

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени П.К. Штернберга

на правах рукописи

Витрищак Василий Михайлович



**КРУГОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК НА ПАРСЕКОВЫХ
МАСШТАБАХ**

(Специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2008 г.

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук

Габузда Дениз Кармен (Университетский Колледж Корка, Корк, Ирландия)

доктор физико-математических наук

Засов Анатолий Владимирович (профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Дагкесаманский Рустам Давудович (директор ПРАО АКЦ ФИАН)

кандидат физико-математических наук

Рудницкий Георгий Михайлович (отдел радиоастрономии ГАИШ МГУ)

Ведущая организация:

Специальная астрофизическая обсерватория (САО РАН)

Защита состоится 23 октября 2008г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного Совета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, шифр Д501.001.86.

Адрес: 119991, Москва, Университетский проспект, дом 13, ГАИШ МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского Государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Университетский пр., д. 13)

Автореферат разослан «22» сентября 2008г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д501.001.86,
кандидат физ.-мат. наук



С.О. Алексеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Несмотря на то, что активные ядра галактик (далее АГЯ) были открыты еще в середине XX века, целый ряд физических характеристик этих объектов до сих пор остается неизвестным. Если основная картина происходящего в АГЯ является более-менее общепринятой, то детали, касающиеся как параметров центральной машины, так и выбросов являются крайне малоизученными. Так, до сих пор в научном сообществе идут споры о составе вещества выбросов, о его энергетических характеристиках, однородности вещества, приводятся различные модели магнитного поля – разнообразных геометрий, напряженности и упорядоченности, остается открытым вопрос о механизмах ускорения частиц, коллимации выбросов и т.д. Для определения столь важных астрофизических свойств АГЯ необходимо не только количественное увеличение наблюдательного материала, но и его качественное разнообразие – наблюдения на различных частотах, с различным пространственным разрешением, изучение не только полной интенсивности, но и поляризационных свойств излучения. Поскольку параметры выбросов АГЯ сильно меняются как при удалении от центральной машины, так и от оси выброса к его краю, особую важность для определения этих параметров представляют наблюдения со сверхвысоким разрешением в миллисекунды дуги (что для АГЯ составляет порядка парсеков), достижимым методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ).

Настоящая диссертация как раз посвящена изучению круговой компоненты поляризации (ККП) радиоизлучения АГЯ на парсековых масштабах методами РСДБ.

Если наблюдаемая степень линейной поляризации радиоизлучения АГЯ может составлять десятки процентов, то степень круговой поляризации АГЯ, как правило, составляет десятые доли процента - проценты, а задача ее определения далеко не тривиальна и требует специальных методик обработки. Несмотря на столь малые степени,

информация о круговой компоненте поляризации является крайне важной для определения ряда параметров выбросов, таких как характеристики магнитного поля, состав, плотность и энергетические характеристики релятивистской плазмы в выбросе, поскольку все эти параметры в той или иной степени определяют наблюдаемую поляризационную картину.

Пионерами в изучении круговой поляризации АГЯ на парсековых масштабах являются авторы Хоман и Вордл (Homan&Wardle). В серии работ они предлагают несколько методик обработки РСДБ данных с учетом круговой компоненты поляризации, которые они успешно применяют для определения степени круговой поляризации и построения поляризационных карт. Полученные Хоманом и Вордлом результаты указывают на то, что ККП излучения АГЯ, как правило, связана с их РСДБ-ядрами. Наблюдаемая устойчивость знака круговой поляризации от эпохи к эпохе на временных масштабах в несколько лет предполагает наличие стабильного направленного магнитного поля в изучаемых областях.

До работ автора диссертации, полученные Хоманом и Вордлом результаты были единственными вследствие новизны методик обработки ККП, сложностей, связанных с их внедрением и требований к наблюдательным данным, а также сложившегося в научном сообществе мнения, что круговая поляризация в силу своей малости не может быть исследована методами РСДБ. Основной проблемой при обработке радиоинтерферометрических данных круговой поляризации является крайне слабое отношение сигнал/шум (типичная максимальная степень круговой поляризации составляет всего доли процента - проценты от полной интенсивности), поэтому процедура получения карт круговой поляризации требует высокоточной калибровки наблюдательных данных, в частности комплексных коэффициентов усиления антенн, что на таких высоких радиочастотах как 43ГГц является весьма сложной, но, как показывается в настоящей диссертации, выполнимой задачей.

Цель работы.

Целью настоящей работы являлось изучение круговой компоненты поляризации радиоизлучения активных ядер галактик методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами на нескольких радиочастотах, что включало в себя как обработку данных, так и анализ полученных при этом карт круговой поляризации в рамках простейших моделей выброса.

