

Российская академия наук
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Астрокосмический центр

На правах рукописи

КРАВЧЕНКО Евгения Васильевна

**МНОГОЧАСТОТНЫЕ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
В АКТИВНЫХ ЯДРАХ ГАЛАКТИК**

Специальность 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Астрокосмическом центре (АКЦ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) Российской Академии наук (РАН), г. Москва

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН, заведующий лабораторией внегалактической радиоастрономии АКЦ ФИАН

КОВАЛЕВ Юрий Юрьевич

Официальные оппоненты:

ВЕРХОДАНОВ Олег Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиоастрофизики Специальной астрофизической обсерватории РАН, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика РФ

ЛАРИОНОВ Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий лабораторией наблюдательной астрофизики Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга), г. Москва

Защита состоится «23» мая 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность темы и современное состояние исследований

Активные ядра галактик (АЯГ), включающие в себя квазары, лацертиды, сейфертовские и радиогалактики, являются ярчайшими нетранзиентными объектами Вселенной [1]. Они доступны для наблюдений с очень больших расстояний благодаря огромному энерговыделению вплоть до приблизительно 10^{47} эрг/с, возникающему в их недрах. Нетепловые механизмы делают АЯГ видимыми во всем электромагнитном спектре: от радио до гамма-диапазона. Благодаря этим свойствам, активные ядра галактик используются для исследования структуры и эволюции Вселенной, изучения межгалактического вещества и магнитных полей, а с недавнего времени в системах глобального позиционирования и для прогнозирования космической погоды.

Являясь уникальными астрофизическими лабораториями, эти объекты активно изучаются на протяжении более чем 50 лет, с момента создания первых каталогов космических радиоисточников в 1959 г. [2]. Основополагающие работы, теоретически описывающие природу и физические процессы в АЯГ, появились в 1977–1979 гг. [3] Тем не менее, детальная картина динамики этих объектов начала проясняться только в последнее десятилетие, например, [4]. Согласно современному пониманию, АЯГ представляют собой компактные области в центрах далеких галактик. При этом их активность вызвана падением вещества на центральную сверхмассивную черную дыру (ЧД, [5]), сопровождающимся формированием биполярных выбросов (струй, джетов). Они представляют собой высоко коллимированные потоки плазмы, движущиеся с ультрарелятивистскими скоростями [6]. Большинство релятивистских струй радиогромких АЯГ видны земному наблюдателю под малыми углами зрения [7]. Релятивистские эффекты усиливают измеряемую наблюдателем плотность потока движущейся релятивистской плазмы, в результате чего в спектре и на радиоизображениях этих источников доминирует излучение струй. Те же эффекты ответственны за наблюдаемое сверхсветовое движение деталей струй [8] и экстремально высокие яркостные температуры [9]. Более того, АЯГ демонстрируют переменность излучения во всем электромагнитном спектре на масштабах от нескольких минут [10] до десятилетий [11]. А также показывают высокую степень линейной поляризации в радиодиапазоне [12].

Несмотря на активные продолжительные исследования, единого мнения о механизмах и свойствах активности АЯГ нет. Остаются неясными особенности и условия формирования АЯГ. Какие механизмы порождают их активность, а именно, какой процесс запускает формирование струйных выбросов? Каков состав струй, как они ускоряется до ультрарелятивистских скоростей и фокусируются? Существенным также является вопрос о роли магнитного поля в

АЯГ. Актуальными остаются вопросы о механизмах излучения струй на разных длинах волн [13], как и то, где именно рождается и как распространяется это излучение. Например, широкоизвестные модели АЯГ [14] неспособны объяснить новые результаты назмено-космического радиоинтерферометра Радио-Астрон [15; 16]. Наблюдаемые в проекте высокие яркостные температуры АЯГ [13] требуют привлечения таких моделей, как протонные релятивистские струи [17] или когерентное излучение [18]. Эти модели также успешно решают проблему генерации высокочастотного излучения АЯГ ($\gtrsim 10^{16}$ Гц, [19]), в том числе космических лучей сверхвысоких энергий [20].

Активно развивающиеся исследования свойств и физических параметров АЯГ существенно продвинуло наше понимание об их природе. Параллельно с этим существенно возросли возможности наблюдений, в связи с чем стали доступны наблюдения одновременно в нескольких диапазонах частот с очень высоким спектральным разрешением. Наблюдения показывают, что области, находящиеся в непосредственной близости от ЧД (доли парсек), имеют напряженности магнитных полей приблизительно единицы Гаусс [21; 22]. При этом формирование струй АЯГ происходит уже на расстоянии нескольких гравитационных радиусов от центра АЯГ [23]. Современные теоретические модели этих объектов согласуются с этими выводами, и отводят магнитным полям значительную роль в формировании и распространении струйных выбросов АЯГ [24], предсказывая напряженность магнитных полей около 10^2 – 10^4 Гс в окрестности ЧД [25; 26]. Вместе с этим модели протонных струй АЯГ или когерентного излучения требуют существования магнитных полей напряженностью 10^6 – 10^9 Гс. Такие области будут проявлять себя экстремально большими фарадеевскими мерами вращения ($\gtrsim 10^6$ рад/м²). Регистрация таких величин мер вращения в нескольких АЯГ (например, $(9.4 \pm 0.4) \times 10^6$ рад/м² в квазаре PKS 1830–21 [27]) может указывать на реальность этих моделей.

Единого мнения о структуре и геометрии магнитных полей в центральных частях и джетах АЯГ также не существует: остается неизвестным, преобладает ли турбулентное [28–30] или упорядоченное, широкомасштабное поле [31–33]. Какова геометрия и структура магнитных полей, формируются ли плазменные неустойчивости и релятивистские ударные волны в струях [34] и какое влияние они оказывают на магнитные поля?

Наличие магнитных полей в окружающей струю среде и в самом веществе джета оказывает влияние на распространение излучения до наблюдателя, приводя к появлению частотно-зависимых и поляризационных эффектов [35]. Среди прочих, это фарадеевское вращение плоскости поляризации волны и деполяризация излучения. Вместе с другими эффектами, например, релятивистской абберацией, эти явления искажают видимые наблюдателю характеристики излучения. Поскольку поляризационные радиоинтерферометрические исследова-

