

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи
УДК 52-13; 52-14; 52-65; 52-77; 524.7-1/-8;

Кравченко Евгения Васильевна

**Многочастотные поляриметрические
исследования физических условий
в активных ядрах галактик**

Специальность 01.03.02 —
«астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: чл.-кор. РАН, проф. РАН
Ковалев Юрий Юрьевич

Москва — 2017

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Радиointерферометрия. Методы наблюдений, обработки и анализа данных	19
1.1 Принцип работы радиointерферометра	19
1.2 Система апертурного синтеза – радиointерферометр VLBA	21
1.3 Система апертурного синтеза VLA	23
1.4 Поляриметрия	24
1.5 Калибровка поляризационных наблюдений	25
1.6 Построение радиоизображений	27
1.6.1 Самокалибровка	27
1.6.2 Гибридное картографирование	28
1.7 Моделирование структуры струи	29
1.8 Совмещение карт источников на разных частотах	29
Глава 2. Фарадеевское вращение в активных ядрах галактик	31
2.1 Фарадеевское вращение. Постановка задачи	31
2.2 Методика построения карт фарадеевского вращения	35
2.3 Наблюдения поляризационных калибраторов телескопом VLA в диапазоне 1.4–43 ГГц	37
2.3.1 Наблюдения	37
2.3.2 Анализ данных наблюдений	38
2.3.3 Результаты наблюдений. Обсуждение	39
2.4 Квазары 3C 48, 3C 138 и 3C 147 в наблюдениях решеткой VLA на частотах 18–48 ГГц	42
2.4.1 Наблюдения и обработка данных	42
2.4.2 Результаты наблюдений	43
2.4.3 Обсуждение	46
2.5 Двадцать активных ядер галактик в наблюдениях телескопом VLBA в диапазоне 1.4–15 ГГц	47

2.5.1	Особенности выборки	48
2.5.2	Наблюдения и обработка данных эксперимента	48
2.5.3	Результаты наблюдений	51
2.5.4	Поведение величины меры вращения во времени	73
2.6	Распределение фарадеевского вращения поперек струй АЯГ	76
2.6.1	Поперечные профили и градиенты фарадеевского вращения	76
2.6.2	VLBA наблюдения струй 20 АЯГ в диапазоне 1.4–15.4 ГГц и обработка данных	78
2.6.3	Результаты наблюдений	83
2.7	Большие величины фарадеевского вращения и синтез фарадеевских мер вращения	84
2.7.1	Увеличение фарадеевского вращения при приближении к центру АЯГ	84
2.7.2	Метод синтеза фарадеевской меры вращения	86
2.7.3	Магнетар J1745–2900	87
2.8	Выводы	89
Глава 3. Степень и направление линейной поляризации в струях активных ядер галактик		93
3.1	Деполаризация, фарадеевские эффекты и магнитные поля струйных выбросов АЯГ	93
3.2	Наблюдения и обработка данных	97
3.3	Результаты наблюдений: свойства и распределение линейной поляризации по струе	100
3.4	Результаты наблюдений: Поляризационная структура струй	105
3.4.1	Ядра и оптически прозрачные компоненты струйных выбросов	105
3.4.2	Карты EVPA	106
3.4.3	Комментарии по отдельным источникам	108
3.5	Обсуждение результатов	135
3.6	Выводы	137
Глава 4. Широкодиапазонное исследование квазара S4 1030+61		139
4.1	Введение: квазар S4 1030+61. Постановка задачи	139
4.2	Наблюдения	141
4.3	Обсуждение и результаты	144
4.3.1	Структура струи и скорости компонентов	144
4.3.2	Поведение спектрального индекса и его связь с вбросом плазмы в начале струи	146

4.3.3	Моделирование кривой блеска на 15 ГГц набором вспышек .	146
4.3.4	Положение РСДБ ядра и оценка напряженности магнитного поля	148
4.3.5	Яркостная температура и оценка физических параметров . .	151
4.3.6	Гамма-излучение и его связь с радиодиапазоном	152
4.3.7	Поляризационные свойства и связь с активностью источника	154
4.4	Выводы	157
Заключение		159
Список иллюстраций		162
Список таблиц		164
Используемые единицы измерений и аббревиатуры		165
Список цитируемой литературы		167

Введение

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 $\sim 10^{47}$ 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]. Основопологающие 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. 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, [4]), сопровождающимся формированием биполярных выбросов (струй, джетов). Они представляют собой высоко коллимированные потоки плазмы, движущиеся с ультрарелятивистскими скоростями [5]. Большинство релятивистских струй радиогромких АЯГ видны земному наблюдателю под малыми углами зрения [6]. 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 [7] и экстремально высокие яркостные температуры [8]. Более того, АЯГ демонстрируют переменность излучения во

всем электромагнитном спектре на масштабах от нескольких минут [9] до десятилетий [10]. А также показывают высокую степень линейной поляризации в радиодиапазоне [11].

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 [12], как и то, где именно рождается и как распространяется это излучение. Например, широкоизвестные модели АЯГ [13] неспособны объяснить новые результаты наземно-космического радиоинтерферометра Радио-Астрон [14; 15]. Наблюдаемые в проекте высокие яркостные температуры АЯГ [12] требуют привлечения таких моделей, как протонные релятивистские струи [16] или когерентное излучение [17]. Эти модели также успешно решают проблему генерации высокочастотного излучения АЯГ ($\gtrsim 10^{16}$ Гц, [18]), в том числе космических лучей сверхвысоких энергий [19].

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 [20; 21]. При этом формирование струй АЯГ происходит уже на расстоянии нескольких гравитационных радиусов от центра АЯГ [22]. Современные теоретические модели этих объектов согласуются с этими выводами, и отводят магнитным полям значительную роль в формировании и распространении струйных выбросов АЯГ [23], предсказывая напряженность магнитных полей около 10^2 – 10^4 Гс в окрестности ЧД [24; 25]. 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 [26]) 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 [27–29] или упорядоченное, широкомасштабное поле [30–32]. Какова геометрия и структура магнитных полей, формируются ли плазменные неустойчивости и релятивистские ударные волны в струях [33] 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 [34]. 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 исследования требуют большого наблюдательного времени и дополнительных усилий для калибровки данных, многие современные работы выполняются без учета этих эффектов, например, [11]. Помимо этого многие авторы рассматривают неодновременные поляриметрические наблюдения АЯГ на разных частотах, например, [35]. 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 [36]. 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, [37]) 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 [15], 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 РСДБ карты фарадеевской меры вращения для 21 квазара 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 спиралевидного магнитного поля во внешних областях струй, наличие которого предсказывается большинством теоретических и аналитических моделей активных ядер галактик.

2. Определены действующие деполяризационные механизмы и физические свойства вещества, окружающего релятивистские струи 20 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. Фарадеевский экран может содержать упорядоченные магнитные поля, однако вклад хаотично ориентированных магнитных полей существенен. Построены новые РСДБ карты ориентации истинного позиционного угла электрического вектора 20 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 на протяжении 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 предложено рассматривать структуру струйных выбросов активных ядер галактик в виде «сердцевин» 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 22 квазаров, показывающие распределение меры вращения в струях объектов на масштабах парсек. Для 20 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. 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 этого оценены и изучены как физические условия в АЯГ, так и геометрия магнитных полей в разных областях 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 выявлены 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 струй АЯГ, которые будут использованы в дальнейшем изучении струйных выбросов 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 [17], привлекаемые для объяснения результатов, получаемые в рамках наблюдений АЯГ [12] 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 [38] 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 [39] 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, Пущино (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», Пущино (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 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. астроном. 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 нояб-

ря 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 «TCAL0004» 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 «TPO0003» 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 20 страниц.

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 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.

В главе 2 рассмотрены особенности и свойства распределения фарадеевской меры вращения в 30 активных ядрах галактик и в области Галактического центра Стрельца A^* на основе обработки данных наблюдений четырех экспериментов на телескопах VLA и VLBA в диапазоне 1.4–48 ГГц. Глава содержит анализ распределения фарадеевского вращения вдоль и поперек струйных выбросов АЯГ, исследования поведения меры вращения во времени, результаты поиска больших и экстремально больших мер вращения и опробации новейшей методики синтеза фарадеевских мер вращения.

В главе 3 рассмотрены свойства вещества и особенности конфигурации магнитных полей 20 АЯГ по наблюдениям на VLBA в диапазоне 1.4–15.4 ГГц. Представлены результаты моделирования поляризационных спектров ядер и оптически прозрачных компонентов струй и анализ скорректированных за фарадеевское вращение карт распределения позиционного угла электрического вектора линейной поляризации вдоль струй источников.

В главе 4 приводятся результаты изучения физических условий и процессов в квазаре S4 1030+61 во время и после яркой вспышки в гамма-диапазоне электромагнитного спектра. Приводятся результаты анализа физических свойств

источника по наблюдениям в радио и гамма-диапазоне.

В заключении сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту, и приведены перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Глава 1

Радиоинтерферометрия. Методы наблюдений, обработки и анализа данных

Данная глава содержит описание методик и обработки данных наблюдений, получаемых радиоинтерферометрами. В ней приводится описание используемых телескопов, принципов и основных этапов пост-корреляционной обработки данных, а также особенностей работы с радиоинтерферометрическими данными. В том числе в главе определяются физические величины, используемые в работе.

1.1 Принцип работы радиоинтерферометра

Нетепловые процессы, генерируемые в релятивистских струях АЯГ, делают эти источники видимыми во всем электромагнитном спектре [40]. На настоящий момент именно радиоастрономия позволяет проводить детальные исследования структуры и кинематики струй от областей их формирования в центре АЯГ (суб-парсеки) до регионов взаимодействия с межгалактическим веществом (кило- и мегапарсеки). Это достигается путем использования радиоинтерферометров [37], представляющих собой набор радиоантенн, разнесенных на большие и сверх-большие расстояния и производящих одновременные наблюдения источников. Вследствие этого угловое разрешение интерферометра определяется не апертурой отдельной антенны, а расстоянием между двумя элементами, именуемое базой. Помимо высокой разрешающей способности и чувствительности, аппаратура радиоинтерферометров позволяет наблюдать источники в нескольких частотных диапазонах одновременно или квазиодновременно, а также измерять линейную и круговую поляризации излучения.

Отличительной особенностью радиоинтерферометров является неполное за-

полнение апертуры, возникающее из-за ограниченного числа входящих в них элементов. Принцип работы такого телескопа основан на корреляции сигналов $E_i(r)$ и $E_j(r)$, регистрируемых каждой парой антенн в каждый момент времени:

$$V_{ij}(t) = E_i(t)E_j^*(t + \tau). \quad (1.1)$$

Функция $V_{ij}(x)$ представляет собой пространственную корреляционную функцию, функцию видности, и является основной величиной, измеряемой радионтерферометром [41].

Согласно теореме Ван Циттерта-Зернике [41], видность является функцией расстояния между элементами интерферометра, и определяется распределением интенсивности излучения от космического источника $I(l, m)$ как

$$V(u, v) = \int \int I(l, m) e^{2\pi i(ul+vm)} dldm, \quad (1.2)$$

где l, m – угловые координаты источника на небесной плоскости, u, v – пространственные частоты, измеряемые в плоскости телескопа (называемой также плоскостью изображения). Набор пространственных частот соответствует количеству возможных пар антенн интерферометра и определяется проекцией на плоскость расстояния между парами антенн, которая меняется по мере движения источника по небу. Таким образом, радиотелескоп измеряет Фурье-преобразование радиояркости области неба.

Космические источники характеризуются потоком энергии dW , падающим под углом θ на площадку dA с телесного угла $d\Theta$ в полосе частот $d\nu$, определяемым как

$$dW = I(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega dA d\nu. \quad (1.3)$$

Полный поток энергии, принятый от источника, тогда выражается как

$$W = S_\nu A \Delta\nu = A \Delta\nu \int I(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega, \quad (1.4)$$

где элемент телесного угла $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$, а единицы измерения плотности потока излучения S_ν Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2/\text{Гц}$).

Измеряемая парой антенн i и j функция видности V_{ij} связана с реальной функцией видности V'_{ij} следующим соотношением:

$$V_{ij} = g_i g_j V'_{ij}. \quad (1.5)$$

Коэффициенты g_i и g_j – комплексные усиления антенн, которые определяются при амплитудной и фазовой калибровке наблюдательных данных.

Таблица 1.1 — Антенны радионтерферометра VLBA и их местоположение. Неопубликованный пояснительный материал, таблица сделана диссертантом.

Название	Сокращ. назв.	Расположение
Mauna Kea	МК	Гавайи
Owens Valley	OV	Калифорния
Brewster	BR	Вашингтон
North Liberty	NL	Айова
Hancock	HN	Нью-Гэмпшир
Kitt Peak	КР	Аризона
Pie Town	PT	Нью-Мексико
Fort Davis	FD	Техас
Los Alamos	LA	Нью-Мексико
St. Croix	SC	Виргинские острова

1.2 Система апертурного синтеза – радионтерферометр VLBA

В данной работе использованы наблюдения, полученные на радионтерферометре VLBA¹ Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO²) США как в рамках отдельных проектов (коды «S2087E», «BK134»), так и в рамках программы MOJAVE (*англ.* Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA experiments, [42; 43]) по мониторингу компактных внегалактических источников. Интерферометр VLBA состоит из 10 радиотелескопов диаметром 25 м, расположенных на территории разных штатов США (см. таблицу 1.1). Максимальное расстояние между телескопами решетки VLBA составляет ~ 8611 км. Это позволяет исследовать космические источники с угловым разрешением около единиц и десятка миллисекунд дуги.

Радиотелескопы системы VLBA могут вести наблюдения на частотах от 300 МГц до 90 ГГц, что соответствует длинам волн 90 см – 3 мм, соответственно. В данной работе использовано семь частотных диапазонов VLBA, приведенных в таблице 1.2. Время наблюдения системой VLBA каждого источника составляет около одного часа в рамках индивидуальных проектов («S2087E» и «BK134») и около 30–50 минут в рамках программы MOJAVE.