Целью диссертации была также проверка, оптимизация и усовершенствование методик обработки данных круговой поляризации, предложенных впервые (Homan&Wardle 1999) и еще не получивших широкого применения.

Хотя работа и носит экспериментальный характер, в теоретической части диссертации автор постарался привести довольно подробное описание и анализ механизмов синхротронного излучения и фарадеевской конверсии, ответственных за генерацию круговой поляризации в выбросах АГЯ, делая упор на наблюдательные особенности, которые должны быть характерны для этих механизмов при различных параметрах выбросов.

Научная новизна

В результате работы были построены одни из первых карт круговой поляризации радиоизлучения АГЯ на парсековых масштабах одновременно на нескольких частотах и впервые – одновременно на трех частотах (15, 22 и 43ГГц). До настоящей работы не было данных о круговой поляризации радиоизлучения на таких высоких частотах как 22 и 43ГГц на парсековых масштабах. В 9 АГЯ круговая поляризация была обнаружена впервые. Также, впервые обнаружены поперечные структуры круговой поляризации с противоположными знаками на разных краях выброса.

В работе для уменьшения отношения сигнал/шум на картах круговой поляризации применяется метод отдельной калибровки, предложенный Д.К.Габуздой и реализованный автором диссертации в рамках пакета AIPS, а также серия программ для визуализации редактирования данных,

расчета ошибок и построения карт круговой поляризации, разработанных автором диссертации, позволяющих существенно ускорить процедуру обработки РСДБ данных, в том числе круговой поляризации.

Впервые обнаружена корреляция наблюдаемой круговой поляризации с линейной поляризацией и градиентами мер вращения в АГЯ на парсековых масштабах, которая может быть объяснена в рамках простейшей модели спирального магнитного поля в выбросах.

Научная и практическая ценность работы

В работе приводятся результаты исследования круговой поляризации 70 АГЯ на парсековых масштабах, 41 из которых – одновременно на частотах 15, 22 и 43 ГГц и 29 – на частоте 15ГГц. Для источников, показавших наличие сигнала ККП на уровне 2σ и выше, приводятся карты распределения радиояркости круговой поляризации. Поскольку на сегодняшний день круговая поляризация АГЯ на парсековых масштабах изучалась лишь двумя командами исследователей, в числе одной из которых состоит автор диссертации, любые новые результаты вносят существенный вклад в формирование базы знаний о круговой поляризации радиоизлучения АГЯ. Новые данные позволяют как анализировать конкретные источники, рассматривая, например, переменность круговой поляризации или связь ее с компонентами выброса при наличии карт на нескольких эпохах наблюдений, так и анализировать выборки большого числа источников, определяя связь круговой поляризации с другими наблюдаемыми свойствами источников выборки. Даже располагая столь небольшим на сегодняшний день количеством информации о круговой поляризации в АГЯ, удастся сделать важные астрофизические выводы о параметрах источников. Так, например, на основании карт круговой поляризации для выборки источников в настоящей диссертации показывается возможная связь наблюдаемого знака круговой поляризации со спиральной структурой магнитного поля в выбросах.

Полученные карты круговой поляризации могут быть использованы для сравнения с результатами численных расчетов в будущих работах, что может внести неопределимый вклад в определение параметров выбросов.

Анализ наблюдаемой круговой компоненты поляризации дает возможность ввести дополнительные связи и ограничения для этих параметров в конкретных моделях выбросов. Важную роль при этом играют многочастотные наблюдения, позволяющие разделить вклад от разных параметров в наблюдаемую поляризационную картину.

Апробация результатов

Результаты, изложенные в работе, активно обсуждались с коллегами из АКЦ ФИАН и из лаборатории активных ядер галактик в Университетском Колледже Корка в Ирландии, докладывались автором на семинарах и конференциях:

1. Семинар в институте Радиоастрономии имени Макса Планка (Max-Planck-Institut fuer Radioastronomie) в Бонне, Германия, 2005г
2. Семинар-конкурс аспирантских и студенческих докладов, СПбГУ, 2006г. (доклад занял 1 место)
3. Семинары в Университетском Колледже Корка (University College Cork), Корк, Ирландия, 2006 и 2007гг.
4. XXIII конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пушино, 2006 г.
5. XXIV конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пушино, 2007 г.
6. XXXVI конференция молодых радиоастрономов «Young European Radio Astronomers Conference», Бордо, Франция, 2007г.

