученый секретарь САО РАН
кандидат физ.-мат. наук

Е.И. Кайсина