ния требуют большого наблюдательного времени и дополнительных усилий для калибровки данных, многие современные работы выполняются без учета этих эффектов, например, [12]. Помимо этого многие авторы рассматривают неодновременные поляриметрические наблюдения АЯГ на разных частотах, например, [36]. Такой анализ может привести к ошибочным результатам и интерпретации наблюдательных данных. Вопрос о локализации и свойствах вещества, в котором образуется фарадеевское вращение и происходит деполяризация излучения, также остается открытым [37]. Наиболее вероятно, это может быть область формирования узких эмиссионных линий, внешняя оболочка струи, вещество нашей Галактики и пр. Существенное преимущество этих поляризационных эффектов состоит в сильной зависимости от длины волны, вследствие чего они могут быть изучены посредством многочастотных наблюдений.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ, [38]) является уникальным инструментом для исследования АЯГ, поскольку реализуемое высокое угловое разрешение этих наблюдений позволяет изучать структуру и кинематику АЯГ в деталях. Проведение многочастотных РСДБ наблюдений дает дополнительную возможность изучать эти объекты одновременно на различных пространственных масштабах. Анализ РСДБ изображений, в том числе поляризационных данных, совместно с результатами наблюдений в других диапазонах и на других инструментах, является основополагающим в современном изучении физики и свойств релятивистских струй АЯГ. Яркое подтверждение этому – недавние наблюдения VL Lacertae наземно-космическим интерферометром РадиоАстрон [16], в результате которых исследована поляризационная структура струи АЯГ с рекордным угловым разрешением 21 микросекунда дуги.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы являются исследования структуры и физических характеристик АЯГ на парсековых масштабах, а именно:

- локализация и оценка физических параметров теплового замагниченного вещества АЯГ;
- восстановление, анализ структуры и свойств магнитных полей АЯГ;
- локализация области генерации гамма- и радиоизлучения и изучение особенностей их распространения вдоль релятивистских струй АЯГ;
- исследование временной переменности характеристик АЯГ и ее связь с активностью источника.

Конкретные задачи исследования

Достижение поставленных целей включает в себя решение следующих задач:

- исследование распределения и особенностей фарадеевского вращения в АЯГ на сантиметровых волнах, в том числе изучение вопроса о местоположении вещества, образующего вращение;
- поиск больших и экстремально больших мер вращений в АЯГ;
- проведение исследований структуры и физических условий в АЯГ, характера и геометрии их магнитных полей посредством анализа величины и направления линейной поляризации;
- проверка предсказаний моделей АЯГ о физических процессах в их внутренних областях;
- исследование природы и свойств временной переменности АЯГ.

Методы исследования

Данная работа основана на обработке и анализе наблюдательных данных с использованием актуальных возможностей радиоинтерферометрии и современных методов исследований. Среди прочих это методы поляриметрии, картографирования фарадеевского вращения и синтеза фарадеевских мер вращения, кросс-корреляции данных, моделирование структуры источника, подгонка модельных предсказаний под наблюдаемые данные и оценка достоверности результатов анализа и др.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Получены новые радиоинтерферометрические карты фарадеевской меры вращения для 21 активного ядра галактики на сантиметровых волнах. Максимальная измеренная мера вращения в системе отсчета источника составила $(1.80 \pm 0.09) \times 10^4$ рад/м² в квазаре 3С 48. Обнаружено наличие переменности фарадеевской меры вращения на масштабах месяцев и лет в квазарах S4 1030+611, 3С 138 и 1655+077. Результаты свидетельствуют о зависимости временной переменности меры вращения и фазы активности струй, то есть о связи с их внутренними свойствами. Локализовано расположение тепловой замагниченной плазмы, служащей источником образования фарадеевского вращения, относительно областей генерации синхротронного излучения в струйных выбросах: это вещество представляет собой один или несколько внешних фарадеевских экранов, располагающихся в непосредственной близости от релятивистского джета активного ядра галактики. Показано, что этим экраном может быть внешняя оболочка струйного выброса активного ядра галактики. В джетах квазаров 0148+274, 0952+179, 1004+141, 1219+285, 1458+718, 1642+690 и 2201+315 обнаружены значимые поперечные градиенты фарадеевского вращения. Это является косвенным подтверждением наличия регулярного спиралевидного магнитного поля во внешних областях струй.

2. Определены действующие деполяризационные механизмы и физические свойства вещества, окружающего релятивистские струи 18 активных ядер галактик, на основе РСДБ исследований поляризационных свойств объектов в диапазоне 1.4–15 ГГц. Результаты указывают на то, что вещество, ответственное за фарадеевское вращение и деполяризацию излучения, может иметь неоднородную структуру и содержать упорядоченные магнитные поля с доминированием хаотично ориентированной компоненты. Построены новые РСДБ карты ориентации истинного позиционного угла электрического вектора линейной поляризации 18 активных ядер галактик в интервале частот от 1.4 до 15 ГГц. Анализ распределения истинного поляризационного угла вдоль струи показывает простую поляризационную конфигурацию в половине рассматриваемых активных ядер галактик, в то время как остальные источники проявляют сложную поляризационную структуру. Это случаи поворота поляризационного угла в видимом начале и вдоль по струе, в том числе скачки на 90° , различие направления линейной поляризации в «сердцевине» джета и по его краям. Детальное рассмотрение каждого источника показывает, что наличие регулярных тороидальных и полоидальных магнитных полей, сохраняющих свое направление от единиц до сотен парсек, может объяснить проявляемую сложную поляризационную структуру активного ядра галактики. Для некоторых источников получены указания на существование турбулентных магнитных полей и таких механизмов, как ударные волны и плазменные неустойчивости. По результатам анализа структура струйных выбросов активных ядер галактик может быть рассмотрена в виде «сердцевины» и окружающей ее оболочки. В таком представлении фарадеевское вращение и деполяризация излучения происходят во внешних слоях струи (оболочке), а в ее «сердцевине» генерируется синхротронное излучение. При этом магнитные поля в этих областях могут отличаться свойствами и ориентацией. Такая модель способна объяснить все проявляемые поляризационные свойства исследуемых источников.

3. Успешно опробован метод синтеза фарадеевских мер вращения на наблюдениях галактического магнетара J1745–2900, выполненных на телескопе VLA в диапазоне 40–48 ГГц. Подтвержден потенциал метода для поиска и исследований больших и экстремально больших фарадеевских мер вращения в активных ядрах галактик.

4. Проведены исследования структуры, геометрии и кинематики струи активного ядра галактики S4 1030+61 после яркой гамма-вспышки по комплексному анализу наблюдений источника в радио- и гамма-диапазонах. Получены РСДБ карты полной интенсивности и ориентации вектора линейной поляризации струи объекта. В рамках модельных предположений определены физические параметры объекта: установлена зависимость распределения плотности электронов, напряженности магнитного поля и ширины джета от расстояния

вдоль струи, произведена оценка напряженности магнитного поля в области ядра и проведен анализ поведения яркостной температуры во времени и с расстоянием вдоль струи, определены поляризационные свойства ядра квазара. Выявлены изменения физических условий в начале релятивистской струи, сопутствующие активности квазара в гамма- и радио-диапазонах: мощная гамма-вспышка сопровождается вбросом вещества в начало струи, компрессией магнитного поля и возможным изменением направления распространения струйного выброса. Локализована область генерации гамма-излучения, которая находится в радиоджете на расстоянии нескольких парсек от центральной машины АЯГ.

Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна работы состоит в том, что анализ и результаты работы проведены и получены либо впервые для отдельных источников в соответствующем диапазоне длин волн, либо впервые в таком детальном виде. В частности впервые получены карты фарадеевского вращения для 21 активного ядра галактики, показывающие распределение меры вращения в струях объектов на масштабах парсек. Для 18 из этих источников впервые получены одновременные поляризационные спектры в ядрах и оптически прозрачных компонентах выбросов и построены карты истинного направления линейной поляризации вдоль их струй посредством аккуратной коррекции за фарадеевское вращение. Сложность проведения и анализа поляриметрических наблюдений, получаемых одновременно в широком диапазоне частот, приводит к тому, что выполненные другими авторами исследования ориентации магнитных полей АЯГ произведены без учета фарадеевского вращения, либо мера вращения оценена по неодновременным данным на разных частотах. Поляризационных многочастотных РСДБ исследований АЯГ, подобно нашим, опубликовано единицы, а изучаемых таким образом объектов – малое количество, например [39; 40]. В данной работе подробно рассматриваются и учитываются также тонкие поляризационные эффекты внутри источника, искажающие наблюдаемые характеристики линейно поляризованного излучения активных ядер галактик, что представляет собой важнейшую ценность проведенных исследований. В результате оценены и изучены физические условия и геометрия магнитных полей в разных областях АЯГ. Полученная информация значительно дополняет существующие исследования физических условий и особенностей АЯГ.

С помощью комплексного анализа квазара S4 1030+61 в гамма- и радиодиапазонах впервые проведено детальное исследование структуры, кинематики и свойств этого объекта. Определен ряд параметров струйного выброса квазара. Локализована область генерации высокоэнергетического излучения, изучены особенности распространения излучения по струе S4 1030+61, а также выявле-

ны сопутствующие гамма-вспышке изменения физических условий в ядре джета: увеличение плотности плазмы, сжатие силовых линий магнитного поля и возможное изменение направления распространения струи.

Научная ценность и практическая значимость работы заключается в получении новых и важных сведений о свойствах струйных выбросов АЯГ, которые будут использованы в дальнейшем изучении АЯГ. На заложенных в работе идеях и отработанных методиках анализа нами уже начато новое направление исследований по поиску экстремально больших фарадеевских мер вращения. Потенциальная регистрация таких мер вращения даст возможность существенно продвинуться в вопросе состава и механизма излучения релятивистских выбросов. Это позволило бы подтвердить и развить модели АЯГ с протонными струями или когерентным механизмом излучением [18], привлекаемые для объяснения результатов, получаемые в рамках наблюдений АЯГ [13] наземно-космическим радиоинтерферометром РадиоАстрон.

Во время выполнения исследований по теме диссертации изучено влияние искажения поверхности радиоантенн VLA под действием силы тяжести на результаты поляризационных измерений антенной решеткой VLA. Это позволило разработать и внедрить в пакет обработки данных Orbit [41] новую методику калибровки поляриметрических данных, т.н. «дифференциальную инструментальную калибровку». Результаты и особенности этого анализа описаны В. Д. Коттоном в соавторстве с диссертантом в одном из номеров [42] технической документации Orbit.

Достоверность результатов

Достоверность проведенных исследований и представляемых результатов основана на использовании современных телескопов и интерферометров, зарекомендовавших надежность своей работы и достоверность результатов в рамках исследований, выполняемых учеными со всего мира; использовании современных методик обработки, анализа данных и проверки достоверности статистических гипотез. Результаты проведенных исследований доложены на всероссийских и международных конференциях с участием ведущих ученых, и опубликованы в ведущих международных журналах и изданиях.

Апробация результатов

Исследования, изложенные в работе, отмечены премией им. Д. В. Скобельцина учебно-научным комплексом ФИАН в 2016 г. Результаты диссертации обсуждались и были представлены на семинарах и научных сессиях Астрокосмического центра ФИАН, а также на 6 научных конференциях в России и 8 международных научных конференциях за рубежом:

1. Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пушино (2013).
2. The innermost regions of relativistic jets and their magnetic fields, Гранада, Испания (2013).
3. XIII Одесская Гамовская Астрономическая Конференция – школа «Астрономия на стыке наук: астрофизика, космомикрoфизика, космология и гравитация, радиоастрономия и астробиология», Одесса, Украина (2013).
4. Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная», Санкт-Петербург (2013).
5. 5-ая Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные вопросы и инновационные аспекты современной физики», Москва (2013).
6. IAU Symposium 313 «Extragalactic jets from every angle», Галапагосские острова, Эквадор (2014).
7. 12 European VLBI Network Symposium, Кальяри, Италия (2014).
8. Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics, Краков, Польша (2015).
9. 5th Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum Radio Sources, Римини, Италия, (2015).
10. Мини-симпозиум «Задачи обсерватории Миллиметрон», Пушино (2015).
11. 6-ая Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва (2015).
12. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва (2015).
13. Blazars through Sharp Multi-Wavelength Eyes, Малага, Испания (2016).
14. 13th European VLBI Network Symposium, Санкт-Петербург (2016).

Публикации по теме диссертации

Все результаты диссертации опубликованы в рецензируемых ведущих зарубежных журналах и тезисах всероссийских и международных конференций. Всего имеется 14 научных публикаций, в том числе 4 статьи А1–А4 с основными результатами, выносимыми на защиту, в журналах, входящих в список Web of Science Core Collection и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Министерстве образования и науки РФ.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1. Cotton W. D., **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Fomalont E. *Search for Extreme Rotation Measures in CSS Sources // Astron. Nachr.* – 2016. – Vol. 337. – P. 87–90.
- A2. **Kravchenko E. V.**, Cotton W. D., Yusef-Zadeh F., Kovalev Y. Y. *Rotation Measure synthesis study and polarized properties of PSR J1745-2900 at 7 mm*

// Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – Vol. 458. – P. 4456–4461.

- A3. **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Hovatta T., Ramakrishnan V. *Multi-wavelength observations of the γ -ray flaring quasar S4 1030+61 in 2009-2014* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – Vol. 462. – P. 2747–2761.
- A4. **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V. *Parsec-scale Faraday rotation and polarization of 20 AGN jets* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2017. – Vol. 467. – P. 83–101.

Другие публикации автора по теме диссертации:

- B1. **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V. *Faraday rotation measures in 20 AGN jets at parsec scales* // Europ. Phys. J. Web Conf. – 2013. – Vol. 61. – P. 07006.
- B2. **Кравченко, Е. В.**, Ковалев, Ю. Ю., Соколовский, К. В. *Вращение в струях двадцати активных галактических ядер на парсековых масштабах* // Тезисы докладов на Всерос. астрон. конф. «Многоликая Вселенная», Санкт-Петербург, 23-27 сентября, 2013. – Санкт-Петербург: Изд-во ООО «Сборка», 2013. – С. 156–157.
- B3. **Кравченко Е. В.**, Ковалев Ю. Ю., Соколовский К. В. *Фарадеевское вращение в струях двадцати активных галактических ядер на парсековых масштабах* // Сб. тр. ФИАН: 5-ая Всерос. мол. конф. «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, 10–15 ноября 2013. – Москва: Изд-во физ. инст. акад. наук, 2013. – С. 210.
- B4. **Kravchenko E. V.**, Cotton W. D., Kovalev Y. Y. *Rotation measures in AGN jets seen by VLA at 21 cm to 6 mm* // Proc. In. Astron. Union.: IAU Symposium «Extragalactic jets from every angle». – 2015. – Vol. 313. – P. 128–132.
- B5. **Kravchenko E. V.** *Multi-wavelength observations of blazar 1030+611 in its flaring state during 2008–2014* // Abstract book of the 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, Cagliari, Italy, 7-10 october, 2014. – Cagliari: Published by Istituto di Radioastronomia INAF, 2014. – P. 22. – http://evn2014.oa-cagliari.inaf.it/EVN2014/EVN2014_AbstractBook.pdf.
- B6. **Kravchenko E. V.** *Depolarization and Faraday Effects in 20 AGN Jets from 1.4 to 15 GHz* // Abstract book of the conference «Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics», Krakow, Poland, 20-24 april, 2015. – Krakow: Published by Jagiellonian University, 2015. – P. 41.