Результаты работы также докладывались научным руководителем Д.К.Габуздой на конференциях

7. Конференция «Reaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology», вблизи Токио, Япония, 2007 г.
8. Конференция-школа «High Energy Phenomena in Relativistic Outflows», Дублин, Ирландия, 2007 г.
9. Конференция «Extragalactic jets», Аляска, США, 2007 г.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Проведено исследование круговой поляризации 70 активных ядер галактик на парсековых масштабах методами РСДБ. В работе использовались данные, полученные на интерферометре VLBA. Для 41 АГЯ были использованы данные на трех частотах – 15, 22 и 43ГГц, для 29- только на 15ГГц. Это первые результаты на таких высоких частотах как 22 и 43ГГц. В 18 источниках был обнаружен сигнал круговой поляризации на уровне выше 2σ . Для источников, наблюдавшихся в течение нескольких эпох, обнаружена постоянная на временных масштабах в несколько лет составляющая ККП, что свидетельствует о наличии в выбросах постоянной упорядоченной компоненты магнитного поля. Для 9 источников круговая поляризация на парсековых масштабах была обнаружена впервые, для 9 источников были подтверждены более ранние результаты (Homan, Attridge&Wardle 2001, Homan&Lister 2006).

Полученные для исследованных объектов степени круговой поляризации составляют от десятых долей процента до нескольких процентов, что вносит ограничение на минимальные величины напряжённости магнитного поля в соответствующих областях выбросов в случае, если синхротронный механизм генерации круговой поляризации является доминирующим.

На полученных картах во всех случаях пиковые значения интенсивности круговой поляризации соответствуют РСДБ-ядрам выбросов или лежат за ними ближе к центральной машине АГЯ. Поскольку сильное внутреннее фарадеевское вращение приводит к практически полной деполаризации как линейной, так и круговой компонент поляризации в оптически толстых областях источника, вышеописанный наблюдательный факт свидетельствует в пользу того, что это вращение слабо или отсутствует, что в свою очередь делает более вероятной гипотезу о электрон-протонной природе выброса.

Была обнаружена круговая поляризация в оптически тонких выбросах 1334-127, 2223-052, а также подтверждено обнаружение

в ЗС279, тем самым, механизм генерации круговой поляризации может эффективно работать и в оптически тонких областях.

2. Впервые получены карты круговой поляризации АГЯ на парсековых масштабах одновременно на трех радиочастотах для 5 источников. Для 6 источников получены карты ККП одновременно на двух частотах. Хотя в большинстве исследованных случаев сигнал круговой поляризации на частоте 43ГГц был выше, чем на двух более низких частотах, какой-то общей тенденции в частотной зависимости круговой поляризации не прослеживается.
3. Впервые обнаружены поперечные структуры круговой поляризации с противоположными знаками на разных краях выброса в источниках 1055+018 и 2251+158, которые могут быть объяснены наличием тороидальной упорядоченной компоненты магнитного поля в соответствующих областях выброса.
4. В рамках пакета AIPS (astronomical image processing system) реализован метод «раздельной калибровки», применяемый для обработки данных круговой поляризации и позволяющий существенно уменьшить шум на картах круговой поляризации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения, содержит 80 рисунков и библиографию из 70 наименований. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, включая рисунки.

Содержание диссертации

Во **Введении** ставится задача получения информации о круговой поляризации радиоизлучения активных ядер галактик с помощью методов РСДБ. Подчеркивается актуальность и научная ценность данной задачи, ее новизна, кратко указываются принципиальные сложности, возникающие при ее решении. Приводится краткая характеристика источников,

изучению которых посвящена диссертация – активных ядер галактик. Делается обзор ключевых работ, посвященных изучению круговой компоненты радиоизлучения АГЯ - интегральным радионаблюдениям круговой поляризации, наблюдениям с помощью радиоинтерферометра АТСА и РСДБ-наблюдениям и их обработке, также приводятся основные теоретические работы по теме диссертации. Формулируется цель диссертации и приводятся выносимые на защиту результаты, при этом указывается личный вклад автора в представленные результаты. В хронологическом порядке изложена апробация результатов и список публикаций по теме диссертации.

В **Главе 1** рассматриваются основные механизмы генерации круговой компоненты поляризации в АГЯ - непосредственное излучение по синхротронному механизму и фарадеевская конверсия из линейной поляризации при прохождении поляризованного излучения через намагниченную плазму среды. После введения определения поляризации и необходимых для дальнейшего рассмотрения терминов, приводится качественное описание синхротронного механизма и механизма конверсии, которое может быть полезно для осознания физической природы данных эффектов, а также некоторых их простейших свойств.