Первичная обработка «сырых» данных с разных телескопов до конца 2009 г. выполнялась аппаратным коррелятором VLBA, а после этого времени производится программным коррелятором DiFX [44], расположенными в научном опе-

¹<https://science.lbo.us/facilities/vlba/docs/manuals/oss>

²The National Radio Astronomy Observatory is a facility of the National Science Foundation operated under cooperative agreement by Associated Universities, Inc.

рационном центре в Сокорро (Нью-Мексико, США). Последующая обработка данных (калибровка) производилась с помощью пакетов AIPS (*англ.* Astronomical Image Processing System, [45]) и Difmap [46; 47]. Обработка наблюдений выполнялась согласно стандартным процедурам, описанным в руководстве AIPS³ или CASA⁴. В том числе, она включает в себя следующие основные шаги:

- маркировка «плохих» данных, используя измерения системных температур, полученных в результате плохих погодных условий или неисправной работы аппаратуры телескопа;
- калибровка и внесение поправок на амплитуду сигнала с использованием системных температур и кривых усиления, в том числе учет систематического сдвига амплитуды, вносимым сэмплерами (процедура ACCOR);
- учет поправок, вызванных поглощением сигнала в атмосфере (процедура APCAL);
- коррекция фазы сигнала на каждой антенне в зависимости от параллактического угла положения антенны;
- удаление «инструментальной» задержки сигнала на каждой базе в зависимости от частоты, вызванной прохождением сигнала через электронику радиоантенн (процедура PCCOR). Для этого используются наблюдения яркого источника (например, OJ 287 и 0923+392);
- остаточные задержки фазы в зависимости от времени удалялись с помощью процедуры FRINGE;
- коррекция амплитуды и фазы сигнала за полосу пропускания вводилась с помощью наблюдения источника с плоским спектром (процедура BPASS);
- усреднение данных по спектральным каналам и времени;
- поляризационная калибровка (см. §1.5);
- калибровка амплитуды и фазы в процессе гибридного картографирования (см. §1.6.1 и §1.6.2)

В результате процедуры калибровки начало координат изображения в полной интенсивности помещается в фазовый центр. Ему соответствует решение, для которого задержки ото всех антенн радиоинтерферометра скомпенсированы и равны нулю.

³<http://www.aips.nrao.edu/cook.html>

⁴https://casaguides.nrao.edu/index.php?title=VLA_Continuum_Tutorial_3C391

Таблица 1.2 — Используемые в работе частотные диапазоны радионтерферометра VLBA в наблюдениях, выполненных в рамках проектов «S2087» и «BK134». Неопубликованный пояснительный материал, таблица сделана диссертантом.

Название	Частота (ГГц)	Полоса (МГц)
L	1.41, 1.66	16
S	2.28, 2.39	16
C	4.60, 5.00	16
X	8.11, 8.43	16
K _u (U)	15.4	32
K	23.8	32
Q	43.2	32

1.3 Система апертурного синтеза VLA

В работе нами также использовались данные, полученные на радиointерферометре VLA⁵ (*англ.* Very Large Array) Национальной радиоастрономической обсерватории США в рамках проектов «SE0824F», «TPOLO003» и «TCAL0004». Интерферометр VLA представляет собой решетку из 27 радиотелескопов диаметром 25 м, расположенных в Сокорро (Нью-Мексико). Максимально возможное удаление антенн решетки VLA составляет ~ 36 км (конфигурация «А»). Большое количество антенн, выполняющих одновременное наблюдение космических источников, делает этот телескоп одним из самых чувствительнейших в мире.

VLA может наблюдать космические объекты на частотах от 230 МГц до 50 ГГц, что соответствует длинам волн 90 см – 7 мм соответственно. В данной работе использовались разные частотные диапазоны VLA, информация о которых дана в таблице 1.3.

Корреляция сырых данных с телескопа выполняется в научном операционном центре в Сокорро. Последующая обработка данных производилась с помощью пакета Obfit⁶ [38] и включала в себя те же шаги, что описаны в §1.2.

⁵<https://science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/propvla>

⁶<http://www.cv.nrao.edu/~bcotton/Obfit.html>

Таблица 1.3 — Центральные частоты и ширины спектральных полос в рамках программ наблюдений «TCAL0004», «TPOLO0003» и «SE0824F», выполненных на VLA. Неопубликованный пояснительный материал, таблица сделана диссертантом.

Назв.	TPOLO0003		TCAL0004		SE0824F	
	Част. (ГГц)	Шир. (МГц)	Част. (ГГц)	Шир. (МГц)	Част. (ГГц)	Шир. (МГц)
L	1.42, 1.49, 1.80, 1.86	64	...	...	...	...
S	3.06, 3.12, 3.20, 3.25	64	...	...	...	...
C	4.86, 4.93, 4.99, 5.05	64	...	...	...	...
X	8.37, 8.43, 8.50, 8.56	64	...	...	...	...
K _u	14.86, 14.93, 14.99, 15.06	64	...	...	...	...
K	22.37, 22.46, 22.54	85	18.94, 25.44	1024	...	...
K _a	33.47, 33.56, 33.65	85	31.94, 36.94	1024	...	...
Q	43.22, 43.34	128	41.94, 47.94	1024	44.77	8192

1.4 Поляриметрия

Радиометры большинства научных радиоантенн (в том числе VLA и VLBA) способны измерять поляризацию (как линейную, так и круговую) электромагнитной волны. В поляриметрической моде входящий сигнал расщепляется на две компоненты (правую R и левую L круговую), плоскость поляризации которых отличается на 90° . Поскольку выходной сигнал радиоинтерферометра представляет собой корреляцию сигналов, согласно уравнению (1.1), то каждая пара антенн производит четыре измерения видности:

$$\begin{aligned}
 V_{R1R2} &= \langle E_{R1} E_{R2}^* \rangle = (I + V)/2 \\
 V_{L1L2} &= \langle E_{L1} E_{L2}^* \rangle = (I - V)/2 \\
 V_{R1L2} &= \langle E_{R1} E_{L2}^* \rangle = (Q + iV)/2 \\
 V_{L1R2} &= \langle E_{L1} E_{R2}^* \rangle = (Q - iV)/2,
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

где I, Q, U и V – параметры Стокса электромагнитной волны [48; 49], которые, в свою очередь, выражаются через измеренные видности как

$$\begin{aligned}
 I &= V_{R1R2} + V_{L1L2} \\
 V &= V_{R1R2} - V_{L1L2} \\
 Q &= V_{R1L2} + V_{L1R2} \\
 U &= -i(V_{R1L2} - V_{L1R2}).
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

Величина линейной поляризации p и направление преимущественных колебаний электрического вектора χ (позиционный угол электрического вектора

линейной поляризации, угол или направление линейной поляризации, поляризационный угол или EVPA от *англ.* Electric Vector Position Angle) в плоскости телескопа определяются через параметры Стокса следующим образом:

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{Q^2 + U^2} \\ \chi &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{U}{Q}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

При этом степень поляризации m задается следующей формулой:

$$m = p/I. \quad (1.9)$$

Согласно теории приближенных вычислений, ошибки определения p , χ и m определяются следующим образом, соответственно:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \frac{Q + U}{\sqrt{Q^2 + U^2}}, \\ \sigma_\chi &= \frac{\sqrt{\sigma_U^2 Q^2 + \sigma_Q^2 U^2}}{2(Q^2 + U^2)}, \\ \sigma_m &= \frac{1}{I} \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_I^2 \frac{p^2}{I^2}}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

1.5 Калибровка поляризационных наблюдений

Существует ряд факторов, которые могут оказывать влияние на регистрируемую интерферометром поляризацию. Среди них: (1) вращение плоскости поляризации волны при прохождении через атмосферу, (2) неидеальное измерение ортогональных поляризаций (известное как перетекание поляризации [50]), (3) появление задержки сигнала между ортогональными R и L компонентами при прохождении через аппаратуру телескопа (R - L задержка).

Учет вышеперечисленных факторов необходим перед использованием получаемых данных в научных целях (см. [51]). Определение коррекций, вносимых этими эффектами, осуществляется наблюдением нескольких ярких калибровочных источников с различными свойствами: с сильной величиной линейной поляризации и/или полностью деполаризованных источников. К широко известным источникам такого типа относятся, например, 3C 48, 3C 138, 3C 147, 3C 286 (см. [52]). Выбор источника из этого списка определяется частотой наблюдений (т.к. он может быть недостаточно ярким) и максимальной базой интерферометра (поскольку источник может быть разрешен, и его структура распадется

на несколько поляризационных компонент с различными свойствами). Для точного определения коррекции, необходимо, чтобы наблюдения поляризационных калибровочных источников проводились несколько раз во время научного сеанса и имели при этом разные параллактические углы. Из-за вращения небесной сферы и изменения положения источников на небесной сфере, в таком случае паразитная поляризация может быть отделена от полезного сигнала с высокой точностью.

Величины инструментальной поляризации антенн, возникающей из-за перетекания сигнала между ортогональными компонентами, могут быть определены методом замыкания фаз (определение D-членов, [53]) или использованием модели эллиптического облучателя антенны [54; 55]. Робертс и др. [51] показал, что оба подхода дают сравнительные результаты. Тем не менее, исторически сложилось, что наблюдения, выполненные на VLBA, калибруются с использованием первого метода (процедура LPCAL в пакете AIPS, [50]), в то время как наблюдения телескопом VLA обрабатываются второй методикой (процедура PCAL и PCal в пакетах AIPS и Orbit, соответственно).

Робертсом и др. [51] и Гомезом и др. [56] было показано, что значения D-членов сохраняют свои значения в течении длительных интервалов времени, что может быть использовано для повышения точности определения их значений в единичных экспериментах. Для определения D-членов с более высокой точностью, нами были использованы величины паразитной инструментальной поляризации, полученных в рамках разных проектов и временных интервалов. В диапазонах С и X привлечены данные проекта «VK134» (даты наблюдений: 2007-03-01–2010-10-18), в диапазонах К и Q использованы данные наблюдений проекта «S2087» (2009-08-28–2010-10-18), и в U диапазоне с использованием 10-летних данных в рамках программы MOJAVE.

Абсолютная привязка поляризационных углов производится разными способами. Это могут быть (1) наблюдения яркого источника с постоянным, известным направлением поляризации (например, 3C 286), (2) наблюдения планет или комет с известными поляризационными характеристиками и (3) наблюдения ярких источников, которые входят в программы мониторинга других наблюдательных данных (например, программа MOJAVE, поляризационный мониторинг VLA/VLBA⁷ [57] и мониторинг Бостонского Университета⁸).

⁷<http://www.vla.nrao.edu/astro/calib/polar/>

⁸<https://www.bu.edu/blazars/research.html>

1.6 Построение радиоизображений

Согласно уравнению (1.2), измеряемая радиотелескопом видность может быть использована для восстановления распределения интенсивности по изучаемому источнику, в том числе для построения его радиоизображения. Применяя обратное Фурье-преобразование к уравнению (1.2), мы получаем:

$$I(l, m) = \int \int V(u, v) e^{2\pi i(ul+vm)} dudv. \quad (1.11)$$

Функция видности источника измеряется не во всех точках (u, v) -плоскости и является комплексной функцией, вследствие чего задача восстановления распределения интенсивности источника не имеет прямого корректного решения. Одним из самых распространенных методов получения радиоизображений является метод CLEAN [58], используемый в данной работе. Он основан на представлении распределения интенсивности в виде модели, состоящей из точечных источников, и его свертки с синтезированной диаграммой направленности по уровню половинной мощности интенсивности, HPBW (*англ.* Half Power Beam Width).

Исследуемые в данной работе радиогромкие активные ядра галактик обладают релятивистскими струями, ориентированными под малыми углами к лучу зрения. Эффект доплеровского усиления излучения движущейся релятивистской плазмы [3] приводит к тому, что на радиоизображении этих источников доминирует излучение струй.

1.6.1 Самокалибровка

Наличие нескомпенсированных ошибок в фазе и амплитуде сигнала, связанных с отдельными антеннами и возникающих по причине недоучтенного влияния атмосферы или неидеальности первичной калибровки, приводит к «рассеиванию» сигнала по изображению, увеличивая шум и ухудшая качество изображения. Применение метода «самокалибровки» может дать значительное улучшение динамического диапазона изображения источника. Применение этой процедуры обосновано на ярких источниках со слабым протяженным потоком. Метод использует доступную или приближенную модель источника и основан на минимизации функции S_k , являющейся суммой квадратов абсолютных значений разности измеряемой V_{ij} (см. уравнение (1.5)) и модельной M_{ij} функций

видности:

$$S_k = \sum_k \sum_{i \neq j} \omega_{ij} |g_i(t_k) g_j^*(t_k) V_{ij} - M_{ij}|^2, \quad (1.12)$$

где t_k - временной интервал самокалибровки.

Процедура может применяться как для устранения ошибок фазы в комплексных усилениях антенн, так и совместно для компенсации ошибок в амплитуде и фазе. Первый шаг самокалибровки обычно выполняется с использованием модели точечного источника. На следующем шаге найденные коэффициенты применяются к первоначальным данным. Далее находится новая модель источника и цикл повторяется снова. Предпочтительнее сначала применять только фазовую самокалибровку, а затем уже амплитудную. После того как удовлетворительная модель источника получена, можно проводить фазовую и амплитудную самокалибровку. При этом сначала решение ищется на продолжительном интервале времени и в последующем он постепенно уменьшается.

1.6.2 Гибридное картографирование

Совместное использование процедур нахождения наилучшей модели (в нашем случае, CLEAN) и самокалибровки называется гибридным картографированием. Оно реализовано во многих программных пакетах, в том числе в Difmap и Obit/MFImager [59], которые использовались в данной работе для построения и работы с радиоизображениями, полученными на радиоинтерферометрах VLBA и VLA, соответственно.