- B7. **Кравченко Е. В.** *Исследование квазара 1030+611 в 2008–2014 гг. в радио и γ диапазонах* // Сб. тр. ФИАН: 6-ая Всерос. мол. конф. «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, 15–20 ноября 2015. – Москва: Изд-во физ. инст. акад. наук, 2015. – С. 148. – http://sites.lebedev.ru/modules/show_image.php?id=5156.
- B8. **Кравченко Е. В.** *Многоволновое исследование γ -яркого квазара 1030+611 во время его активного состояния в 2008–2014 гг.* // Тезисы докладов на конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва, 21-24 декабря, 2015. – Москва: Изд-во инст. космич. исслед. Рос. акад. наук, 2015. – С. 52. – <http://hea.iki.rssi.ru/conf/hea2015/book.pdf>.
- B9. **Kravchenko E. V.** *Radio and gamma-ray study of the quasar S4 1030+61 during its activity in 2009–2014* // Abstract book of the conference «Blazars through Sharp Multi-Wavelength Eyes», Malaga, Spain, 30 may – 3 june, 2016. – Granada: Published by Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC, 2016. – P. 55. – <http://jets2016.iaa.es/sites/default/files/imagecache/Program%26Abstracts.pdf>.
- B10. **Kravchenko, E. V.** *Linearly polarized properties and rotation measure study of parsec-scale AGN jets* // Abstract book of the 13th European VLBI Network Symposium, Saint Petersburg, 20-23 september, 2016. – Saint Petersburg: Published by Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 2016. – P. 23. – http://www.ipa.nw.ru/EVN2016/data/EVN2016_Book.pdf.

Личный вклад автора в совместные работы

Диссертант совместно с соавторами и научным руководителем участвовал в постановке задач исследований и методов их решения, анализе, интерпретации и обсуждении результатов, а также формулировке выводов работы. При этом во всех основных результатах, которые выносятся на защиту, личный вклад автора является основным и определяющим. Диссертант лично или при участии коллег провел следующие работы:

1. Произведен сравнительный анализ результатов, получаемых методами линейной аппроксимации поляризационного угла от квадрата длины волны и фарадеевским синтезом мер вращений для трех квазаров, наблюдаемых в рамках проекта «ТСАЛ0004» на VLA. Им построены карты фарадеевского вращения для всех исследуемых источников и выполнен анализ распределения меры вращения вдоль струй рассматриваемых объектов. Диссертант принимал равное участие с соавторами в обсуждении и интерпретации результатов анализа, в том числе в подготовке публикации [A1].

2. В работе [B4] самостоятельно выполнена вся пост-корреляционная калибровка, обработка и анализ архивных данных наблюдений семи активных ядер галактик (проект «TROL0003» на VLA). Интерпретация результатов выполнена совместно с научным руководителем.
3. Участие в первичной обработке и в дальнейшем анализе наблюдений центра Галактики, выполненных интерферометрической решеткой VLA на частотах 40–48 ГГц в рамках проекта «SE0824F» в 2014 г. Совместно с коллегами усовершенствована поляризационная калибровка в пакете Orbit для учета влияния деформации антенн решетки на получаемые поляризметрические наблюдения. Диссертантом самостоятельно проведен поляризационный анализ и опробован метод фарадеевского синтеза мер вращения к наблюдательным данным магнетара J1745–2900, а также написан текст статьи. При этом интерпретация физической природы фарадеевского экрана магнетара выполнена соискателем в соавторстве с коллегами. Результаты этого исследования опубликованы в работе [A2].
4. Обработка и анализ многочастотных данных наблюдений активного ядра галактики S4 1030+61 в рамках проекта «S2087E». А именно, проведение пост-корреляционной калибровки многочастотных данных VLBA, моделирование кривой блеска в диапазоне 15 ГГц, полученной на 40-м телескопе OVRO, и сравнительный анализ этих данных с данными наблюдений, полученных в рамках программ мониторинга MOJAVE и *Fermi*. Автором лично проанализированы физические характеристики и особенности источника в радио- и гамма-диапазонах. Все результаты и их интерпретация, полное оформление содержания и написание текста статьи [A3] и публикаций [B5;B7-B9] выполнены автором самостоятельно.
5. Совместно с научным руководителем равное участие в постановке задач исследования поляризационных особенностей струй 20 АЯГ, наблюдавшихся радиоинтерферометром VLBA в проекте «BK134». Диссертант самостоятельно провел поляризационную калибровку и обработку данных, а также анализ и интерпретацию результатов. Им выполнено оформление полученных результатов, в том числе подготовлена статья [A4] и публикации [B1-B3;B6;B10].

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 188 страниц, включая 27 рисунков и 14 таблиц. Список цитируемой литературы включает 240 наименований, объемом 22 страницы.

Краткое содержание работы

Во Введении представлено общее описание диссертации, приведено современное состояние исследований активных ядер галактик, обосновывается актуальность исследования; обсуждается тема, цели и задачи работы по изучению физических свойств радиогромких АЯГ, видимых наблюдателю под малым углом зрения; а также приводятся выносимые на защиту основные результаты исследования.

В Главе 1 «Радиоинтерферометрия. Методы наблюдений, обработки и анализа данных» рассмотрен принцип работы радиоинтерферометров, особенности и основные методы обработки и анализа получаемых на них наблюдательных данных. В том числе приводится описание и принцип работы систем апертурного синтеза VLBA и VLA, с помощью которых получена большая часть данных наблюдений, составляющих основу данной диссертации (§1.2–1.3). Тут же рассмотрены основные шаги пост-корреляционной калибровки радиоинтерферометрических данных, в том числе поляриметрических наблюдений (§1.4–1.5). В §1.6–1.8 рассмотрены базовые методы анализа данных.

В Главе 2 «Фарадеевское вращение в активных ядрах галактик» представлены результаты исследования распределения фарадеевской меры вращения (МВ) в АЯГ и анализа местоположения и свойств среды, являющейся источником этого вращения. Материал данной главы основан на исследовании свойств 31 источника в рамках анализа четырех экспериментов, выполненных на радиоинтерферометрах VLA и VLBA в радиодиапазоне 1.4–48 ГГц. Содержание и результаты главы следуют работам [A1; A2; A4; B1–B4; B10].