Показывается, что синхротронное излучение отдельной релятивистской частицы в общем случае является эллиптически поляризованным, причём направление вращения плоскости поляризации зависит от разности питч-угла частицы (угла между мгновенной скоростью частицы и вектором магнитного поля) и угла между направлением на наблюдателя и вектором магнитного поля. Для ансамбля частиц, имеющих равномерное распределение по импульсам (питч-углам) вклады положительного и отрицательного вращения плоскости поляризации практически полностью взаимно компенсируются, тем не менее, наблюдаемое излучение будет иметь хоть и малую, но отличную от нуля круговую компоненту поляризации. При отклонении распределения электронов по импульсам от изотропного, степень круговой поляризации синхротронного излучения может меняться как в большую, так и в меньшую сторону. Знаки круговой поляризации излучения частиц с одинаковыми питч-углами, но разных зарядов будут противоположными. Следовательно, в плазме, состоящей исключительно из электрон-позитронных пар, результирующая степень

круговой поляризации, непосредственно генерируемой в процессе синхротронного излучения, будет равна нулю. Наибольшая степень круговой поляризации в случае непосредственной генерации в синхротронном механизме наблюдается при малых углах между направлением вектора магнитного поля и лучом зрения (продольное поле).

Фарадеевские магнитооптические эффекты конверсии и вращения могут также быть ответственны за генерацию круговой поляризации. Эффект конверсии приводит к взаимному преобразованию линейной и круговой компонент поляризации, а эффект вращения - к повороту плоскости линейной поляризации. Показывается, что для действия механизма конверсии необходимо, чтобы плоскость входящего в область линейно поляризованного излучения составляла угол, отличный от прямого с направлением локального магнитного поля. Отсюда следует, что для генерации круговой поляризации по механизму конверсии требуется либо внутреннее фарадеевское вращение, либо наличие изменения поперечной компоненты магнитного поля вдоль луча зрения в источнике. В нейтральной плазме, состоящей исключительно из электрон-позитронных пар, эффект фарадеевского вращения отсутствует, поскольку электроны и позитроны приводят к вращению плоскости поляризации в противоположных направлениях. Эффект конверсии имеет одинаковый знак для частиц разных зарядов, поэтому конверсия возможна как в обычной плазме, так и в плазме из электрон-позитронных пар.

В заключении главы рассматривается влияние релятивистских эффектов на наблюдаемые поляризационные свойства излучения АГЯ.

Глава 2 посвящена более детальному рассмотрению общей задачи переноса излучения в АГЯ - приводятся уравнения переноса и коэффициенты излучения и поглощения интенсивности, линейной и круговой поляризации для релятивистской плазмы источника синхротронного излучения, а также коэффициенты конверсии и вращения для холодной и релятивистской плазмы (Jones&O'Dell, 1977, Beckert&Falcke, 2002). Последовательно подробно рассматриваются все коэффициенты в уравнениях переноса. Приводятся решения уравнений переноса для случая однородного источника начиная от простейшего случая неполяризованного синхротронного излучения и заканчивая учётом линейной и круговой компонент поляризации и фарадеевских эффектов.

Проводится анализ влияния различных параметров плазмы выбросов на наблюдаемую поляризационную картину для неоднородного источника. Особое внимание уделяется геометрии магнитного поля выбросов.

Значения коэффициентов переноса связаны с физическими параметрами плазмы выброса. Так, коэффициенты излучения и поглощения круговой компоненты поляризации связаны с геометрией и напряженностью магнитного поля в выбросе, а также с наклоном степенного распределения релятивистских частиц плазмы по энергиям. Показывается, что для генерации наблюдаемой степени круговой поляризации порядка процента по синхротронному механизму нужны упорядоченные поля с напряженностью продольной компоненты порядка 0.1 Гс. В случае неоднородного поля, его напряженность, соответственно, должна быть еще выше. Наклон спектров круговой компоненты поляризации для доминирующего синхротронного механизма может меняться в широких пределах в зависимости от оптической толщи источника от $-s/2$ (где s - показатель степени в распределении релятивистских частиц по энергиям) в оптически тонком случае до сильно положительных значений при промежуточных оптических толщах >1 . В оптически толстом случае наклон спектра будет положительным и равен 2. На основе аналитических решений уравнений переноса, автором показывается, что максимум потока круговой поляризации на картах для синхротронного механизма генерации должен быть пропорционален квадрату частоты, т.е. $V_{max} \propto \nu^2$. Поскольку интенсивность круговой поляризации, генерируемой по синхротронному механизму, при возрастании поля увеличивается обратно пропорционально функции источника, в моделях источника где напряженность поля возрастает при приближении к центральной машине (например модель Blandford & Königl 1979) может наблюдаться два пика круговой поляризации разных знаков, один из которых будет расположен на расстоянии, соответствующем оптической толще $\tau \approx 1$, а другой будет находиться ближе к центральной машине (естественно, речь идет об РСДБ-наблюдениях, обладающих достаточным разрешением). Знак круговой поляризации при генерации по синхротронному механизму определяется проекцией вектора магнитного поля на луч зрения - в поле, имеющем продольную компоненту, направленную на наблюдателя в системе отсчета, связанной с веществом