Финальные изображения источников построены с использованием естественного взвешивания (*англ.* natural weighting) данных функции видности (вес видности на данной базе обратно пропорционален квадрату среднеквадратичного отклонения). Размер пикселя на изображении рассчитывался в предположении, что он должен быть меньше синтезированной диаграммой направленности по уровню половинной мощности в 3–5 раз. Таким образом, средние значения размера пикселя (ячейки) на изображениях, полученных VLBA, составили: 1, 0.6, 0.3, 0.2, 0.1, 0.06 и 0.03 мсек дуги в диапазонах L, S, C, X, U, K и Q, соответственно. Для телескопа VLA размер пикселя на карте зависит от использованной конфигурации, а его величина дана в соответствующих параграфах работы.

1.7 Моделирование структуры струи

Изображение источника может быть представлено в виде набора отдельных компонентов (или деталей). Это искусственное моделирование структуры источника используется для качественной оценки его свойств, в реальности же структура джетов, скорее всего, является непрерывной [1]. Моделирование было выполнено в пакете Difmap (процедура `modelfit`) в области пространственных частот (u, v) с использованием набора компонентов с эллиптическим (круговым) двумерным гауссовым распределением интенсивности. Каждый компонент описывался четырьмя–шестью параметрами, определяемыми в процессе подгонки модели к наблюдательным данным: положением относительно центра карты (по прямому восхождению и склонению), размером (три параметра в случае эллиптического компонента и один параметр в случае дельта-функции) и плотностью потока. При этом количество компонентов не ограничивалось и определялось структурой каждого источника индивидуально.

В результате анализа модели источников, исследуемых в работе, содержат от трех до десяти компонентов. При этом самый яркий компонент в большинстве случаев является «радиоядром» («ядро» или «РСДБ ядро») и представляет собой видимое начало релятивистской струи. Ядро ассоциируется с местом в струе, в котором оптически толстое излучение из-за эффектов синхротронного самопоглощения становится частично прозрачным для наблюдений (оптическая толщина $\tau \approx 1$, см. [60; 61]). Абсолютное расстояние РСДБ ядра от центральной сверхмассивной ЧД зависит от частоты наблюдения и составляет около $10^3 - 10^4 R_g$ на см и мм волнах [62]. Гравитационный радиус R_g определяется параметрами черной дыры АЯГ как $R_g = 2GM/c^2$, где G – гравитационная постоянная, M – масса черной дыры, c – скорость света. Величина R_g для сверхмассивной черной дыры активного ядра галактики $\sim 10^9$ солнечных масс (являющейся типичной для этих объектов, например, [63]) составляет $\sim 10^{-4}$ пк.

1.8 Совмещение карт источников на разных частотах

Процедура фазовой самокалибровки, используемая в гибридном картографировании, теряет информацию об абсолютном положении объекта на небе и смещает положение РСДБ ядра ближе к фазовому центру карты. При этом его положение смещено относительно начала координат из-за наличия других компонентов в протяженной струе источника. При исследовании изображений объ-

екта, выполненных на разных частотах, требуется привести эти изображения к одному положению на небесной сфере. Совмещение карт может быть выполнено с использованием нескольких алгоритмов: (1) двумерной кросс-корреляцией [64] и (2) совмещением положений оптически прозрачного компонента струи (например, [65]). Оба метода основаны на предположении о том, что оптически тонкое синхротронное излучение генерируется в одних и тех же пространственных областях струй, выглядящих одинаково на разных частотах. При этом, совмещение карт методом (1) выполняется в области изображения и предполагает что, величина спектрального индекса в рассматриваемой области остается постоянной. В свою очередь, метод (2) использует результаты моделирования струи источника отдельными компонентами в области пространственных частот.

Спектральный индекс α в работе определяется следующим выражением:

$$S \propto \nu^\alpha. \quad (1.13)$$

Глава 2

Фарадеевское вращение в активных ядрах галактик

В настоящей главе рассмотрены особенности и свойства распределения фарадеевской меры вращения в 30 активных ядрах галактик и в области Галактического центра Стрельца A^* на основе обработки данных наблюдений четырех экспериментов. Анализируемые эксперименты выполнены на телескопах VLA и VLBA в различных частотных диапазонах, с целью провести разнообразный анализ ионизованной замагниченной среды АЯГ, в том числе исследовать свойства и местоположение вещества, образующего фарадеевское вращение. Для этого проведен анализ распределения фарадеевского вращения вдоль (§2.3, §2.4 и §2.5) и поперек струйных выбросов (§2.6), исследовано поведение меры вращения во времени (§2.3, 2.4 и 2.5), произведены поиски экстремально больших мер вращения и опробована новейшая методика синтеза фарадеевских мер вращения (§2.4 и 2.7). Диссертант не участвовал в проведении наблюдений, а занимался обработкой и анализом данных экспериментов и написанием статьей. Основной текст и рисунки данной главы опубликованы в работах [A1; A2; A4], представлены и опубликованы в трудах конференций [B1-B4; B10].

2.1 Фарадеевское вращение. Постановка задачи

Распространение электромагнитного излучения в замагниченной среде сопровождается эффектом Фарадея или фарадеевским вращением, открытым в 1845 г. Майклом Фарадеем [66]. Это эффект вызывает вращение плоскости поляризации волны. Его величина характеризуется мерой вращения (МВ или RM, *англ.* rotation measure, [67]), которая пропорциональна напряженности компоненты магнитного поля, направленной вдоль направления распространения излучения, B_{\parallel} (мГс), и концентрации заряженных частиц n_e (см^{-3}) на пути l (пк),

проходимом в замагниченной плазме:

$$\text{RM} = 812 \int_{\text{LoS}} n_e \mathbf{B}_{\parallel} d\mathbf{l}. \quad (2.1)$$

Единицы измерения меры вращения – рад/м². Эффект Фарадея в наблюдениях проявляется в зависимости поляризационного угла излучения χ (см. уравнение (1.8)) от длины волны λ , которая в общем случае выглядит как:

$$\text{RM} = \frac{d\chi}{d(\lambda^2)}, \quad (2.2)$$

и в случае внешнего вращения, когда область излучения находится позади замагниченной заряженной среды (фарадеевский или вращающий экран) относительно наблюдателя, мера вращения становится линейной функцией квадрата длины волны:

$$\chi = \chi_0 + \text{RM}\lambda^2, \quad (2.3)$$

где χ_0 – внутренний EVPA области излучения. Приемники радиоантенн измеряют величину позиционного угла χ с неопределенностью $\pm 180^\circ \cdot n$, где n – количество поворотов позиционного угла, которое электромагнитная волна может совершить за время распространения от источника до наблюдателя.

Помимо фарадеевского вращения существуют другие поляризационные эффекты [34], вызывающие не только нелинейное изменение поляризационного угла с квадратом длины волны, но и самой величины поляризации, т.е. деполаризацию. Подробное эти эффекты обсуждаются в Главе 3.

Из уравнений (2.1) и (2.2) следует, что наблюдения на нескольких длинах волн могут использоваться для анализа характеристик вещества и физических условий струйных выбросов АЯГ, в том числе для исследования направления электрических и магнитных полей. Впервые подобные наблюдения были выполнены Купером и Прайсом в 1962 г. [68], а также Гарднером и Вайтуоком в 1963 г. [69]. Измеренные ими меры вращений составили около нескольких десятков рад/м² на см длинах волн для центра Галактики и компактных внегалактических источников. Такое фарадеевское вращение вызывает поворот плоскости поляризации волны на десятки градусов, т.е. существенно изменяет истинное направление линейной поляризации. В связи с этим измерения фарадеевского вращения являются крайне важными.

Мера вращения является интегралом по всей области, в которой присутствует замагниченная плазма (уравнение (2.1)). Таким образом, все среды, находящиеся на пути распространения излучения от источника к наблюдателю, дают

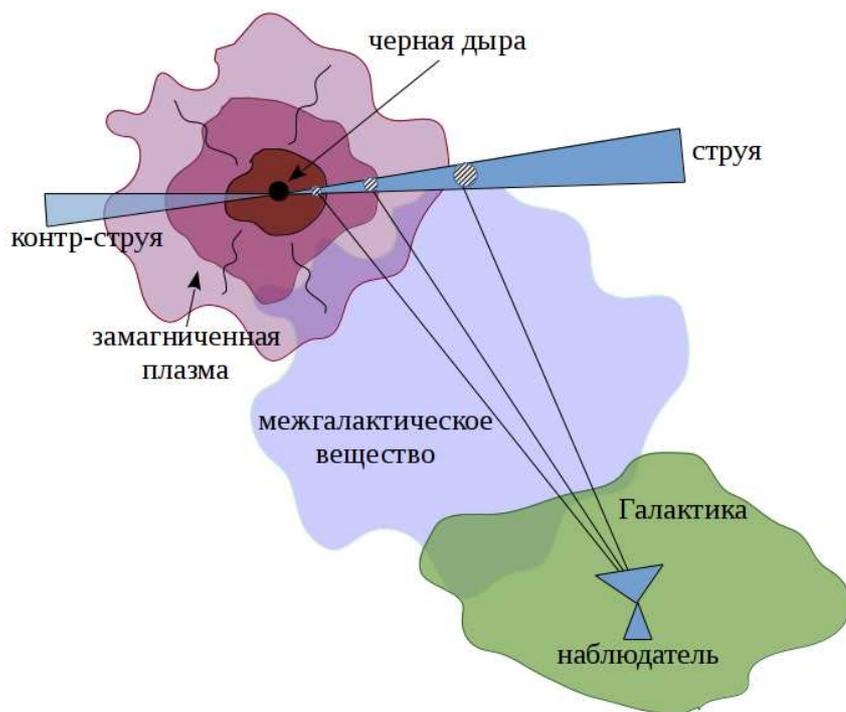


Рисунок 2.1 — Схематическое представление областей возникновения фарадеевского вращения. Штриховыми линиями выделены области в струе с разными величинами мер вращения. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок сделан диссертантом.

вклад в наблюдаемую величину. Как показано на рисунке 2.1, измеряемое фарадеевское вращение от струйных выбросов АЯГ характеризуется, в основном, тремя средами: веществом Галактики, межгалактической средой и веществом, находящимся в непосредственной окрестности струи. Поскольку проводимый в работе анализ касается только последней составляющей, вклад первых двух сред должен быть учтен. Благодаря тому, что излучение от струи последовательно проходит через межгалактическое и Галактическое вещество, и испытывает в этих средах только фарадеевское вращение (пассивные экраны), учет этих сред в анализе сводится к вычиту производимой ими меры вращения из наблюдаемой величины. При этом наблюдаемая величина меры вращения (RM) может быть представлена в виде суммы отдельных компонентов:

$$RM \approx RM_G + RM_{EG} + \frac{RM_0}{(1+z)^2}, \quad (2.4)$$

где z — красное смещение наблюдаемого объекта, RM_G , RM_{EG} и RM_0 — фарадеевское вращение, производимое веществом Галактики, межгалактической средой и исследуемым источником, соответственно.

Оценки фарадеевского вращения, образуемого в нашей Галактике, производятся с использованием разных подходов. Среди исследований, рассматривающих Галактику в целом, а не отдельные ее области, выделяются работы

по восстановлению распределения галактических магнитных полей, совместно анализирующие поляризационные свойства внегалактических источников, пульсаров, рекомбинационных линий и ионизованного газа [70–75]. Несмотря на разнообразие используемых данных, эти работы сходятся в оценках величины галактической МВ. В среднем, ее вклад в наблюдаемую величину составляет единицы и десятки рад/м², а точность измерения Галактической МВ составляет единицы рад/м² [там же]. При этом предполагается, что Галактическое вращение слабо и медленно меняется во времени.

Величина меры вращения, производимая межгалактическим веществом, известна с меньшей точностью. Отсутствие достоверно измеренных напряженностей межгалактического магнитного поля, как и его распределение во Вселенной и эволюция со временем, позволяют получать только оценки межгалактического фарадеевского вращения. В предположении напряженности поля ≈ 30 нГс и температуры газа $10^5 < T < 10^7$ К на красном смещении $z = 5$ [76], средняя МВ в наше время составит 0–2 рад/м² [77]. Для типичных значений МВ в струях АЯГ (например, [78]), эта величина не дает существенного вклада, и далее она не учитывалась в анализе.

К настоящему моменту количество работ, анализирующих характеристики фарадеевского вращения в струйных выбросах АЯГ, существенно увеличилось. Среди прочих, это работы по исследованию мер вращения и поляризационных эффектов одиночными антеннами в широком интервале длин волн (например, [35; 79; 80]) и интерферометрическими системами в узкой полосе (например, [70; 81; 82]) и в широком интервале частот (например, [83; 84]). Тем не менее, количество источников, для которых известно фарадеевское вращение с разным пространственным разрешением, остается малым. Частично, это связано со сложностью одновременного наблюдения источника на нескольких длинах волн, проведением поляризационной калибровки, для которой необходимы частые наблюдения калибраторов, а также с методом анализа поляризационных карт.

С целью определения и исследования свойств фарадеевского вращения для бóльшего количества источников, нами были выполнены широкополосные поляриметрические исследования 32 объектов: 21 АЯГ на VLBA в диапазоне 1.4–43 ГГц, 7 АЯГ на VLA в диапазоне 1.4–43 ГГц, 3 АЯГ на VLA на частотах 18–48 ГГц и Галактического центра на телескопе VLA в интервале частот 40–48 ГГц. Для большинства рассматриваемых источников, меры вращения были получены впервые (в определенных интервалах длин волн). С целью исследования распределения фарадеевского вращения поперек струй и причин, вызы-

вающих такое поведения, нами исследованы профили МВ в струях 21 АЯГ.

Наблюдения источников в разных диапазонах частот с хорошим пространственным разрешением позволяет исследовать поляризационные свойства различных областей струй. В том числе, такая РСДБ поляриметрия может использоваться для поисков плотных областей струй с сильными магнитными полями, проявляемых в наблюдениях большими и экстремально большими мерами вращения ($\geq 10^5$ рад/м²). Существование таких областей в релятивистских струях следует из систематического увеличения меры вращения в началах РСДБ струй [83–85], а также теоретических представлений [23; 24]. К настоящему моменту, такие области выявлены только у нескольких источников. Например, у радиогалактики 3С 84 ($RM = -(8.7 \pm 2.3) \times 10^5$ рад/м² в диапазоне 224–342 ГГц, [86]) и квазара PKS 1830–211 ($RM \approx (9.4 \pm 0.4) \times 10^6$ рад/м² на 300 ГГц, [26]). Такие величины МВ проявляются в наблюдениях существенно нелинейным поведением поляризационного потока с длиной волны, имеющее выраженный осциллирующий характер. Анализ таких данных производится современными методиками, такими как синтез фарадеевских мер вращения [87; 88] и фарадеевский синтез [89], поскольку линейная аппроксимация не применима в таких случаях.