Фарадеевская мера вращения (см. §2.1) определяется физическими свойствами среды: плотностью частиц, напряженностью компоненты магнитного поля вдоль луча зрения и размером области. Из наблюдений ее величину можно измерить по зависимости позиционного угла электрического вектора (EVPA) линейной поляризации излучения от квадрата длины волны (λ^2).

Для выделения МВ, создаваемой АЯГ и его окрестностями, из наблюдаемой величины МВ необходимо вычесть вклад Галактики и межгалактического вещества. Образованная межгалактической средой МВ составляет единицы рад/м² и учет ее вклада не производился. Фарадеевское вращение в Галактике существенно больше и доходит до сотен рад/м². Галактическую МВ для произвольного источника можно определить, например, с помощью каталога Тэйлора и др. [43].

Методика построения карт фарадеевского вращения (§2.2) включает приведение рассматриваемых диапазонов частот к одному пространственному разрешению, их совмещение по положению оптически прозрачного компонента струи и определение МВ линейной аппроксимацией зависимости EVPA от λ^2 в каж-

дом пикселе карт. Исследуемый радиодиапазон разбивался на участки, в которых зависимость EVPA от λ^2 имеет линейное поведение. Проблема с измерением поляризационных углов с точностью до добавки $\pm 180^\circ \cdot n$ (n – количество оборотов) решается минимизацией χ^2 . Результаты анализа экспериментальных данных приведены в §2.3–2.7.

Отработка методики анализа поляриметрических РСДБ данных выполнена с использованием трехкратных наблюдений семи ярких и компактных АЯГ: DA 193, 0710+439, OI 061, OJ 287, 4C +39.25, 3C 279, OP 313 (§2.3) на телескопе VLA в диапазоне 1.4–43.4 ГГц. В большинстве случаев EVPA сложно меняется с λ^2 , увеличивая свое вращение на более коротких волнах таким образом, что $MB \propto \nu^{1.6 \pm 0.1}$. Анализ многократных наблюдений показывает временную переменность фарадеевского вращения на масштабах месяцев и лет. Данные выводы не выносятся на защиту, однако подтверждаются результатами, полученными в других параграфах диссертации (§2.4–2.6).

Более детальное изучение особенностей MB АЯГ выполнено по анализу однократных наблюдений квазаров 3C 48, 3C 138 и 3C 147 на телескопе VLA в диапазоне 18–48 ГГц (§2.4). В течении суточной длительности сеанса эксперимента достигнута высокая чувствительность, что позволило исследовать слабые плотности потока поляризованного излучения. В результате, впервые были получены карты распределения фарадеевского вращения вдоль выбросов этих источников на таких высоких частотах. Получены следующие измерения MB в центральных областях этих объектов: (9671 ± 484) рад/м² в 3C 48, $-(3224 \pm 101)$ рад/м² в 3C 138 и $-(1509 \pm 7)$ рад/м² в 3C 147. Максимальная MB, измеренная в системе покоя источника, составила $(1.80 \pm 0.09) \times 10^4$ рад/м² в квазаре 3C 48. Сравнение этих величин с результатами работ других авторов показывают, что наши высокочастотные наблюдения разрешают структуру фарадеевского экрана в 3C 48 и 3C 138, которая не видна в наблюдениях на более длинных волнах. При этом MB 3C 147 сохраняет свою величину на протяжении приблизительно 25 лет. Данные результаты указывают на неоднородность фарадеевского экрана этих АЯГ, физические параметры которого медленно или вовсе не меняется во времени. Наблюдаемое фарадеевское вращение вызывает поворот плоскости поляризации электромагнитной волны на частоте 20 ГГц больше 50° , что возможно только на внешнем экране. Вероятно, это вращение образуется в области формирования узких эмиссионных линий. Оценка напряженности магнитного поля в этой области составляет единицы–десятки мкГс при использовании измеренного фарадеевского вращения $\geq 4 \times 10^3$ рад/м² в системе отсчета источника, и в предположении плотности плазмы этой среды 10^3 см⁻³, объемного фактора заполнения $\sim 10^{-2}$ и размера ~ 100 пк.

Исследование фарадеевского вращения на парсековых масштабах выполнено для 20 АЯГ с использованием однократных наблюдений на VLBA в диа-

пазоне 1.4–15 ГГц (§2.5). Особенность этих объектов состоит в проявляемых больших сдвигах видимого начала джета с частотой и наличии яркой протяженной струи в используемом радиодиапазоне. Он разбивался на участки, по которым МВ определялась линейной аппроксимацией $E\nu PA-\lambda^2$: 1.4–2.4, 4.6–8.4 и 8.1–15.4 ГГц. Для этих АЯГ были впервые получены РСДБ карты распределения фарадеевского вращения вдоль их струй на сантиметровых волнах. Измеренные абсолютные величины МВ находятся в пределах от (1 ± 4) до (2767 ± 53) рад/м². Медианная величина фарадеевского вращения, приведенная в систему отсчета источников, в области видимого начала струйного выброса составила ~ 1461 рад/м² в диапазоне 8.1–15.4 ГГц. Такое вращение приводит к повороту позиционного угла электрического вектора на $\sim 30^\circ$ и $\sim 300^\circ$ на волнах 2 и 6 см. При этом распределение меры вращения неоднородно вдоль струй АЯГ, и имеет тенденцию существенно увеличиваться в ядрах джетов с уменьшением длины волны наблюдений. Вероятнее всего, такое поведение связано с эффектом синхротронного самопоглощения в этих областях и очень близким расположением фарадеевского экрана к струе. Это приводит к тому, что более высокочастотное излучение выходит из областей, находящихся ближе к истинному началу струи с более высокой напряженностью магнитного поля и более плотной тепловой плазмой. Это предположение подтверждается наблюдаемой зависимостью МВ $\sim \nu^2$. Показано, что наблюдаемая мера вращения ~ 1500 рад/м² согласуется с оценками других авторов (например, [21]) для напряженности магнитного поля 10–100 мГс и плотности тепловой плазмы 1–10 см⁻³ в положении начала струи, видимой на 15 ГГц. При этом фарадеевский экран должен иметь толщину приблизительно 0.1–1 пк.

В §2.5.4 рассмотрен вопрос временной переменности меры вращения. Восемь из 20 рассматриваемых АЯГ исследовались ранее другими авторами. В трех источниках из восьми обнаружена переменность МВ на масштабах лет: 3С 309.1, 1655+077 и 1803+784. Такая быстрая переменность физических условий способна возникнуть только в фарадеевском экране, расположенном близко к струе.

В §2.6 представлены результаты анализа распределения фарадеевского вращения поперек струй 20 АЯГ, рассмотренных в §2.5. Такие исследования представляют особый интерес, поскольку поперечный к выбросу градиент МВ является подтверждением существования спиралевидных магнитных полей, образование которых предсказывается в рамках многих моделей АЯГ например, [14; 26]. В результате, впервые были обнаружены значимые градиенты МВ в семи квазарах: 0148+274, 0952+179, 1004+141, 1219+285, 1458+718, 1642+690 и 2201+315.