выброса, будет генерироваться отрицательная круговая поляризация и наоборот. Зависимостью знака поляризации от направления вектора локального магнитного поля можно воспользоваться для определения геометрии магнитного поля в выбросе. В главе приводятся примеры различных геометрий поля и их возможные наблюдательные проявления (опять же, при достаточном разрешении и чувствительности радиоинтерферометра).

К генерации круговой поляризации могут приводить и магнитооптические фарадеевские эффекты конверсии и вращения. Коэффициенты конверсии и вращения в уравнениях переноса, характеризующие мощность соответствующих фарадеевских эффектов, сильно зависят от нижней границы степенного распределения релятивистских частиц плазмы по энергиям (от наличия более медленных релятивистских частиц), а также от геометрии и напряженности магнитного поля. Показывается, что в зависимости от параметров выброса они могут меняться в очень широких пределах. Приводятся численные решения уравнения переноса для однородного источника с учетом действия фарадеевских эффектов для различных параметров выброса, которые показывают, что при определенных значениях коэффициентов переноса, в однородном источнике могут генерироваться крайне высокие (> 30%) степени круговой поляризации. Рассуждения обобщаются на случай неоднородного источника, при этом рассматривается два случая - сильного и слабого внутреннего фарадеевского вращения. В первом случае в оптически-толстых областях выброса излучение должно испытывать сильную деполаризацию как линейной, так и круговой компонент, что противоречит наблюдениям - максимум интенсивности круговой поляризации практически во всех случаях (и в настоящей работе, и в работах других авторов) наблюдается в РСДБ-ядрах выброса. В случае слабого вращения для работы механизма конверсии, необходимо чтобы направление поперечной компоненты магнитного поля менялось вдоль луча зрения внутри источника.

Рассматривается простая модель конверсии, в которой генерируемое по синхротронному механизму в одной однородной области линейно поляризованное излучение, проходя через вторую однородную область с другим направлением поперечной компоненты магнитного поля,

испытывает фарадеевскую конверсию с образованием круговой компоненты поляризации. При определенных ограничениях на оптическую толщину и величины коэффициентов вращения и конверсии, знак круговой поляризации на выходе из такого идеализированного источника будет зависеть только от угла между поперечными компонентами магнитного поля в этих двух областях. Этот упрощенный подход можно применить к моделям реальных источников, например, к модели источника со спиральным магнитным полем, если угол закрутки спирали не сильно меняется от оси выброса к его краям. При мысленном движении вдоль луча зрения от «заднего края» выброса к его оси, направление вектора магнитного поля будет практически постоянным, при переходе через центр выброса оно испытает резкий скачок на угол φ , сохраняя это новое направление до «переднего края» выброса. Тем самым, излучение с «задней» половины выброса будет испытывать конверсию на «передней» его половине, генерируя круговую поляризацию, знак которой будет определяться только величиной угла φ . Этот угол, а следовательно и распределение знака круговой поляризации, будет варьироваться поперек выброса, но, при наблюдениях с ограниченным разрешением, усредненная по диаграмме направленности круговая поляризация будет иметь знак, соответствующий более оптически толстой осевой области выброса. Приведенные автором диссертации расчеты для простейшей модели спирального поля – поверхностного спирального поля – показали, что знак круговой поляризации, который должен наблюдаться для этой модели определяется питч-углом (углом закрутки) спирали, спиральностью (направлением закрутки) и полярностью поля. Он также зависит от угла между лучом зрения и осью выброса в системе отсчета, связанной с веществом выброса, но в результате релятивистского уярчения и эффекта наблюдательной селекции большинство выбросов должно наблюдаться под углами, близкими к 90° , в собственной системе отсчета или к $\sim 1/\Gamma$ в системе отсчета, связанной с наблюдателем (Lyutikov, Pariev, Gabuzda 2005). Выводы для модели поверхностного поля можно обобщить и на более широкий класс спиральных полей, для которых питч-угол практически не меняется в зависимости от расстояния до оси выброса. Таким образом, если доминирующим механизмом генерации круговой поляризации является конверсия, то при выполнении всех условий

вышеописанной модели, наблюдаемый знак круговой поляризации будет связан с величиной питч-угла поля, его спиральностью и полярностью. Величина питч-угла может быть оценена из данных линейной компоненты поляризации, анализ градиентов мер вращения позволяет оценить спиральность поля при его заданной полярности. Следовательно, если реальные источники близки к описанной модели, наблюдаемый знак круговой поляризации может быть использован для определения полярности (или спиральности) выброса.