С целью поиска компактных областей струй, создающих фарадеевское вращение 10^5 рад/м² и больше, нами исследованы поляризационные свойства трех квазаров (3С 48, 3С 138 и 3С 147) впервые в диапазоне 18–48 ГГц с помощью телескопа VLA. Для знакомства с методикой синтеза фарадеевских мер вращения и его дальнейшего использования, автор работы опробовал методику на наблюдениях Галактического магнетара PSR J1745–2900. Выбор этого источника обусловлен близким расположением к центру Галактики – Стрелец А*, являющимся одним из рекорсменов среди космических объектов по величине меры вращения ($RM = -(4.3 \pm 0.1) \times 10^5$ рад/м² в диапазоне 1–400 ГГц; например, [90]).

2.2 Методика построения карт фарадеевского вращения

Чтобы анализировать изображения источника, получаемые на разных длинах волн, их необходимо привести к одному пространственному разрешению. Для этого изображения источника, выполненные на более высоких частотах, сворачивались с диаграммой направленности, определяемой самой низкой частотой. Разрешение карты МВ в этом случае соответствовало разрешению карты, полученной на самой высокой частоте анализируемого диапазона. После этого совмещение карт на разных частотах выполнялось согласно §1.8, т.е. от-

Таблица 2.1 — Поляризациянные калибраторы, наблюдаемые в рамках программы мониторинга на VLA. Неопубликованный пояснительный материал, таблица сделана диссертантом.

Источник	Другое название	Оптический класс
Основной калибратор 3C 286		
0552+398	DA 193	квазар
0710+439	B3 0710+438	радиогалактика
0736+017	OI 061	квазар
0851+202	OJ 287	лацертид
0923+392	4C +39.25	квазар
1253-055	3C 279	квазар
1308+326	OP 313	квазар
Основной калибратор 3C 48		
2134+004	PKS 2134+004	квазар
2202+420	BL Lac	лацертид
2251+158	3C 454.3	квазар
0316+413	3C 84	радиогалактика
0355+508	NRAO 150	квазар

носителем области, содержащей оптически тонкое синхротронное излучение.

Если величина поляризованного потока в пикселе не превышала величину трех среднеквадратичных отклонений, пиксель не принимал участия в дальнейшем анализе. Среднеквадратичное отклонение рассчитывалось по величине параметров Стоксов Q и U на изображении (см. выражение (1.10)), получаемых после вычитания из данных модели источника, на площади, равной девяти диаграммам направленности по уровню половинной мощности с центром в местоположении рассматриваемого компонента. Фарадеевская мера вращения при этом определялась линейной аппроксимацией EVPA с λ^2 в каждом пикселе совмещенных карт. Проблема измерения величин EVPA с неопределенностью в $180^\circ \cdot n$ решалась минимизацией χ^2 . В качестве опорной частоты использовалась самая высокая частота рассматриваемого диапазона, а EVPA на более низких частотах вращались последовательно на произвольное минимальное количество оборотов. Если результирующая величина χ^2 подгонки в пикселе превышала теоретическую величину χ^2 для соответствующих степеней свободы (разница количества частотных диапазонов и двух параметров прямой, определяемых в процессе подгонки) и 95% доверительного интервала, пиксель не участвовал в дальнейшем анализе.

2.3 Наблюдения поляризационных калибраторов телескопом VLA в диапазоне 1.4–43 ГГц

В этом параграфе представлены результаты обработки архивных данных наблюдений, поставленных и проведенных сотрудниками Национальной Радиоастрономической Обсерватории США (Стив Майерс и Грег Тейлор) в 2012–2014 гг., в рамках проекта «TROL0003» на телескопе VLA. Автор работы не принимал участия в наблюдениях, а проводил только обработку данных. Анализ и результаты данного исследования опубликованы в работе [B4].

2.3.1 Наблюдения

Программа поляризационного мониторинга⁹ [57] ряда ярких, компактных АЯГ велась на VLA с 1999 по 2009 гг. Цель таких наблюдений состояла в частом и длительном наблюдении источников, которые могут быть использованы для поляризационной калибровки объектов, наблюдаемых в других экспериментах, на других инструментах в разное время. Источники выборки имеют высокую или, наоборот, низкую величину линейной поляризации, что позволяет отделить полезный поляризационный сигнал от паразитного и восстановить абсолютное направление EVPA. С 2010 г. формат программы мониторинга изменился, в результате чего наблюдения стали проводиться реже, а выборка источников сократилась с 24 до 12, представленных в таблице 2.1. Более того, наблюдения перестали обрабатываться. Однако, сырые данные находятся в открытом доступе в архиве NRAO¹⁰.

Для исследования мы использовали архивные наблюдения семи АЯГ (первая половина источников в таблице 2.1), доступных в рамках этой программы (код наблюдений «TROL0003»). Были выбраны три последние доступные эпохи наблюдений источников (на момент июня 2014 г.): 2 сентября 2012 г., 12 января 2014 г. и 14 февраля 2014 г. Телескоп VLA находился в это время в конфигурации «B» (2014-01-12 и 2014-02-14) и переходной конфигурации «BnA–A» (2012-09-02). Частотные настройки экспериментов представлены в таблице 1.3. Время наблюдения источников на каждой частоте составляет от 5 до 10 минут.

⁹<http://www.vla.nrao.edu/astro/calib/polar/>

¹⁰<https://archive.nrao.edu/archive/archiveproject.jsp>

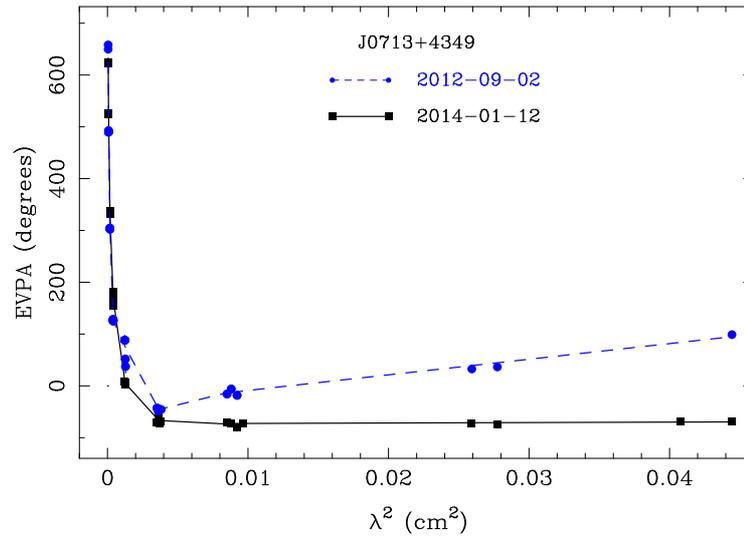


Рисунок 2.2 — Зависимость угла линейной поляризации (EVPA) от квадрата длины волны (λ^2) в максимуме потока интенсивности на VLA изображении радиогалактики 0710+438 в эпохи 2012-09-02 и 2014-01-14. По горизонтальной оси отложен квадрат длины волны (см²), по вертикальной оси — EVPA (град.). Линии представляют собой почастотную линейную аппроксимацию экспериментальных данных и определяют величину фарадеевского вращения. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

2.3.2 Анализ данных наблюдений

Вся калибровка и картографирование данных выполнены в пакете Orbit, согласно описанию §1.3. В качестве основного калибратора амплитуды, фазы и поляризации использовался квазар 3C 286. Средний размер диаграммы направленности на половине мощности интенсивности сигнала (для VLA конфигураций «В» и «ВnA->A») в наблюдениях составил $\approx 4'$ (по прямому восхождению и склонению) для диапазона L, и уменьшается соразмерно длине волны до $\approx 0.1'$ для диапазона Q. Анализ поляризационных свойств источников производился для области на карте параметра Стокса I , соответствующей максимуму потока интенсивности. Для исследуемых в данном параграфе источников эта область включает в себя ядро и протяженную струю, видимых на картах с более высоким разрешением (см. например, данные проекта мониторинга Бостонского университета).

Методика определения меры вращения основывалась на следующих положениях. Зависимость наблюдаемого поляризационного угла с квадратом длины волны аппроксимировалась прямой по нескольким ближайшим диапазонам частот. Такой подход позволяет учитывать возможное нелинейное поведение EVPA с λ^2 , возникающее из-за того, что излучение на разных частотах возникает в физически разных областях источника. При аппроксимации данных мы не ограничивали количество оборотов позиционного угла n , которое элек-

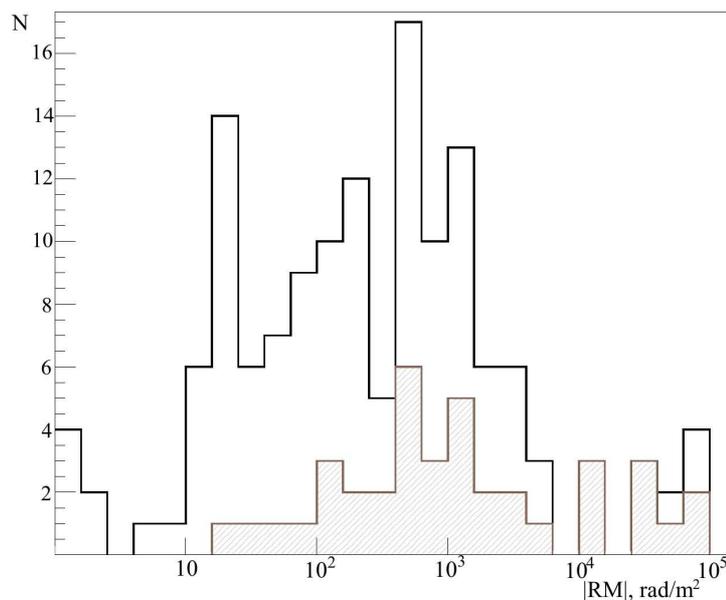


Рисунок 2.3 — Гистограмма распределения полученных величин мер вращения в семи АЯГ (см. таблицу 2.1), в семи частотных диапазонах в течении трех эпох наблюдений телескопом VLA. По горизонтальной оси отложена абсолютная величина фарадеевского вращения ($\text{рад}/\text{м}^2$), по вертикальной оси – количество случаев (ед.). Результат диссертана из работы [B4].

тромагнитная волна совершает при распространении от источника к наблюдателю. Для этих целей использовался метод наименьших квадратов, а выбор n обуславливался минимальным значением χ^2 для соответствующего количества степеней свободы. Величина меры вращения определялась наклоном результирующей прямой в рассматриваемом интервале частот.

2.3.3 Результаты наблюдений. Обсуждение

Поляризационный угол меняется сложным образом с квадратом длины волны в большинстве источников, сохраняя тенденцию увеличивать свое вращение на более коротких длинах волн. Несмотря на это линейная аппроксимация EVPA с λ^2 применима в рассматриваемых под-диапазонах. Существенно выделяется среди исследуемых источников 0710+439 и 0923+392, в которых поляризационный угол на самых высоких частотах отличается от значения на низких частотах на $3 \cdot 180^\circ$. Пример результатов линейной аппроксимации данных для источника 0710+439 в диапазоне 1.4–43 ГГц показан на рисунке 2.2 для двух эпох.

Суммарная гистограмма распределения полученных мер вращения в семи источниках за три эпохи наблюдений представлена на рисунке 2.3. Измеренные величины мер вращения составили несколько единиц $\text{рад}/\text{м}^2$ на частотах 1.4–2.2 ГГц и доходят до нескольких единиц $10^4 \text{ рад}/\text{м}^2$ в диапазоне 22–44 ГГц. Ре-

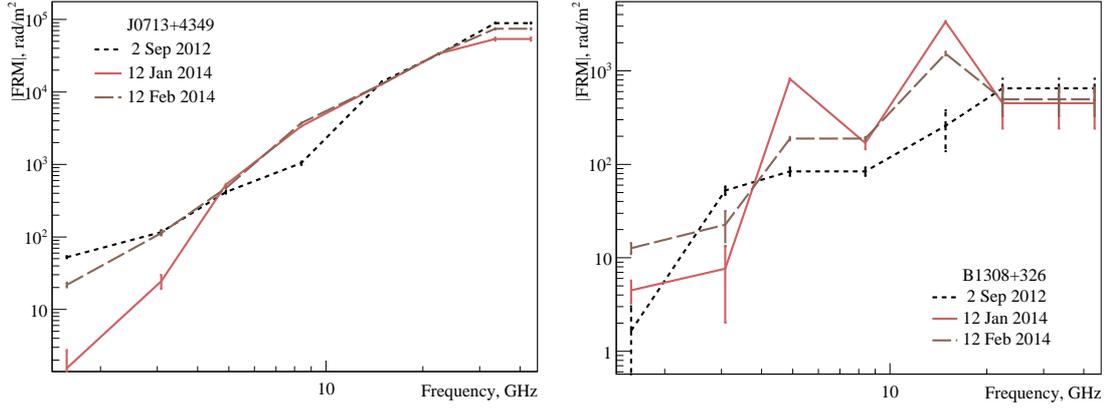


Рисунок 2.4 — Мера вращения в радиогалактике 0710+439 (панель слева) и квазаре 1308+326 (панель справа) в трех эпохах наблюдений телескопом VLA. По горизонтальной оси отложена частота наблюдений (ГГц), по вертикальной оси – абсолютная величина фарадеевского вращения (рад/м^2). Панель слева: результат диссертанта из работы [B4], панель справа: неопубликованный иллюстративный материал, рисунок сделан диссертантом.

кандидатом среди рассматриваемых источников по самой большой измеренной МВ является 0710+439, в котором фарадеевское вращение в частотном диапазоне 33–43 ГГц составило: $-(89 \pm 1) \times 10^3$, $-(54 \pm 3) \times 10^3$ и $-(74 \pm 1) \times 10^3$ рад/м^2 за три эпохи, соответственно.