В §2.7 рассматривается возможность существования больших и экстремально больших ($\sim 10^6 - 10^{10}$ рад/м²) мер вращения и обсуждаются методы поиска таких величин. Такое вращение может образовываться в областях, находящихся

на расстоянии суб-пк от центральной машины АЯГ. Разные модели предсказывают напряженности магнитных полей в этих областях от 10^2 [25] до 10^9 Гс [18]. Такие большие МВ сложно выявить линейной регрессией EVPA- λ^2 , в то время как новый метод синтеза фарадеевских мер вращения [44], представляющий собой Фурье-разложение поляризационного сигнала в пространстве λ^2 , способен находить любые периодические сигналы и эффективен при исследовании АЯГ в широкой полосе длин волн. Для инициирования исследований с целью глубокого поиска большого фарадеевского вращения в АЯГ нами опробован метод синтеза фарадеевских мер вращения в ультрашироком диапазоне высоких радиочастот. Наши исследования основаны на анализе наблюдений магнетара J1745–2900, выполненных на телескопе VLA на 40–48 ГГц со спектральным разрешением 2 МГц. Использование этого источника обусловлено близким расположением к Галактическому центру, который проявляет рекордную среди всех космических объектов меру вращения $-(4.3 \pm 0.1) \times 10^5$ рад/м². Метод фарадеевского синтеза был успешно отработан на магнетаре, МВ которого составила $-(6.7 \pm 3.0) \times 10^3$ рад/м². Эти результаты подтверждают потенциал нового метода для будущего поиска высоких напряженностей магнитных полей в окрестностях сверхмассивных черных дыр АЯГ.

В параграфе 2.8 суммированы основные выводы главы.

В Главе 3 «Степень и направление линейной поляризации в струях активных ядер галактик» рассмотрены свойства вещества и особенности конфигурации магнитных полей 20 АЯГ, описанных в §2.5, посредством моделирования поляризационных спектров ядер и оптически прозрачных компонентов струй и анализа скорректированных за фарадеевское вращение карт распределения EVPA вдоль струй источников. Содержание и результаты главы следуют работам [A4; B6; B10].

Неоднородность в распределении плазмы, ориентации и напряженности магнитного поля области, расположенной на луче зрения между наблюдателем и источником, будет приводить к деполяризации излучения [35]. В зависимости от характера и свойств магнитных полей и плазмы, выделяют несколько основных деполяризационных механизмов: внутреннюю, внешнюю, аномальную и спектральную деполяризации. Перечисленные эффекты приводят к нелинейной зависимости степени (m) и направления линейной поляризации от длины волны (§3.2). Моделированием m -, EVPA- λ^2 можно определить деполяризационный механизм, имеющий место в каждом источнике. Величина средней степени поляризации в ядрах составила 1%, а в оптически тонких компонентах 8% (см. §3.3). Эти результаты указывают на то, что излучение от АЯГ испытывает значительную деполяризацию. Зависимости m - и EVPA- λ^2 демонстрируют сложное поведение в большинстве рассматриваемых источников. Моделирование этих зависимостей показывает, что во многих АЯГ присутствуют внешний

(по отношению к синхротронно-излучающим областям) неоднородный фарадеевский экран. При этом магнитное поле в этой среде может быть как турбулентным, так и регулярным. Внутреннее фарадеевское вращение, проявляемое нелинейностью m - и $EVPA-\lambda^2$, также наблюдается, особенно в ядрах джетов. Такой эффект может объясняться наличием нескольких неразрешенных компонентов с разными мерами вращения или несколько деталей струи в исследуемой компактной области, а также внутренним фарадеевским вращением.

В §3.4 обсуждается истинный, скорректированный за фарадеевское вращение, угол электрической поляризации χ_0 в исследуемых источниках. Этот анализ реализован с использованием трех подходов, рассмотренных в §3.4.1–3.4.3 и описанных далее.

В §3.4.1 производится анализ распределения χ_0 относительно направления распространения джета в плоскости изображения (позиционный угол θ) в ядрах и оптически прозрачных компонентах струй. В результате, 55% случаев имеют сонаправленную или поперечную ориентацию истинного $EVPA$ относительно направления распространения струи. Такое поведение ожидается в рамках осесимметричных моделей АЯГ, например, описанных в работе Лютикова и др. [32] или Каторн [45]. В остальных 45% случаев χ_0 ориентирован под произвольным углом относительно θ . Эти результаты указывают на более сложную структуру релятивистских выбросов, например, существование в них плазменных неустойчивостей или наклонных ударных волн. Не исключено наличие турбулентных магнитных полей в джетах АЯГ.

В §3.4.2 исследуются карты распределения истинного $EVPA$ вдоль струй исследуемых АЯГ. Анализ показывает наличие сложных структур: скачков χ_0 на 90° при смещении вдоль струи (например, квазар 0952+179), отличие ориентации $EVPA$ на краях и в центре струи на 90° (т.н. структура «сердцевина-оболочка» [46]; например, квазар 1458+718), отличие ориентации χ_0 в ядре от наклона $EVPA$ ниже по струе.

Детальное обсуждение каждого источника выполнено в §3.4.3. Наше исследование показывает наличие упорядоченных на масштабах от единиц до сотен парсек магнитных полей в большинстве АЯГ и хаотично ориентированных магнитных полей в остальных источниках. Наблюдаемые сложные поляризационные структуры могут быть вызваны изменением направления распространения струи, взаимодействием с окружающей средой, наличием ударных волн, вспышечной активностью АЯГ и др. Совместно с выводами §3.4.1, эти результаты указывают на отсутствие единой конфигурации регулярных магнитных полей: они могут иметь полоидальную или тороидальную (в т.ч. спиралевидную) форму в разных объектах.

В §3.5 рассматривается и обсуждается модель АЯГ «сердцевина-оболочка», в рамках которой возможно объяснить наблюдаемые поляризационные характе-

ристики исследуемых источников. В этом предположении регистрируемое фарадеевское вращение и деполяризация излучения возникают во внешних слоях струи (оболочка) или во внешнем веществе, окружающем релятивистскую струю АЯГ. Согласно выводам §3.3, вещество во внешнем фарадеевском экране может быть распределено неоднородно и может содержать как турбулентные, так и регулярные магнитные поля. В то же время синхротронно-излучающая «сердцевина» струи в большинстве случаев содержит упорядоченное полоидальное или тороидальное магнитное поле.

Параграф 3.6 суммирует результаты исследования данной главы.

В Главе 4 «Широкодиапазонное исследование квазара S4 1030+61» приводятся результаты изучения физических условий и процессов в квазаре S4 1030+61 во время и после яркой вспышки в гамма-диапазоне электромагнитного спектра. Содержание и результаты главы следуют работам [A3; B5; B7–B9].