Для 8 АГЯ, для которых из различных источников были одновременно доступны данные о круговой и линейной поляризации, а также градиентах мер вращения, для всех 8 случаев в рамках приведенной модели расчеты показали одинаковую полярность магнитного поля, а именно во всех случаях силовые линии были направлены в сторону центральной машины. Вероятность того, что данный наблюдательный факт является простым совпадением, оцененная из предположения о равновероятных распределениях спиральностей и полярностей поля, составляет всего 0.39%. Это может свидетельствовать как в пользу спиральной геометрии полей выбросов и справедливости допущений модели, так и в пользу довольно нетривиального вывода о том, что большинство выбросов АГЯ имеют одинаковую полярность. Последнее может объясняться, например, в рамках квадрупольной природы полей, генерируемых центральной машиной (Blandford, 2008).

В **Главе 3** рассматриваются основные проблемы, возникающие при обработке данных круговой поляризации АГЯ – инструментальная поляризация, эффект «косоглазия» (beam squint) телескопов, проблема определения комплексных коэффициентов антенн и ошибки, связанные с отдельными базами. Указываются методы, используемые для решения этих проблем, приводится оценка ошибок калибровки.

На практике невозможно добиться того, чтобы приемники антенны принимали строго заданные моды поляризации, и это необходимо учитывать при обработке интерферометрических данных. В случае, когда предполагается, что приемники антенн принимают две ортогональные круговые моды поляризации, в реальности принимаемые моды оказываются слабо-эллиптическими. Это вносит ошибки в результаты обработки поляризационных данных, называемые инструментальной

поляризацией, поэтому требуется специальная калибровка, позволяющая его уменьшить. Для этого совместно с источниками выборки необходимо наблюдать калибровочный источник, который либо не поляризован, либо сильно поляризован, но является как можно более компактным. Для данного источника находятся поправки, связанные с инструментальной поляризацией, которые затем применяются ко всем источникам выборки.

В результате того, что приемники правой и левой круговых мод немного смещены относительно оси телескопа и друг друга, диаграммы направленности для них также будут смещены. Любая ошибка наведения телескопа приведет к тому, что будет наблюдаться искусственная разница в амплитудах сигналов, принимаемых двумя этими приемниками. Этот эффект называется эффектом «косоглазия» телескопа. Разница в амплитудах, возникающая в результате эффекта, может быть велика по сравнению с типичными наблюдаемыми степенями круговой поляризации. К счастью, поскольку данный эффект не коррелирован между антеннами, его вклад в ошибку определения круговой поляризации будет меньше в \sqrt{N} раз, где N - число антенн, участвующих в РСДБ-наблюдениях. Поскольку амплитудная ошибка вследствие данного эффекта также меняется с азимутальным вращением в течение времени наблюдений, усреднение по времени позволяет практически полностью ее исключить.

Основной проблемой при калибровке данных для анализа круговой компоненты поляризации является необходимость определения отношения комплексных коэффициентов усиления (gains) приемников двух ортогональных круговых мод поляризации для каждой из антенн с большой точностью, так как ошибки в определении этих отношений вносят наибольший вклад в результаты обработки данных круговой поляризации. Наблюдая вместе с изучаемыми источниками один или несколько источников с нулевой или очень малой степенью круговой поляризации, можно «перенести» медленно меняющуюся составляющую отношения коэффициентов усиления приемников двух ортогональных мод, найденного для данного источника, на остальные источники выборки. Как правило, расписания наблюдений составляются так, что близкие на небесной сфере источники являются смежными по времени наблюдения в расписании, что гарантирует возможность такого «переноса». Описанный

метод носит название метода переноса поправок (gain-transfer) и был предложен в работе (Homan&Wardle 1999).

После применения метода переноса поправок остается неисправленной быстропеременная составляющая отношения коэффициентов усиления приемников двух ортогональных мод. Для уменьшения эффекта от этой составляющей можно воспользоваться методом, предложенным Д.К.Габуздой и реализованным автором настоящей диссертации. Метод состоит в раздельной самокалибровке корреляции приемников правой моды поляризации и корреляции приемников левой моды поляризации для каждой из пар антенн с использованием моделей интенсивности и круговой поляризации, полученных путем картографирования данных после применения метода переноса поправок.