Частотная зависимость величины меры вращения может быть исследована в предположении близкого расположения фарадеевского экрана к струе, т.е. когда он является внешним слоем джета. Вероятное наличие такой оболочки подтверждается экспериментальными данными (например, [91; 92]), а также предсказывается теоретическими моделями (например, [93]) и Монте-Карло моделированиями (например, [94]). В этом предположении концентрация частиц в джете n_e падает с расстоянием от ядра r как $n_e \propto r^{-a}$, и абсолютная величина МВ в ядре RM_{core} должна степенным образом зависеть от наблюдаемой частоты ν [85]. Основываясь на том, что поле струй имеет спиралевидную (*англ.* helical) форму, и тороидальная компонента поля, B_{\perp} , дает основной вклад в меру вращения (определяемая уравнением (2.1), где $l \propto r$), то $B_{\perp} \propto r^{-1}$ и $|RM_{core}| \propto r^{-a}$. Используя зависимость положения поверхности $\tau \approx 1$ [95] от расстояния до центральной черной дыры (предполагая режим равномерного распределения плотности энергии между синхротронными частицами и магнитным полем): $r_{core,\nu} \propto \nu^{-1}$, то искомая зависимость МВ от частоты принимает вид:

$$|RM_{core}| \propto \nu^a. \quad (2.5)$$

Согласно теоретическим моделям [3], в конической релятивистской струе падение плотности частиц с расстоянием должно следовать закону $n_e \propto r^{-2}$, следовательно мера вращения должна увеличиваться линейно с увеличением

квадрата частоты наблюдений. Результаты линейной регрессии зависимости $\log(|RM|) - \log(\nu)$ в наших наблюдениях показывают, что средняя величина степени по всем эпохам и источникам составляет 1.6 ± 0.1 .

Меньшее значение величины степени, наблюдаемое в нашем анализе, может объясняться существенным вкладом оптически тонкого излучения, в то время как зависимость (2.5) предполагает наличие областей с оптической толщиной $\tau \approx 1$. Более того, падение напряженности магнитного поля и плотности частиц с расстоянием от центральной машины АЯГ может отличаться в более протяженных областях струй, которые доминируют в анализируемых наблюдениях, а физические условия в этих областях существенно отличаться от равномерного распределения. Также струя может отличаться от конической формы, а ее ширина будет расширяться медленнее, чем в компактных околоядерных областях.

Нелинейное поведение EVPA с λ^2 может объясняться комбинацией нескольких неразрешенных деталей струи в диаграмме направленности [96; 97], вспышечной активностью в ядре, сопровождаемой поворотом поляризационного угла (например, [98]) и прохождением нового компонента через ядро, а также внутренним фарадеевским вращением, когда вращение плоскости поляризации происходит в том же пространственном объеме, что и генерация излучения (см. подробно §3.1).

Результаты показывают, что во всех исследуемых источниках количество оборотов EVPA на 180° относительно соседних частотных диапазонов остается постоянным во времени, несмотря на то, что различные эпохи анализировались независимо друг от друга (см. пример на рисунке 2.2). Тем не менее, величина MB изменяется со временем во многих рассматриваемых источниках. На рисунке 2.4 приведен пример поведения MB в 0710+439 и 1308+326 в течении трех эпох наблюдений в разных частотных диапазонах.

Из-за большой разности между датами наблюдений трудно однозначно сказать, что является причиной переменности меры вращения во времени. Вспышечная активность источника, в основном наблюдаемая в основании струй (например, [99]), может сопровождаться изменением физических условий, вследствие чего фарадеевское вращение может меняться. Изменение направления джета, в результате чего может быть освещена другая область струи, или взаимодействие с окружающей средой также будут причиной изменения меры вращения. Другое возможное объяснение – существование «клочковатого» фарадеевского экрана вокруг струи, изменяющего свою форму и структуру во времени. В последующих параграфах настоящей главы проявление этих эффектов будет рассмотрено более детально на примере других источников.

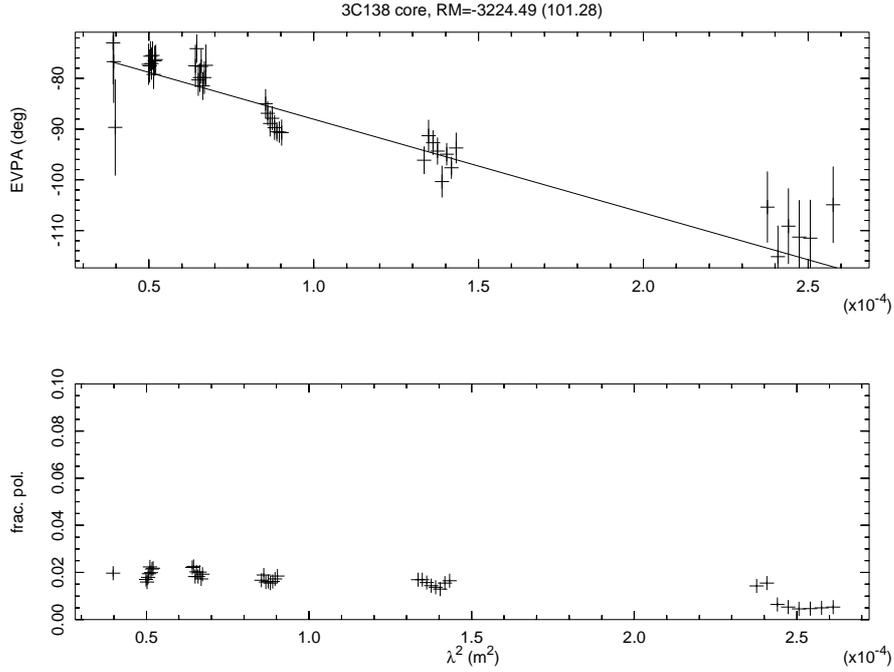


Рисунок 2.5 — Направление (панель сверху) и степень (панель снизу) линейной поляризации в ярчайшем пикселе на VLA карте полной интенсивности квазара 3C 138. По горизонтальной оси отложен квадрат длины волны (m^2), по вертикальной оси — степень поляризации (проценты) и EVPA (град.). Прямая представляет линейную аппроксимацию экспериментальных данных. Результат соавторов из работы [A1].

2.4 Квазары 3C 48, 3C 138 и 3C 147 в наблюдениях решеткой VLA на частотах 18–48 ГГц

В этом параграфе представлены результаты обработки наблюдений, поставленных и проведенных сотрудником Национальной Радиоастрономической Обсерватории США (Рик Перли) в 2014 г., в рамках проекта «TCAL0004» на телескопе VLA. Автор работы не принимал участия в наблюдениях, а участвовал в обработке данных, их анализе и обсуждении результатов. Содержание данного параграфа следует работе [A1].

2.4.1 Наблюдения и обработка данных

Компактные источники с плоским спектром 3C 48 (0134+329 или J0137+3309), 3C 138 (0518+165 или J0521+1638) и 3C 147 (0538+498 или J0542+4951) хорошо известны и активно используются для калибровки наблюдательных данных в радиодиапазоне (например, [52; 100]).

Наблюдения этих источников проводились в течении 24-х часовой сессии с помощью системы апертурного синтеза EVLA. Была использована самая протяженная конфигурация решетки («A»), соответствующая максимальной базе

между парой антенн 36 км. Наблюдения источников в течении сессии велись циклично, что позволило достичь хорошего покрытия u , v -плоскости и высокой чувствительности эксперимента. Три приемника телескопа было использовано (полосы K, Ka и Q), позволяющие оцифровать и записать сигнал в диапазоне частот 18.5–48.5 ГГц. При этом каждая полоса разбита на два под-диапазона, каждый шириной 1 ГГц (см. подробности в таблице 1.3).

Вся калибровка и картографирование данных выполнены в пакете Obit, согласно описанию §1.3. В качестве калибратора амплитуды, полосы, фазы и абсолютного поляризационного угла был использован ЗС 286. Инструментальная калибровка была выполнена с использованием квазаров J0217+7349, J1153+8058 и ЗС 286, а также лацертиды J1800+7828. Длительный сеанс наблюдений, в течении которого поляризационные калибраторы были наблюдаемы во всех возможных параллактических углах (0° – 360°), позволил выполнить очень точное разделение инструментальной поляризации и поляризации от источников.

После проведения и применения калибровки, каждый под-диапазон был поделен на 8 спектральных каналов. Таким образом, ширина каждого канала составила 128 МГц.

2.4.2 Результаты наблюдений

Яркие центральные компоненты исследуемых в этом параграфе источников являются комбинацией РСДБ ядра и протяженной струи, видимых на картах с более высоким разрешением. Для краткости и исключения путаницы компактных радиоядер с этими компонентами далее мы именуем их «центральными областями» или «центральными компонентами».

Для анализа мер вращений была использована линейная аппроксимация данных по всему частотному диапазону. Как видно из рисунка 2.5, это предположение хорошо согласуется с наблюдениями. При этом, степень поляризации в центральной области ЗС 48 и ЗС 147 слегка увеличивается в сторону коротких длин волн, что может быть проявлением клочковатого фарадеевского экрана, разрешаемого на этих длинах волн, или увеличения упорядоченности или напряженности магнитного поля и плотности частиц. В то же время центральный компонент ЗС 138 не показывает значимой деполяризации.

Распределение фарадеевского вращения вдоль струй показано на рисунке 2.6. Видно, что вращение в центральной области значительно отличается по величине от вращения в протяженных, оптически тонких областях струй. Результа-

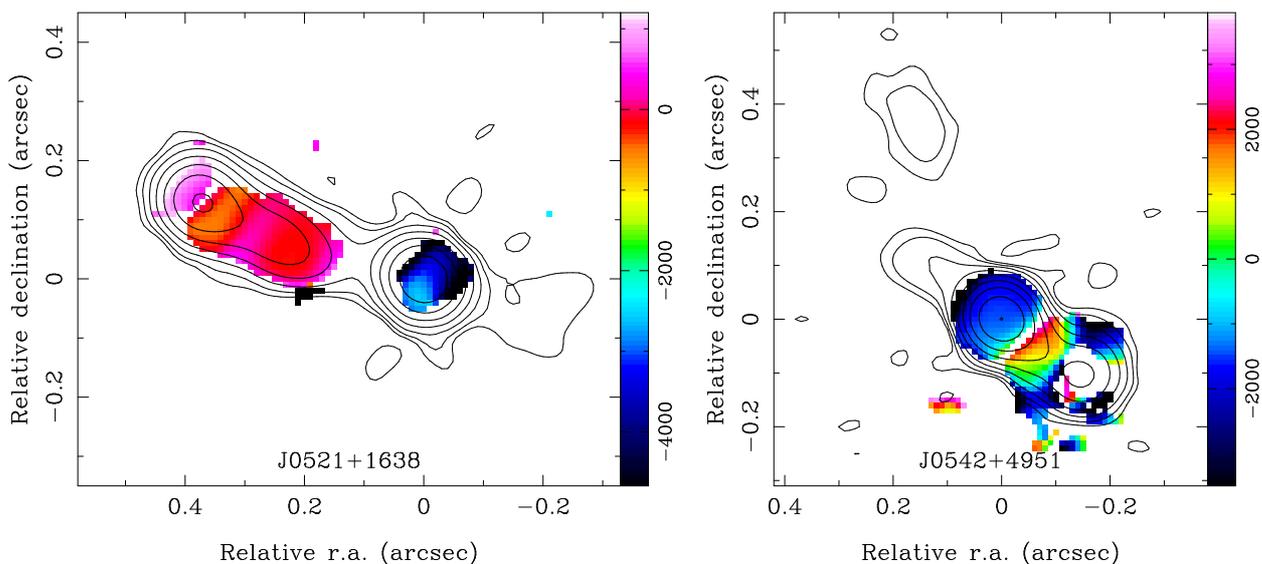


Рисунок 2.6 — VLA карты фарадеевского вращения (цвет), наложенные на контуры параметра Стокса I на 44 ГГц, в квазарах 3C 138 (панель слева) и 3C 147 (панель справа). Центральные компоненты расположены в центре карт с относительными координатами (0,0). По горизонтальной оси отложено относительное прямое восхождение (мсек дуги), по вертикальной оси — относительное склонение (мсек дуги). Цветовая панель дана в рад/м². Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок сделан диссертантом.

ты аппроксимации EVPA от λ^2 дают следующие оценки вращений в центральных компонентах источников: (9671 ± 484) рад/м² (3C 48), $-(3224 \pm 101)$ рад/м² (3C 138) и $-(1509 \pm 7)$ рад/м² (3C 147). В то же время, величина фарадеевского вращения вдоль по струе не превышает десятков – сотен рад/м².

Комментарии к отдельным источникам

3C 48. Мантовани и др. [101] получили $RM \approx -64$ рад/м² на частотах 1.4–10.4 ГГц (100-м телескоп в Эффельсберге) в источнике. В то же время, Россетти и др. [102] измерили фарадеевское вращение на частотах 1.4–8.3 ГГц (VLA) величиной $-(88 \pm 21)$ рад/м². Перли и Батлер [52] измерили интегральное значение MB на частотах 1.4–30 ГГц (VLA), которое составило ≈ -68 рад/м². Эти величины характеризуются яркими поляризационными компонентами, находящимся на удалении от центральной области источника. Эн и др. [103] оценила $MB = -(330 \pm 60)$ рад/м² в месте струи, находящейся ближе к центральной области, на частотах 1.4–8.3 ГГц (EVN¹¹, MERLIN¹² и VLBA). Наше значение MB значительно отличается от перечисленных работ, и составляет (9671 ± 484) рад/м² в центральном компоненте 3C 48. Эта величина соответствует фа-

¹¹European VLBI Network, Европейская сеть РСДБ

¹²Mitli-Element Radio Linked Interferometer Network, Многоэлементная радио связанная интерферометрическая сеть

радеевскому вращению в системе отсчета источника $(1.80 \pm 0.09) \times 10^4$ рад/м² ($z = 0.367$ [104]). Степень линейной поляризации на частоте 20 ГГц составляет 2% и имеет тенденцию увеличиваться в сторону более коротких длин волн. Этот тренд совместно с низкой величиной степени поляризации указывает на то, что на более низких частотах наблюдений эта область источника деполаризована.