Одновременные широкодиапазонные наблюдения являются ключевой методикой исследования АЯГ. Мониторинг радиогромких АЯГ выполняется многими телескопами, среди которых 40-м телескоп в Оуэнс Вэлли, радиоинтерферометр VLBA в проекте MOJAVE и космическая гамма-обсерватория *Fermi*. Однако только отдельные из этих объектов наблюдаются более детально и с более высоким разрешением. Квазар S4 1030+61 является одним из таких немногих источников. После яркой вспышки в гамма-диапазоне в 2010 г. источник стал активно наблюдаться многими наземными и космическими обсерваториями, в том числе были проведены многократные широкодиапазонные наблюдения на VLBA в диапазоне 4.6–43 ГГц (см. §4.2).

Результаты совместного анализа гамма- и радионаблюдений АЯГ S4 1030+61, выполненных с 2009 по 2014 гг., изложены в §4.3. Моделирование структуры релятивистской струи в виде отдельных деталей показывает (см. §4.3.1) наличие компонентов, движущихся с видимыми сверхсветовыми скоростями: (2.7 ± 0.7) с и (6.4 ± 0.4) с. Образование нового видимого компонента не зарегистрировано нами в течение периода рассматриваемых наблюдений, при этом ядро струи доминирует в спектре источника на 15 ГГц. Это указывает на то, что временная переменность радиопотока происходит в видимом начале релятивистской струи квазара.

Спектральный индекс α (определяемый как $S \propto \nu^\alpha$, где S – плотность потока, ν – частота наблюдений) видимого начала струи в диапазоне 4.6–43 ГГц увеличивается с 0.47 ± 0.02 (2010-05-24) до 0.69 ± 0.02 (2010-10-18) после мощной вспышки в гамма-диапазоне (2010-05-15, см. §4.3.2). Вероятно, такое поведение α связано с вбросом плазмы в начало струи и потерями энергии, сопровождающие активное состояние источника.

Моделирование кривой блеска S4 1030+61 на 15 ГГц (§4.3.3) набором экспо-

ненциальных вспышек согласно подходу, предложенному Вальтаойа и др. [47], показывает наличие девяти вспышек в квазаре с 2009 по 2014 годы. Параметры самой быстрой вспышки (2011-11-18) и наибольшая видимая скорость одного из компонентов использованы для оценки следующих параметров джета: Доплер-фактор $\delta_{\text{var}} \approx 15$, Лоренц-фактор $\Gamma_{\text{var}} \approx 9$ и угол наблюдения струи к лучу зрения $\vartheta_{\text{var}} \approx 3^\circ$.

Совмещение карт источника на разных частотах относительно положения оптически прозрачного компонента показывает, что сдвиг положения видимого начала струи квазара r с частотой следует степенной зависимости $r \propto \nu^1$ (§4.3.4). Согласно измерениям, изложенным подробно в работе [A3], мера смещения положения ядра между всеми парами частот наблюдений в диапазоне 4.6–43 ГГц составила (32 ± 8) пк·ГГц. Это соответствует положению РСДБ ядра, видимом на 15 ГГц, на расстоянии (14 ± 2) пк от ЧД. Согласно модельным предсказаниям [48], оценка напряженности магнитного поля в этой области струи S4 1030+61 составляет (0.16 ± 0.02) Гс.

Яркостная температура ядра джета (см. §4.3.5) после отделения от него нового компонента составляет $\geq 3.3 \times 10^{11}$ К, что выше значения температуры, соответствующей режиму равнораспределения между плотностями энергий магнитного поля и излучающих частиц ($\sim 10^{11}$ К, [9]). Это говорит о том, что плотность энергии частиц существенно превышает плотность энергии магнитного поля, что может являться результатом инъекции плотной плазмы в видимое начало релятивистской струи в течение его вспышечной фазы. Яркостная температура компонентов струи, расположенных ниже ядра, следует степенной зависимости с расстоянием вдоль струи $\propto r^{2.7}$ и с размером компонентов $\propto r^{2.8}$. Эти результаты совместно с измерениями сдвига ядра (§4.3.4) позволили получить следующие степенные зависимости для ширины струи $d \propto r^{1.0}$, плотности частиц $n_e \propto r^{1.7}$ и напряженности магнитного поля $B \propto r^{1.1}$. Такое поведение свидетельствует о равнораспределении плотности магнитного поля и релятивистских частиц в оптически прозрачных областях струи S4 1030+61 вдали от ее начала.

Совместный анализ гамма- и радиоизлучения (§4.3.6) показывает отсутствие значимой корреляции, что объясняется различными масштабами переменности в этих диапазонах. Визуальный анализ этих кривых блеска показывает выраженную вспышечную активность в близкие периоды времени. В предположении связи ярчайшего пика активности в гамма-диапазоне (2010-04-15) с самой большой радиовспышкой (2011-03-07), временная разница между ними, вызванная задержкой сигнала при распространении возмущения вдоль струи, составляет (0.80 ± 0.11) лет. Эта величина соответствует пространственному разнесению областей генерации гамма- и радиоизлучения (12 ± 2) пк. Так как видимое на 15 ГГц ядро оценено нами на расстоянии (14 ± 2) пк от ЧД, гамма-

излучение может возникать на расстоянии (2 ± 2) пк от центральной машины АЯГ. Масштаб переменности кривой блеска в гамма-диапазоне соответствует размерам области < 0.2 пк. Согласно результатам моделирования структуры струи набором компонентов (см. §4.3.1), размер РСДБ ядра на 43 ГГц составляет $\sim (0.12 \pm 0.07)$ пк, а его смещение от ЧД оценено примерно в (1.3 ± 1.2) пк. Эти результаты показывают, что гамма-излучение может генерироваться в видимом начале струи на 43 ГГц.

В §4.3.7 представлены поляризационные свойства квазара. Степень поляризации РСДБ ядра увеличивается с развитием ярчайшей радиовспышки, что сопровождается увеличением фарадеевского вращения. Такое поведение поляризационных характеристик объясняется изменением напряженности магнитного поля и плотности частиц, подтверждая выводы §4.3.2 и 4.3.5. Таким образом, вспышечная активность источника, скорее всего, сопровождается вбросом вещества в начало струи квазара и вероятной компрессией магнитного поля.

В параграфе 4.4 перечислены выводы, полученные в данной главе.

В Заключение сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту.

Список цитируемой литературы

1. Boettcher M., Harris D. E., Krawczynski H. Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei. — Berlin : Wiley, 2012.
2. Edge D. O., Shakeshaft J. R., McAdam W. B. et al. A survey of radio sources at a frequency of 159 Mc/s. // Mem. R. Astron. Soc. — 1959. — Vol. 68. — P. 37–60.
3. Blandford R. D., Königl A. Relativistic jets as compact radio sources // Astrophys. J. — 1979. — Vol. 232. — P. 34–48.
4. Бескин В. С. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. — Москва : Физматлит, 2005.
5. Rees M. J. Black Hole Models for Active Galactic Nuclei // Annu. Rev. Astron Astrophys. — 1984. — Vol. 22. — P. 471–506.
6. Meier D. L. Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm. — Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2012.
7. Sikora M., Madejski G. Blazars // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by F. A. Aharonian, H. J. Völk. — Vol. 558 of American Institute of Physics Conference Series. — 2001. — P. 275–288.
8. Rees M. J. Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources // Nature. — 1966. — Vol. 211. — P. 468–470.
9. Readhead A. C. S. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 426. — P. 51–59.