Помимо ошибок, связанных с индивидуальными антеннами, существуют ошибки, связанные с отдельными базами и эти ошибки никак не учитываются при калибровке круговой поляризации. К счастью, для сети VLBA, данные с которой и использовались в настоящей диссертации, ошибки, связанные с отдельными базами, крайне малы.

В **Главе 4** приводятся результаты обработки данных круговой поляризации 70 АГЯ с использованием методик, описанных в главе 3. Для 41 АГЯ были использованы данные на трех частотах – 15, 22 и 43ГГц, для 29- только на 15ГГц. Для 9 источников круговая поляризация на парсековых масштабах была обнаружена впервые, для 9 источников были подтверждены более ранние результаты (Homan, Attridge&Wardle 2001, Homan&Lister 2006). Характерные обнаруживаемые степени круговой поляризации составляют десятые доли процента - проценты, максимальные – до нескольких процентов.

Для источников, наблюдавшихся в течение нескольких эпох, обнаружена постоянная на временных масштабах в несколько лет составляющая ККП, что свидетельствует о наличии в выбросах постоянной упорядоченной компоненты магнитного поля. Для всех 8 источников, в которых на 15ГГц была обнаружена круговая поляризация как в настоящей диссертации, так и в наблюдениях MOJAVE первой эпохи (Homan&Lister 2006), знак круговой поляризации находится в согласии.

В настоящей работе получены одни из первых данных круговой поляризации АГЯ на парсековых масштабах одновременно на нескольких

частотах. Хотя в большинстве случаев сигнал круговой поляризации на частоте 43ГГц выше, чем на двух более низких частотах, какой-то общей тенденции в частотной зависимости круговой поляризации не прослеживается. Для 11 источников, для которых круговая поляризация была обнаружена одновременно на двух или трех частотах, наблюдается как рост, так и падение сигнала круговой поляризации с частотой. Из 9 АГЯ, для которых круговая поляризация была обнаружена одновременно на частотах 15 и 22ГГц, 8 показали один и тот же знак поляризации. Из 7 источников, для которых она была обнаружена одновременно на частотах 22 и 43ГГц, в 5 случаях знак круговой поляризации на этих двух частотах был различным.

В 5 источниках (3С84, 3С273, 2128-123, 2134+004 и 2251+158) первой эпохи MOJAVE круговая поляризация была обнаружена в оптически тонком выбросе (Homan&Lister 2006). В настоящей диссертации круговая поляризация была обнаружена в оптически тонком выбросе 1334-127, 2223-052 и подтверждена в 3С279, тем самым, очевидно, механизм генерации круговой поляризации может эффективно работать и в оптически тонких областях. Пиковые значения интенсивности круговой поляризации во всех случаях наблюдались в РСДБ-ядрах выбросов.

Для источников 2145+067, OJ287, 0109+224 и 2223-052 максимум потока круговой поляризации на полученных картах смещен относительно интенсивности в сторону центральной машины. При этом для источников 2145+067 и OJ287, для которых круговая поляризация была обнаружена одновременно на нескольких частотах, это смещение наблюдалось на всех частотах.

Интересным результатом, полученным в настоящей диссертации является обнаружение поперечных структур круговой поляризации в выбросах. В двух случаях - 1055+018 и 2251+158 была обнаружена поперечная структура в виде пиков разного знака по разные стороны от выброса. В источниках 1334-127, 0133+476, 0823+033 и 1510-089 пик был смещен в поперечном к выбросу направлении. В источниках 1055+018, 0133+476, 1510-089 и 1334-127 такие структуры были обнаружены на частоте 43ГГц, что говорит в пользу необходимости дальнейшего анализа круговой поляризации на таких высоких частотах, позволяющего разрешать поперечную структуру поляризации. В 1510-089 поперечное

смещение пика поляризации в том же направлении, что и на 43ГГц наблюдалось и на 22ГГц. В источниках 2251+158 и 0823+033 поперечная структура была обнаружена на 15ГГц. Присутствие подобных поперечных структур вероятнее всего свидетельствует о наличии тороидальной компоненты магнитного поля в выбросах, характерной для тороидальных и спиральных полей.

Для источника 3С279 из эксперимента 15.03.2005г. на 43ГГц была обнаружена продольная структура круговой поляризации с двумя максимумами разного знака по разные стороны от максимума интенсивности. Хотя авторы (Homan&Lister 2006), также наблюдавшие подобные продольные структуры, считают, что последние могут появляться искусственно в результате ошибок фазовой калибровки, нельзя отрицать возможность того, что эти структуры являются реальными. Например, в главе 2 диссертации показывается, что они могут быть характерны для синхротронного механизма генерации круговой поляризации.