ЗС 138. Мантовани и др. [101] оценили $RM \approx -1$ рад/м² на частотах 1.4–10.4 ГГц (100-м телескоп в Эффельсберге) и сообщает о нелинейном характере поляризационного угла с квадратом длины волны. Тот же результат получили Перли и Батлер [52] в диапазоне 1.4–30 ГГц (VLA). Такое поведение объясняется суперпозицией нескольких поляризационных компонентов с разным направлением поляризации и разными величинами фарадеевского вращения. Коттон и др. [105] наблюдали источник телескопом VLA на частотах 1.7–5.0 ГГц (1995–2003 гг.). Мера вращения была оценена только в компоненте, удаленном на расстоянии 5 мсек дуги от центрального компонента, и составила $-(1781 \pm 48)$ рад/м². Коттон и др. [106; 107] показали, что величина МВ в этом компоненте изменяется со временем. Это указывает на масштаб неоднородности фарадеевского экрана, составляющего суб-пк. При этом, центральная область квазара не показывает значительной линейной поляризации. Наше значение вращения $-(3224 \pm 101)$ рад/м² больше величины, полученной Коттоном и др. [105–107]. Это указывает на то, что наши высокочастотные наблюдения разрешают структуру фарадеевского экрана ЗС 138. Приведенная в систему отсчета источника, величина фарадеевского вращения в квазаре ($z = 0.759$ [104]) составила $-(9975 \pm 312)$ рад/м².

ЗС 147. Юнор и др. [108] сообщают $MB = -(1317 \pm 8)$ рад/м² (8.1–15 ГГц, VLA, 30 августа 1991 г.). Близкий результат получили Россетти и др. [109]: $RM = -(1544 \pm 73)$ рад/м² на радиоинтерферометре VLBA в диапазоне 4.6–9 ГГц (май 1995 г., август 2000 г. и май 2001 г.) и Иноу и др. [110]: $RM = -(1648 \pm 117)$ рад/м² на 45-м телескопе Нобейма (8.8–10.8 ГГц, 1984–1988 гг.). Наши измерения МВ в ядерном компоненте ЗС 147 ($-(1509 \pm 7)$ рад/м²) близки к этим значениям. Исходя из сравнения этих данных, сложно сказать о наличии мелкомасштабной временной переменности МВ в этом квазаре, тем не менее, ее величина остается стабильной на протяжении ~ 25 лет. Приведенная в систему отсчета источника, величина фарадеевского вращения в квазаре ($z = 0.545$ [104]) составила $-(3602 \pm 17)$ рад/м².

2.4.3 Обсуждение

Наши исследования показывают, что поляриметрические наблюдения компактных областей струй на более высоких частотах эффективнее других исследований по нескольким причинам. Во-первых, существование большого фарадеевского вращения вызывает деполаризацию излучения на низких частотах и в большей диаграмме направленности (например, как в ЗС 48). Во-вторых, структура фарадеевского экрана и структура струи разрешается на более высоких частотах, как, например, в квазарах ЗС 48 и ЗС 138. При этом, как было замечено выше, высокие частоты видят излучение, выходящее из областей, расположенных ближе к центральной машине АЯГ, где ожидаются более экстремальные физические условия. Более того, яркий поляризационный компонент струи, расположенный на малом удалении от слабо поляризованного центрального компонента может доминировать в излучении, в результате чего будет наблюдаться более низкая мера вращения, как видно на примере ЗС 48.

Величины мер вращения в системе отсчета, связанной с источниками (средняя величина МВ в наших наблюдениях $\geq 4 \times 10^3$ рад/м²), вызывают поворот плоскости поляризации электромагнитной волны на частоте 20 ГГц $\geq 50^\circ$, что возможно в основном на внешнем фарадеевском экране [67; 111]. Это подтверждается линейностью наблюдаемой зависимости $EVPA-\lambda^2$. Есть несколько сред, которые могут выступать в качестве такого экрана. Это область образования широких эмиссионных линий (*англ.* broad line region, BLR), область образования узких эмиссионных линий (*англ.* narrow line region, NLR) и внешняя оболочка самой струи.

Согласно наблюдениям и теоретическим предсказаниям, размер области широких эмиссионных линий составляет доли пк [112]. Анализ многоэпоховых наблюдений выборки блазаров Пушкаревым и др. [20] на частоте 15 ГГц (VLBA) показал, что среднее расстояние РСДБ ядер от центральной ЧД (на этой частоте) составляет ~ 13 пк. Вследствие чего, мало вероятно, что наблюдаемое нами фарадеевское вращение возникает в области широких эмиссионных линий.

Размер области узких эмиссионных линий составляет около 10–300 пк [113], при этом она имеет клочковатую структуру (наличие более плотных облаков в разреженной среде с объемным фактором заполнения $\epsilon \approx 10^{-2}$) с плотностью газа $10^3 - 10^5$ см⁻³ и турбулентными магнитными полями [40]. Если МВ образуется в этой области, тогда напряженность магнитного поля B можно оценить, используя формулу (2.1), как [114]:

$$B = \left(\frac{3}{1\text{pc}} \right)^{1/2} \frac{RM}{812\epsilon n_e dl}, \quad (2.6)$$

где фактор $3/(1\text{pc})$ связывает продольную компоненту поля с полной величиной. При этом предполагается, что магнитное поле в этой области турбулентно и однородно на масштабах ~ 1 пк. Принимая во внимание $MV \sim 4 \times 10^3$ рад/м², $n_e \sim 10^3$ см⁻³, $\epsilon = 10^{-2}$ и размер области узких эмиссионных линий ~ 100 пк, напряженность магнитного поля составит около 10 мкГс. Если учесть, что движение плазмы в этой области составляет около 1000 км/с (т.е. тысячная доля мсек дуги в год даже для красного смещения $z = 0$), то область узких эмиссионных линий не может быть причиной появления короткопериодичной переменности МВ во времени, наблюдаемой в некоторых источниках (например, ЗС 138). Тем не менее, вероятно, структура и свойства фарадеевского экрана в некоторых активных ядрах галактик (например, ЗС 48, ЗС 147 и др. источниках [102]) может объясняться этой ионизованной замагниченной средой.

Последней возможной областью образования фарадеевского вращения являются внешние слои (оболочка) самой струи. Формирование такого слоя возможно в разных моделях, например, за счет замедления вещества струи окружающим веществом [115], или за счет полоидального магнитного поля, создаваемого аккрецирующим диском АЯГ [116]. Очень близкое расположение экрана к выбросу может объяснить наблюдаемую быструю временную переменность МВ, а также увеличение МВ с частотой наблюдения в компактных РСДБ ядрах. Более того, результаты численного моделирования показывают, что основное вращение происходит на фарадеевском экране, находящимся очень близко к струе, и является ее внешним слоем [117].

Помимо упомянутых случаев, фарадеевское вращение может образовываться в нескольких средах. При этом вклад каждого пассивного вращающегося экрана не возможно выделить, поскольку мера вращения является аддитивной величиной.

2.5 Двадцать активных ядер галактик в наблюдениях телескопом VLBA в диапазоне 1.4–15 ГГц

В данном параграфе представлены результаты обработки данных наблюдений, поставленных и проведенных руководителем диссертации, Ковалевым Ю.Ю., в 2007 г., на телескопе VLBA (код проекта «BK134»). Автор работы не принимал участия в наблюдениях, а проводил поляризационную калибровку, дальнейшую обработку и анализ данных. Материалы данного параграфа опубликованы в работах [A4; B1-B3; B10].

2.5.1 Особенности выборки

В 2008 г. Ковалевым и др. [118] были обработаны изображения и исследован эффект сдвига видимого начала релятивистских струй с частотой в 277 АЯГ, наблюдаемых в рамках геодезической программы¹³ [119] на частотах 2.3 и 8.6 ГГц. Ковалев и др. выявили среди полной выборки источников 29 АЯГ, для которых этот эффект имеет значимую величину. Для дальнейшего анализа свойств этих АЯГ, было отобрано 18 источников, имеющих не только большой сдвиг ядра, но и яркую протяженную струю. Выбранные источники перечислены в таблице 2.2. В 2007 г. были проведены однократные наблюдения этих и еще двух источников (2201+315 и 3С 309.1) телескопом VLBA (код «ВК134») в диапазоне 1.4–15.4 ГГц с измерением полной поляризации. Соколовский и др. [65] провели детальный анализ сдвига ядра в этих источниках, и подтвердили результаты Ковалева и др. Для дальнейшего анализа свойств этих уникальных объектов, диссертантом была инициирована работа по исследованию их поляриметрических свойств. Результаты исследования особенностей и распределения фарадеевского вращения вдоль струйных выбросов источников рассмотрены в этом параграфе, в то время как анализ распределения мер вращения поперек струй объектов приводится в §2.6, а в главе 3 представлены результаты анализа степени и направления их линейной поляризации.

2.5.2 Наблюдения и обработка данных эксперимента

Наблюдения исследуемых источников выполнены телескопом VLBA в пяти частотных диапазонах: L, S, C, X, K_U (последний обозначен далее как U). Ширина каждого диапазона составляет 32 МГц в каждой из регистрируемых круговых поляризаций. Однако в процессе калибровки диапазоны L, S, C, X были разбиты на две части. Это позволило избежать деполяризации сигнала в полосе и увеличить количество независимых измерений источников.

В результате, данные наблюдений анализировались в девяти частотных диапазонах, информация о которых представлена в таблице 1.2. Время наблюдения каждого источника составило один час на каждый диапазон.

Обработка наблюдений выполнена в пакетах AIPS и Difmap, согласно описанию §1.2. Точность определения абсолютной калибровки составила 5% (см. [100]). Поляризационная калибровка выполнена с использованием наблюдений

¹³Research and Development VLBA program

Таблица 2.2 — Исследуемые 20 АЯГ телескопом VLBA на частотах 1.4–15.4 ГГц и интервалы, по которым определялось фарадеевское вращение. Результат диссертанта из работы [A4].

Источник (1950.0)	Др. назвние	Красн. смещ.	Опт. класс	Дата	Частоты наблюдений (ГГц)								
					1.4	1.6	2.2	2.4	4.6	5.0	8.1	8.4	15.4
0148+274		1.260	QSO	2007-03-01	L	L	L	L	H	H	H	H	H
0342+147		1.556	QSO	2007-06-01	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
0425+048	OF 42	0.517	AGN	2007-04-30	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
0507+179		0.416	AGN	2007-05-03	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
0610+260	3C 154	0.580	QSO	2007-03-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0839+187		1.272	QSO	2007-06-01	L	L	L	L	H	H	H	H	-
0952+179		1.478	QSO	2007-04-30	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
1004+141		2.707	QSO	2007-05-03	L	L	L	L	H	H	H	H	-
1011+250		1.636	QSO	2007-03-01	-	-	-	-	M	M	M	M	-
1049+215		1.300	QSO	2007-06-01	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
1219+285	W Comae	0.161	BLL	2007-04-30	L	L	L	L	H	H	H	H	H
1406–076		1.493	QSO	2007-05-03	L	L	LM	LM	M	MH	H	H	H
1458+718	3C 309.1	0.904	QSO	2007-03-01	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
1642+690		0.751	QSO	2007-04-30	L	L	L	L	M	M	MH	MH	H
1655+077		0.621	QSO	2007-06-01	L	L	L	L	H	H	H	H	H
1803+784		0.680	QSO	2007-05-03	L	L	L	L	M	MH	MH	MH	H
1830+285		0.594	QSO	2007-03-01	-	-	M	M	M	M	-	-	-
1845+797	3C 390.3	0.056	AGN	2007-06-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2201+315		0.298	QSO	2007-04-30	L	L	L	L	-	-	H	H	H
2320+506		1.279	QSO	2007-05-03	L	L	L	L	-	H	H	H	H

Примечание – Буквенное обозначение интервалов следующее: «L» – Low (1.4–2.4 ГГц), «M» – Middle (2.2–5.0 ГГц) и «H» – High (4.6–15.4 ГГц). Красные смещения и оптический класс взяты из работы Верон-Сетти и Верон [120].

Таблица 2.3 — Измеренные величины фарадеевского вращения в двадцати активных ядрах галактик проекта «VK134». Результат диссертанта из работы [A4].

Источник	Низкий част. диап.		Средний част. диап.		Высокий част. диап.		Степень a
	RM _{core}	RM _{jet}	RM _{core}	RM _{jet}	RM _{core}	RM _{jet}	
0148+274	-17±4	-7±4	—	—	168±13	-42±14	1.9±0.2
0342+147	—	9±4	-14±17	0±22	-431±52	-167±88	6.1±2.9
0425+048	—	7±4	—	-22±19	—	—	—
0507+179	-30±4	-35±4	1035±19	-55±17	1055±53	-141±57	2.98±0.13 ¹
0610+260	—	—	—	—	—	—	—
0839+187	—	-3±4	—	—	—	-25±17	—
0952+179	-17±4	4±4	—	13±19	-2767±53	40±89	2.90±0.14
1004+141	-1±4	-9±4	-127±17	-32±17	—	—	4.1±4.6
1011+250	—	—	—	-157±29	—	—	—
1049+215	-4±4	-11±4	-107±17	-23±23	-547±52	—	2.9±0.3
1219+285	-16±4	-16±4	—	—	-17±17	-27±15	0.0±0.9
1406-076	30±4	7±4	-47±5	2±6	-235±17	-16±25	1.77±0.12
1458+718	—	3±4	—	-33±17	1153±56	-31±53	—
1642+690	-1±4	8±4	-239±17	-2±18	272±50	106±102	4.6±9.6 ¹
1655+077	24±4	27±4	—	—	-491±13	-4±13	2.54±0.14
1803+784	-8±4	3±4	21±17	6±18	28±17	11±24	0.9±0.6
1830+285	—	—	—	-5±6	—	—	—
1845+797	—	—	—	—	—	—	—
2201+315	-44±4	-15±4	—	—	-514±50	15±253	1.40±0.08
2320+506	44±4	19±4	—	—	-1627±18	—	2.84±0.07
|медиана|	17	8	107	22	491	29	2.5
|медиана(1+z) ²|	61.6	30.5	566.0	79.8	1460.5	129.1	—

Примечание – Приведенные пиксельные значения МВ определены в местоположении ядерных и оптически тонких деталей струй. МВ даны в рад/м² и поправлены за галактическое вращение. Приведенные величины даны в системе наблюдателя, не считая значения двух последних рядов, посчитанные в системе источника. Величина степени a , определяемая зависимостью МВ от частоты в виде $|\text{RM}_{\text{core}}| \sim \nu^a$, приведена в последнем столбце. ¹ – МВ по высокому частотного диапазона не участвовала в расчете коэффициента.