10. Wagner S. J., Witzel A. Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects // *Annu. Rev. Astron Astrophys.* — 1995. — Vol. 33. — P. 163–198.
11. Pauliny-Toth I. I. K., Kellermann K. I. Variations in the Radio-Frequency Spectra of 3c 84, 3c 273, 3c 279, and Other Radio Sources // *Astrophys. J.* — 1966. — Vol. 146. — P. 634.
12. Lister M. L., Homan D. C. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. I. First-Epoch 15 GHz Linear Polarization Images // *Astron. J.* — 2005. — Vol. 130. — P. 1389–1417.
13. Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Kellermann K. I. et al. RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // *Astrophys. J Lett.* — 2016. — Vol. 820. — P. L9.
14. Meier D. L., Koide S., Uchida Y. Magnetohydrodynamic Production of Relativistic Jets // *Science.* — 2001. — Vol. 291. — P. 84–92.
15. Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С. et al. РадиоАстрон: итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета. // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина.* — 2016. — Vol. 3. — P. 4.
16. Gómez J. L., Lobanov A. P., Bruni G. et al. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 817. — P. 96.
17. Zhang H., Diltz C., Böttcher M. Radiation and Polarization Signatures of the 3D Multizone Time-dependent Hadronic Blazar Model // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 829. — P. 69.
18. Кардашев Н. С. Синхротронное радиоизлучение от протонов и электронов в пульсарах и квазарах. // *Астрон. журн.* — 2000. — Vol. 77. — P. 813.
19. Böttcher M., Reimer A., Sweeney K., Prakash A. Leptonic and Hadronic Modeling of Fermi-detected Blazars // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 768. — P. 54.
20. Sahu S., Zhang B., Fraija N. Hadronic-origin TeV γ rays and ultrahigh energy cosmic rays from Centaurus A // *Phys. Rev. D.* — 2012. — Vol. 85, no. 4. — P. 043012.
21. Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y. et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 545. — P. A113.
22. Eatough R. P., Falcke H., Karuppusamy R. et al. A strong magnetic field around the supermassive black hole at the centre of the Galaxy // *Nature.* — 2013. — Vol. 501. — P. 391–394.
23. Hada K., Kino M., Doi A. et al. High-sensitivity 86 GHz (3.5 mm) VLBI Observations of M87: Deep Imaging of the Jet Base at a Resolution of 10 Schwarzschild Radii // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 817. — P. 131.

24. Zamaninasab M., Clausen-Brown E., Savolainen T., Tchekhovskoy A. Dynamically important magnetic fields near accreting supermassive black holes // *Nature*. — 2014. — Vol. 510. — P. 126–128.
25. Field G. B., Rogers R. D. Radiation from magnetized accretion disks in active galactic nuclei // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 403. — P. 94–109.
26. Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J. Theory of extragalactic radio sources // *Reviews of Modern Physics*. — 1984. — Vol. 56. — P. 255–351.
27. Martí-Vidal I., Müller S., Vlemmings W. et al. A strong magnetic field in the jet base of a supermassive black hole // *Science*. — 2015. — Vol. 348. — P. 311–314.
28. Cawthorne T. V., Hughes P. A. The Radiative Transfer of Synchrotron Radiation through a Compressed Random Magnetic Field // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 771. — P. 60.
29. Marscher A. P. Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. 87.
30. Aller M. F., Hughes P. A., Aller H. D. et al. Constraining the Physical Conditions in the Jets of γ -Ray Flaring Blazars Using Centimeter-band Polarimetry and Radiative Transfer Simulations. I. Data and Models for 0420-014, OJ 287, and 1156+295 // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 791. — P. 53.
31. Laing R. A., Bridle A. H. Dynamical models for jet deceleration in the radio galaxy 3C 31 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 336. — P. 1161–1180.
32. Lyutikov M., Pariev V. I., Gabuzda D. C. Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 360. — P. 869–891.
33. Zakamska N. L., Begelman M. C., Blandford R. D. Hot Self-Similar Relativistic Magnetohydrodynamic Flows // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 679. — P. 990–999.
34. Zhang H., Deng W., Li H., Böttcher M. Polarization Signatures of Relativistic Magnetohydrodynamic Shocks in the Blazar Emission Region. I. Force-free Helical Magnetic Fields // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 817. — P. 63.
35. Sokoloff D. D., Bykov A. A., Shukurov A. et al. Depolarization and Faraday effects in galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 299. — P. 189–206.
36. Farnes J. S., Gaensler B. M., Carretti E. A Broadband Polarization Catalog of Extragalactic Radio Sources // *Astrophys. J. Suppl.* — 2014. — Vol. 212. — P. 15.
37. Pasetto A., Carrasco-González C., Bruni G. et al. JVLA Wideband Polarimetry Observations on a Sample of High Rotation Measure Sources // *Galaxies*. — 2016. — Vol. 4. — P. 66.
38. Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой // *Известия вузов «Радиофизика»*. — 1965. — Vol. 8. —

P. 651.

39. O'Sullivan S. P., Gabuzda D. C. Three-dimensional magnetic field structure of six parsec-scale active galactic nuclei jets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 393. — P. 429–456.
40. Zavala R. T., Taylor G. B. Time-Variable Faraday Rotation Measures of 3C 273 and 3C 279 // *Astrophys. J Lett.* — 2001. — Vol. 550. — P. L147–L150.
41. Cotton W. D. *Obit: A Development Environment for Astronomical Algorithms* // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2008. — Vol. 120. — P. 439–448.
42. Cotton W. D., Kravchenko E. V. Differential Instrumental Polarization Calibration // *Obit Development Memo Series.* — 2014. — Vol. 39. — P. 1–4.
43. Taylor A. R., Stil J. M., Sunstrum C. A Rotation Measure Image of the Sky // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 702. — P. 1230–1236.
44. Brentjens M. A., de Bruyn A. G. Faraday rotation measure synthesis // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 441. — P. 1217–1228.
45. Cawthorne T. V. Polarization of synchrotron radiation from conical shock waves // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 367. — P. 851–859.
46. Attridge J. M., Roberts D. H., Wardle J. F. C. Radio Jet-Ambient Medium Interactions on Parsec Scales in the Blazar 1055+018 // *Astrophys. J Lett.* — 1999. — Vol. 518. — P. L87–L90.
47. Valtaoja E., Lähteenmäki A., Teräsranata H., Lainela M. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. I. Decomposition of Variations into Exponential Flares // *Astrophys. J. Suppl.* — 1999. — Vol. 120. — P. 95–99.
48. Lobanov A. P. Ultracompact jets in active galactic nuclei // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 330. — P. 79–89.