В **Заключении** перечислены и прокомментированы основные выводы и результаты диссертации, выносимые на защиту.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации содержатся в следующих рецензируемых публикациях:

1. Витрищак, В.М. и Габузда, Д.К. *Новые измерения круговой компоненты поляризации радиоизлучения активных ядер галактик на парсековых РСДБ-масштабах* // АЖ, 2007, том 84, стр. 771.
2. Vitriishchak, V.M., Gabuzda, D.C., Algaba, J.C., Rastorgueva, E.A., & O'Dowd, A. *The 15–43–GHz Radio Circular Polarization of 41 Active Galactic Nuclei* // MNRAS, в печати (2008), arXiv:0809.2556 [astro-ph]

3. Gabuzda, D. C., Vitriřchak, V. M., Mahmud, M., O'Sullivan, S. P. *Radio circular polarization produced in helical magnetic fields in eight active galactic nuclei* // MNRAS, 2008, том 384, стр. 1003-1014
4. Gabuzda, D. C., Vitriřchak, V. M., Mahmud, M., O'Sullivan, S. P. *Circular Polarization and Helical B Fields in AGN* // «Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma-ray» ASP Conference Proceedings, ред. T. A. Rector и D. DeYoung, ASPC, 2008, том 386, стр. 444
5. Gabuzda, D. C., Vitriřchak, V. M. *Parsec-Scale Circular Polarization Measurements of BL Lac Objects* // «Future Directions in High Resolution Astronomy: The 10th Anniversary of the VLBA» ASP Conference Proceedings, ред. J. Romney и M. Reid, ASPC, 2005, том 340, стр. 180
6. Vitriřchak, V.M., Gabuzda, D.C. *The parsec-scale Polarisation of Active Galactic Nuclei at 22 and 15GHz* // труд конференции High Energy Phenomena in Relativistic Outflows, IJMPD, в печати (2008)

Личный вклад автора в совместные работы

Все работы, приведенные в списке публикаций по теме диссертации, были выполнены в соавторстве. Автором диссертации в этих работах была проведена вся калибровка данных круговой поляризации после первичной калибровки и построены все карты круговой поляризации. Подавляющее большинство карт полной интенсивности, использовавшихся для калибровки, были получены соавторами или заимствованы из других работ при согласии их авторов. Все теоретические выкладки и расчеты, приведенные в работах, за исключением выкладок, заимствованных из других работ принадлежат автору. Идея метода раздельной калибровки из работы (Витрищак и Габузда 2007) принадлежит Д.К. Габузде, реализация метода и его применение были выполнены автором диссертации. Данные мер вращения, спектральных индексов и линейной поляризации были получены соавторами или заимствованы из цитируемых работ.

Список литературы

1. Homan, D.C. and Wardle, J.F.C. *Detection and measurement of parsec-scale circular polarization in four AGNs* // AJ. 1999, Vol. 118, p. 1942.
2. Homan, D.C., Attridge, J.M. and Wardle, J.F.C. *Parsec-scale circular polarization observations of 40 blazars* // ApJ. 2001, Vol. 556, p. 113.
3. Homan, D.C. and Wardle, J.F.C. *High levels of circularly polarized emission from the radio jet in NGC 1275 (3C84)* // ApJ. 2004, Vol. 602, p. L13.
4. Homan, D.C. and Lister, M.L. *MOJAVE: Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. II* // AJ. 2006, Vol. 131, p. 1262.
5. Jones, T.W., & O'Dell, S.L.. *Transfer of polarized radiation in self-absorbed synchrotron sources. I. Results for a homogenous source* // ApJ. 1977, Vol. 214, p. 552.
6. Beckert, B., & Falcke, H. *Circular polarization of radio emission from relativistic jets* // A&A. 2002, Vol. 388, p. 1106-1119
7. Blandford, R.D., & Königl, A. *Relativistic jets as compact radio sources* // ApJ, 1979, Vol 232, p. 34-48
8. Lyutikov, M., Pariev, V., Gabuzda, D. C. *Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets* // MNRAS, 2005, том 360, стр. 869
9. Blandford R. D. *Extragalactic Jets: Some Unanswered Questions and the Prospects for GLAST* // «Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma-ray» ASP Conference Proceedings, ред. Т. А. Рector и D. DeYoung, ASPC, 2008, том 386, стр. 3B