квazarов 3C 286, 3C 273, 4C +39.25 и лацертиды OJ 287 и описана в §1.5. В результате, полная ошибка измерений поляризационных углов составила 5° для L и S диапазонов, 2.5° для C и X диапазонов и 2° для диапазона U.

Моделирование структуры струй набором отдельных компонентов выполнено сотрудником АКЦ ФИАН Соколовским К.В. согласно процедуре, описанной в §1.7, и детально изложено в работе Соколовского и др. [65]. Совмещение карт на разных частотах выполнено относительно положения смоделированной оптически тонкой детали струи согласно методике, описанной в §1.8. Построение карт фарадеевского вращения выполнено согласно методике, описанной в §2.2. Рассматриваемый частотный диапазон 1.4–15.4 ГГц был разбит на три интервала (1.4–2.4, 4.6–8.4 и 8.1–15.4 ГГц, см. таблицу 2.2), в которых МВ определялись независимо с использованием линейной аппроксимации EVPA с λ^2 . Разница частотных диапазонов внутри каждого интервала незначительна, а такое разбиение позволяет учесть нелинейные поляризационные эффекты и размытие сигнала в полосе и в диаграмме направленности. Фарадеевское вращение на веществе Галактики было вычтено из измеряемых величин мер вращения, используя данные Тейлора и др. [70]. Эти значения для исследуемых источников приведены в таблице 2.4.

В то время как построение карт фарадеевского вращения выполнено по всем областям струй, в которых присутствует сильный поляризационный поток, сравнительный анализ величин МВ проведен для двух смоделированных компонентов струй: РСДБ ядра и оптически тонкой детали джета.

2.5.3 Результаты наблюдений

Два источника выборки (0610+260 и 1845+797) были исключены из анализа в связи с отсутствием значимого поляризационного потока в их струях. Для остальных 18 источников выборки было построено 43 карты фарадеевского вращения в диапазоне 1.4–15.4 ГГц. Карты МВ для всех исследуемых источников показаны на рисунке 2.7.

Поведение поляризационного угла с квадратом длины волны в области РСДБ ядра имеет существенно нелинейный характер во всех рассматриваемых источниках. Там не менее, в двух третях объектов фарадеевское вращение было измерено посредством линейной регрессии EVPA – λ^2 в разбитых частотных под-диапазонах. Результирующее распределение величин мер вращения в струях 18 источников показано на рисунке 2.8 и дано в таблице 2.3 отдельно для ядерных и оптически тонких компонентов в разных частотных интервалах.

Таблица 2.4 — Величина Галактической меры вращения (в рад/м²) для 20 АЯГ проекта VLBA «ВК134». Значения МВ по каталогу NVSS взяты из работы Тейлора и др. [70]. Средние значения по карте меры вращения получены в диапазоне 1.4–2.4 ГГц. Результат диссертанта из работы [А4].

Источник	NVSS	Оптич. тонк. области	Среднее по карте
0148+274	-82 ± 3	-90 ± 4	-91 ± 5
0342+147	6 ± 8	14 ± 4	13 ± 4
0425+048	35 ± 11	42 ± 4	42 ± 4
0507+179	-29 ± 6	-65 ± 4	-53 ± 4
0610+260	44 ± 7	—	—
0839+187	38.2 ± 1.7	35 ± 4	32 ± 5
0952+179	-5.5 ± 1.0	-8 ± 4	-9 ± 5
1004+141	12 ± 2	3 ± 4	7 ± 5
1011+250	-36 ± 12	—	—
1049+215	8.8 ± 1.9	-2 ± 4	0 ± 5
1219+285	15 ± 13	-1 ± 4	2 ± 4
1406–076	-10 ± 7	-2 ± 4	-2 ± 5
1458+718	63.1 ± 0.9	66 ± 4	40 ± 5
1642+690	-11.5 ± 1.3	-5 ± 4	-5 ± 5
1655+077	14.0 ± 1.9	41 ± 4	40 ± 5
1803+784	-66.5 ± 0.9	-62 ± 4	-65 ± 6
1830+285	30 ± 3	—	19 ± 8
1845+797	-5 ± 2	—	—
2201+315	-96 ± 3	-108 ± 5	-103 ± 7
2320+506	-78 ± 5	-55 ± 5	-57 ± 10

Измеренные величины МВ были пересчитаны в систему источника согласно уравнению (2.4) (см. таблицу 2.8). В результате, самая большая мера вращения среди исследуемых 18 объектов измерена в квазаре 0952+179 и составила $-(1.69 \pm 0.03) \times 10^4$ рад/м².

Из таблицы 2.3 видно, что меры вращения в оптически тонких компонентах систематически увеличивают свои значения с увеличением частоты наблюдений. Вероятнее всего, этот эффект вызван деполяризацией излучения в диаграмме направленности телескопа, который более существенен на низких частотах (см., например, [121]). Тем не менее, большинство источников в области оптически тонкого синхротронного излучения следуют линейной зависимости $EVPA-\lambda^2$ во всем диапазоне частот 1.4–15.4 ГГц. Хотя в нескольких случаях (например, 1458+718 и 1642+690) поляризационный угол вращается нелинейно с λ^2 . В параграфе 3.3 показано, что такое поведение обусловлено изменением направления магнитного поля вдоль луча зрения, и наблюдается только в источниках, содержащих спиралевидные магнитные поля во внешних оболочках струй.

Для оценки вклада Галактического вращения в измеряемые величины фарадеевского вращения был проведен следующий анализ. Первый подход предполагает, что все вращение в оптически тонких компонентах струй рождается в веществе Галактике, а синхротронное излучение генерируется в одной и той же пространственной области струй на всех анализируемых частотах. В этом случае проводилась линейная регрессия наблюдаемой зависимости $EVPA-\lambda^2$ в диапазоне 1.4–15.4 ГГц, а наклон результирующей прямой определял величину Галактической МВ. Во-вторых, была посчитана средняя величина МВ на 1.4–2.4 ГГц картах фарадеевского вращения источников. Результаты расчетов представлены в таблице 2.4, из которых видно, что Галактика дает существенный вклад в наблюдаемые величины мер вращения. Тем не менее, часть фарадеевского вращения возникает в окрестности струйных выбросов.

Наблюдаемые величины МВ выше в ядерных компонентах струй, особенно в наблюдениях на более высоких частотах (как видно на рисунке 2.8). Поскольку исследуемые источники были выбраны по величине видимого сдвига начала струи, вероятно, что ядерное излучение, наблюдаемое на разных частотах, возникает в различных областях струй. Если предположить, что фарадеевский экран является внешней оболочкой струи и расположен близко к областям, в которых генерируется синхротронное излучение, тогда можно воспользоваться формулой (2.5) для оценки его физических свойств. Таблица 2.3 суммирует результаты подгонки наблюдаемых данных этой зависимостью. Восемь из три-

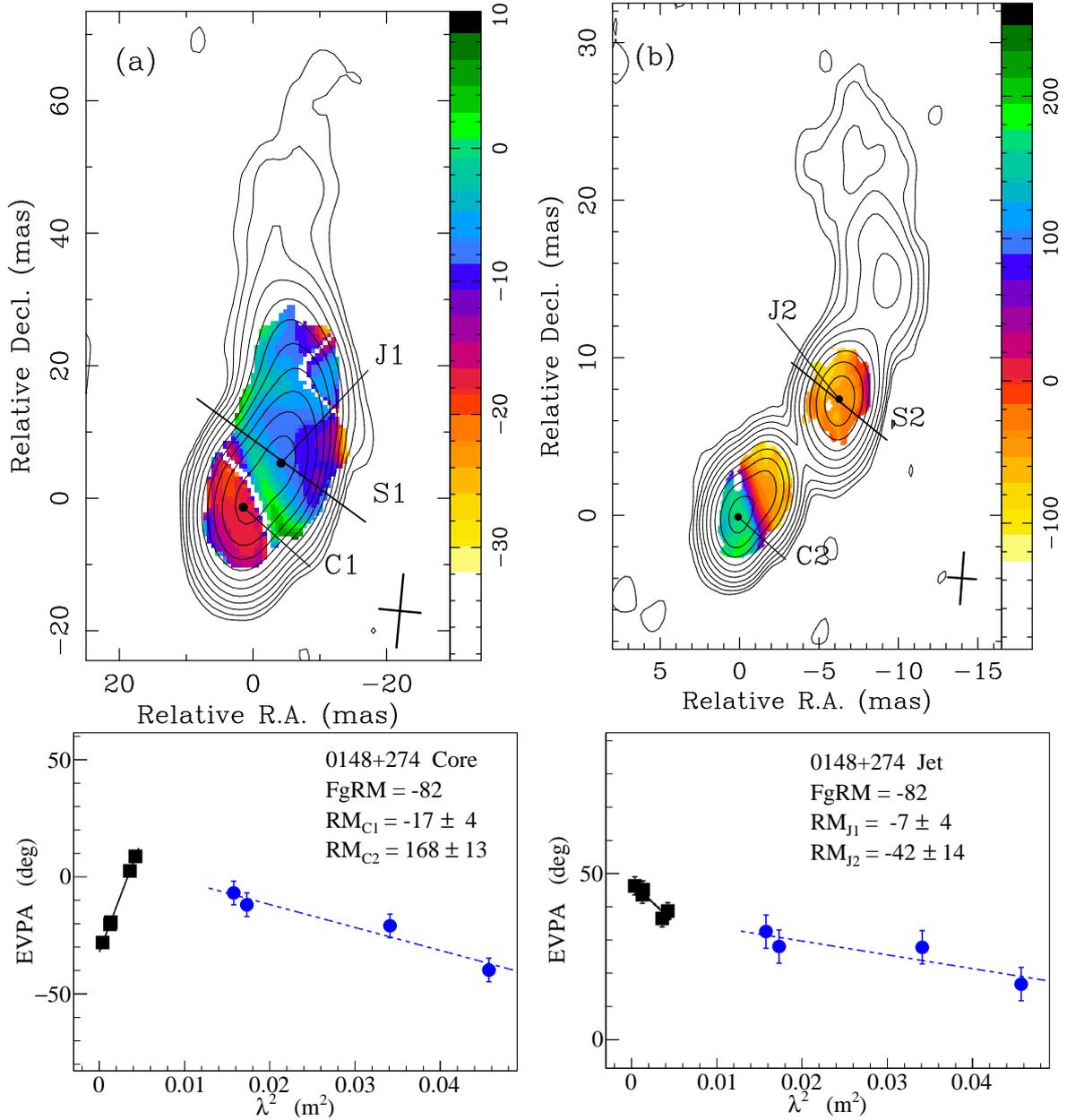


Рисунок 2.7 — Верхний ряд: VLBA карты фарадеевского вращения (цвет) квазара 0148+274 в интервале 1.4–2.4 (панель слева) и 4.6–15.4 ГГц (панель справа). По горизонтальной оси отложено прямое восхождение (мсек дуги), по вертикальной оси – склонение (мсек дуги). Нижний ряд: измеренный EVPA в зависимости от λ^2 в ядре (панель слева) и оптически тонкой детали струи (панель справа). По горизонтальной оси отложен квадрат длины волны (м²), по вертикальной оси – поляризационный угол (град.). Результаты линейной аппроксимации и величины мер вращения приведены. Цветовая схема и величины мер вращения даны в рад/м². «FgRM» – величина Галактической меры вращения. Синтезированная диаграмма направленности по уровню половинной мощности показана на картах в нижнем углу крестиком. Результат диссертанта из работы [A4].

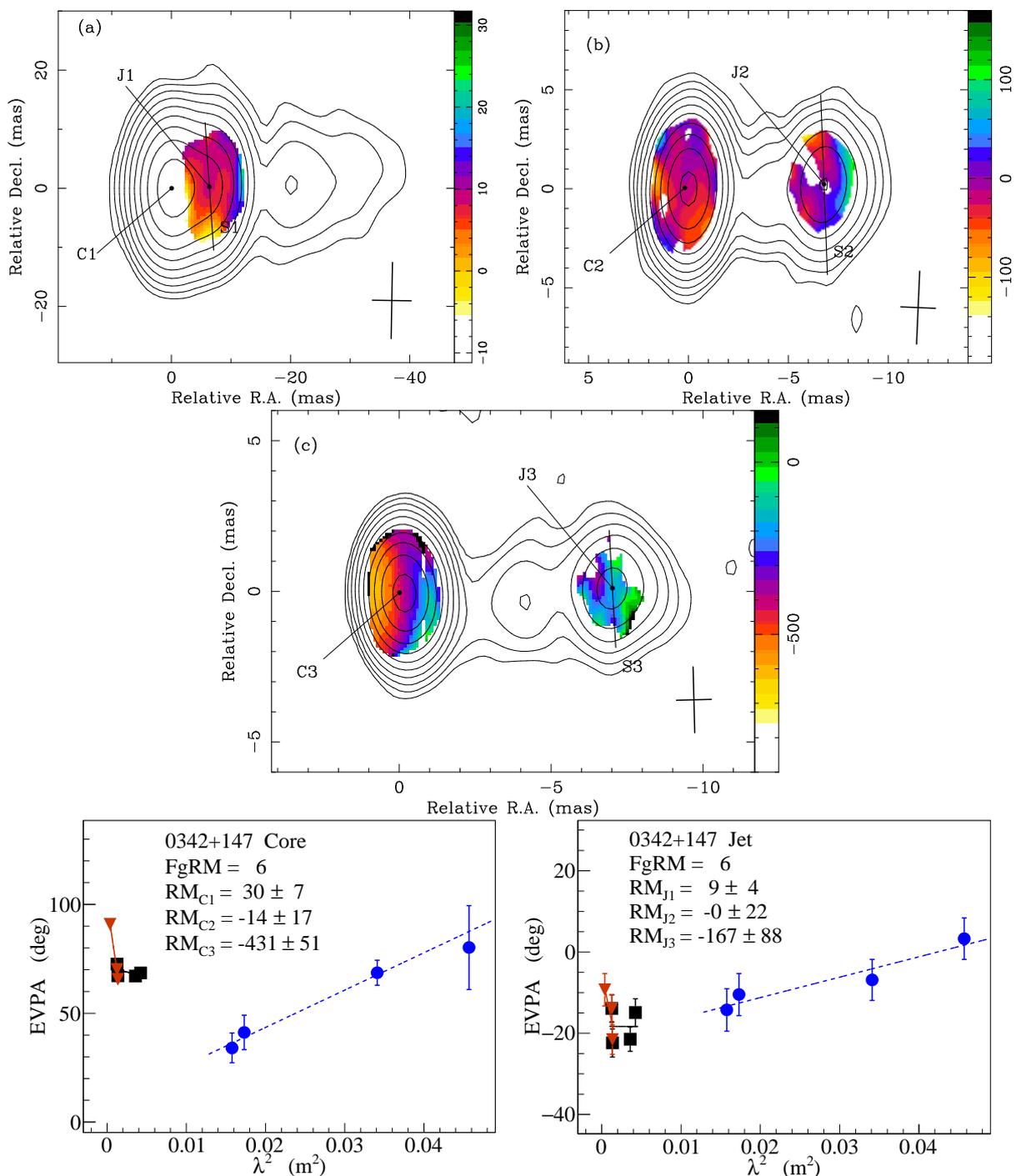


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 0342+147 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 4.6–8.4 (панель сверху справа) и 8.1–15.4 ГГц (панель в центре).

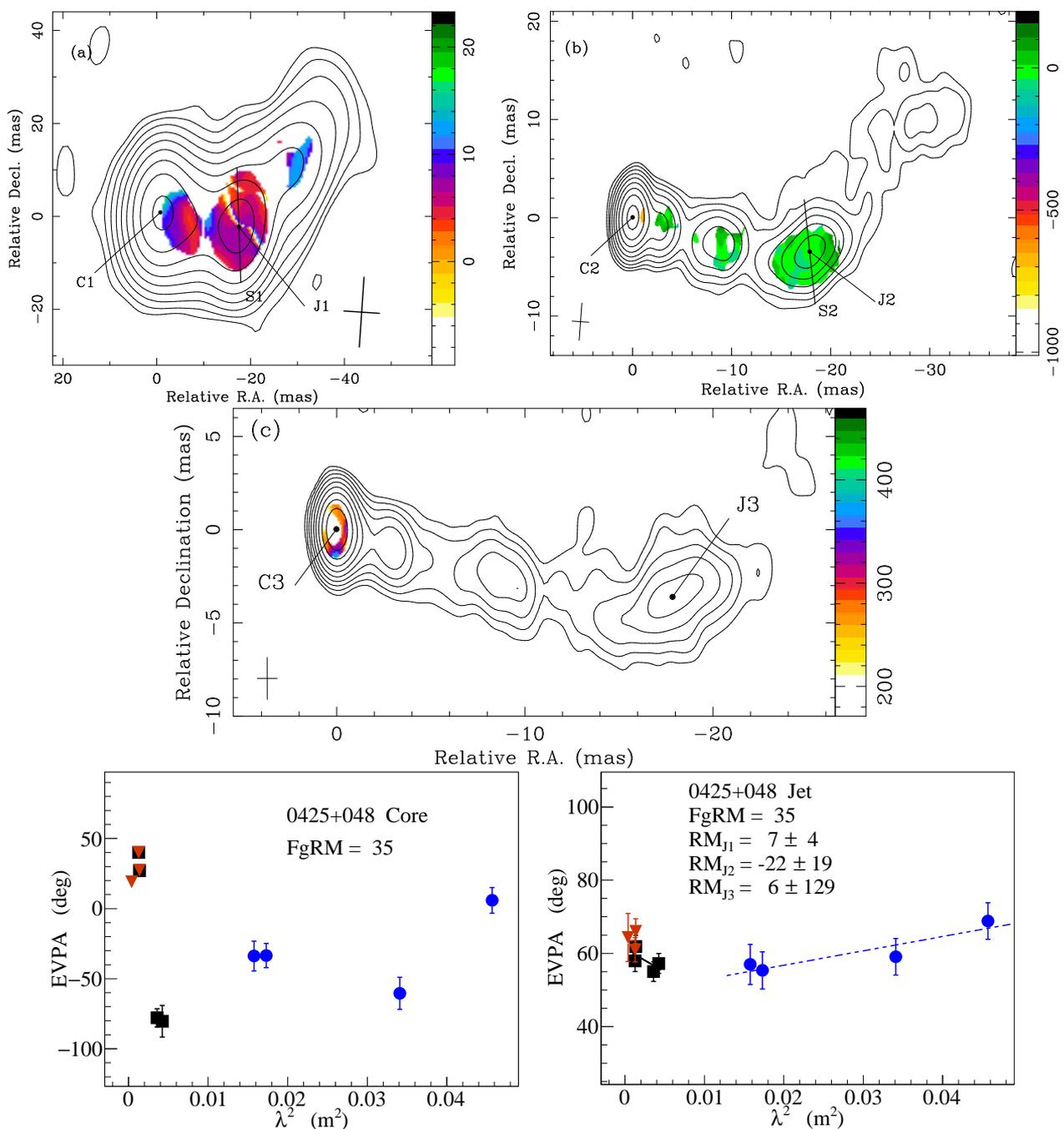


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения АЯГ 0425+048 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 4.6–8.4 (панель сверху справа) и 8.1–15.4 ГГц (панель в центре).

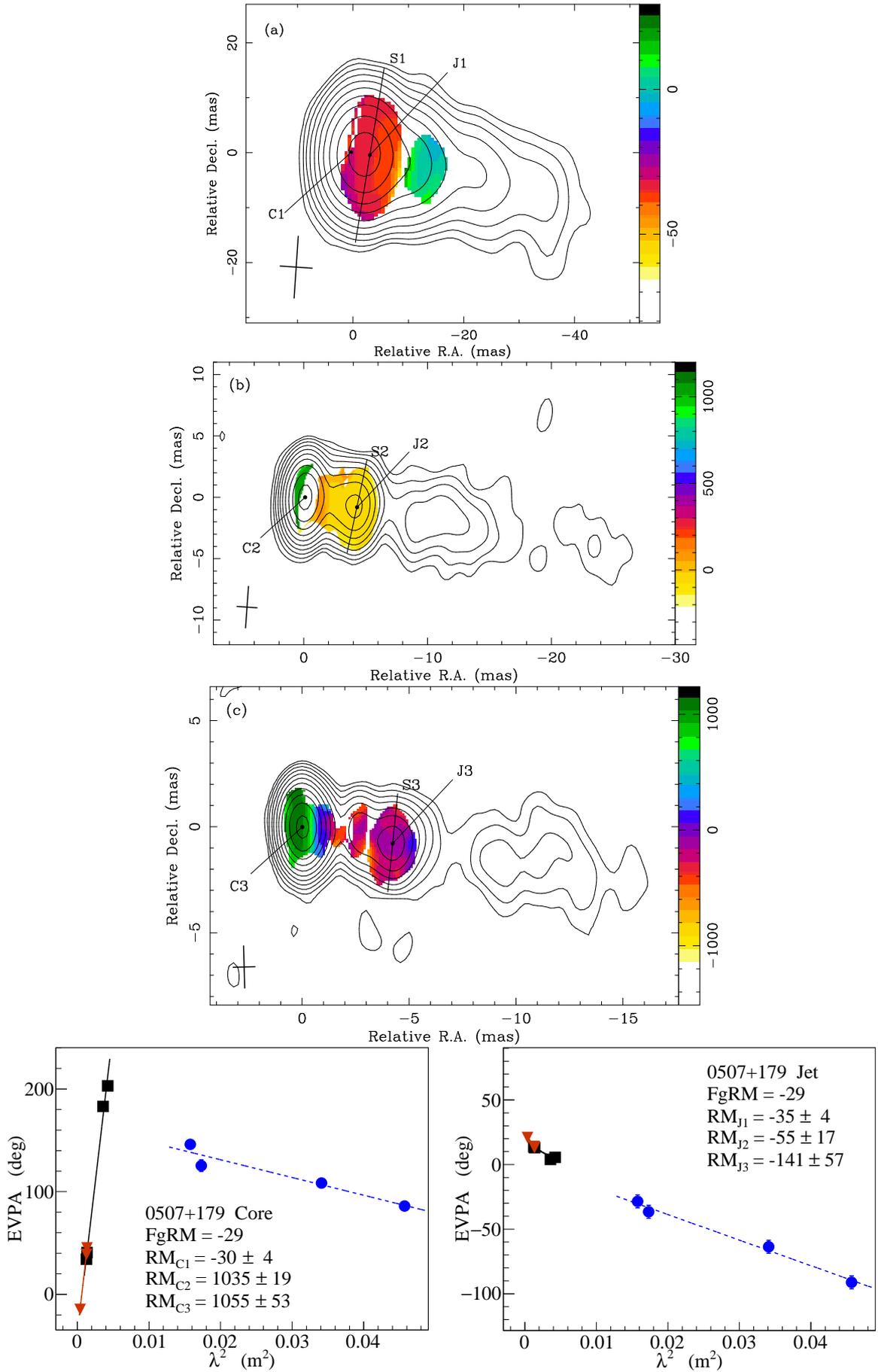


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения АЯГ 0507+179 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху), 4.6–8.4 (панель в центре) и 8.1–15.4 ГГц (панель снизу).

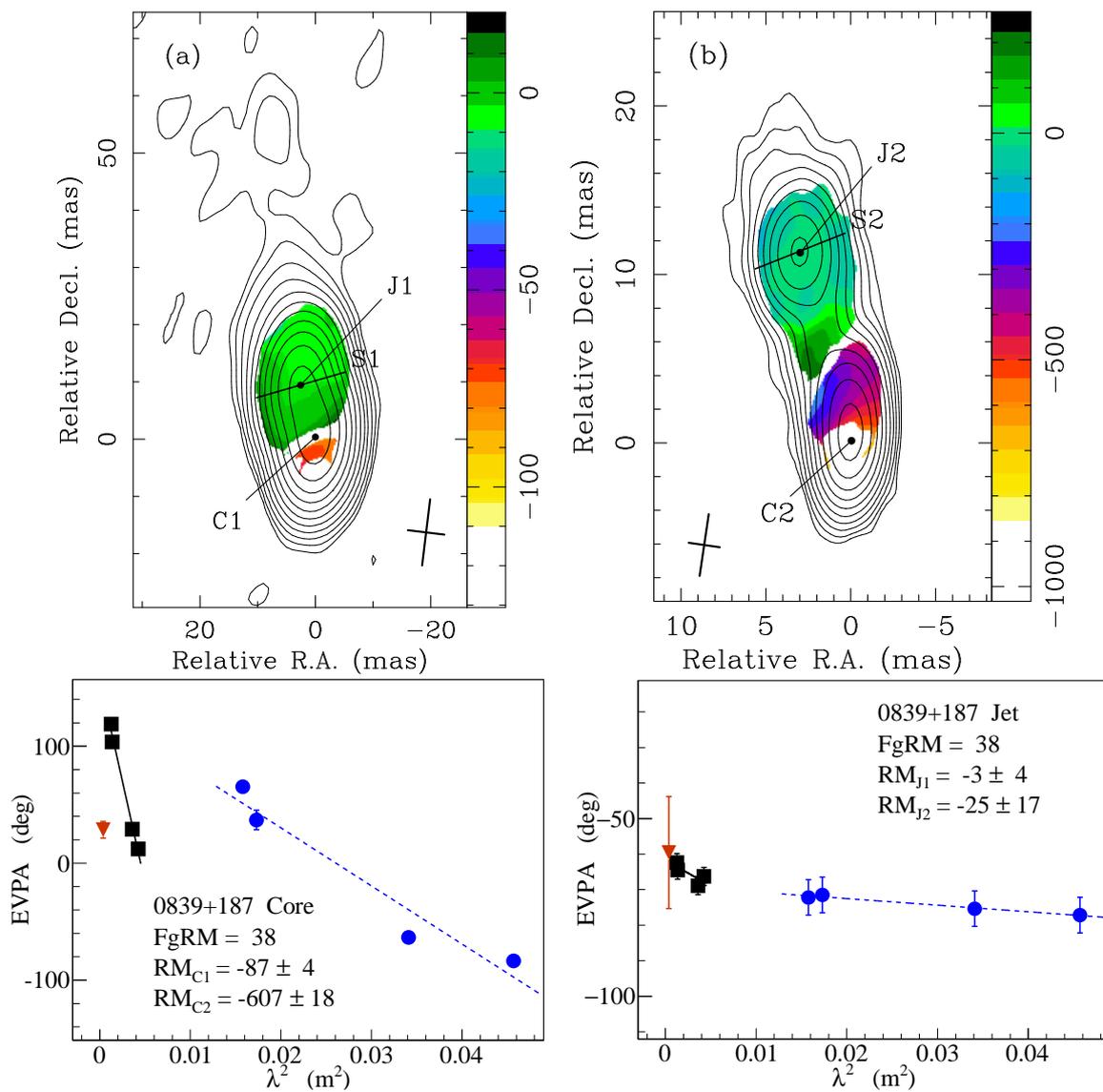


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 0839–187 в интервале 1.4–2.4 (панель слева) и 4.6–8.4 ГГц (панель справа).

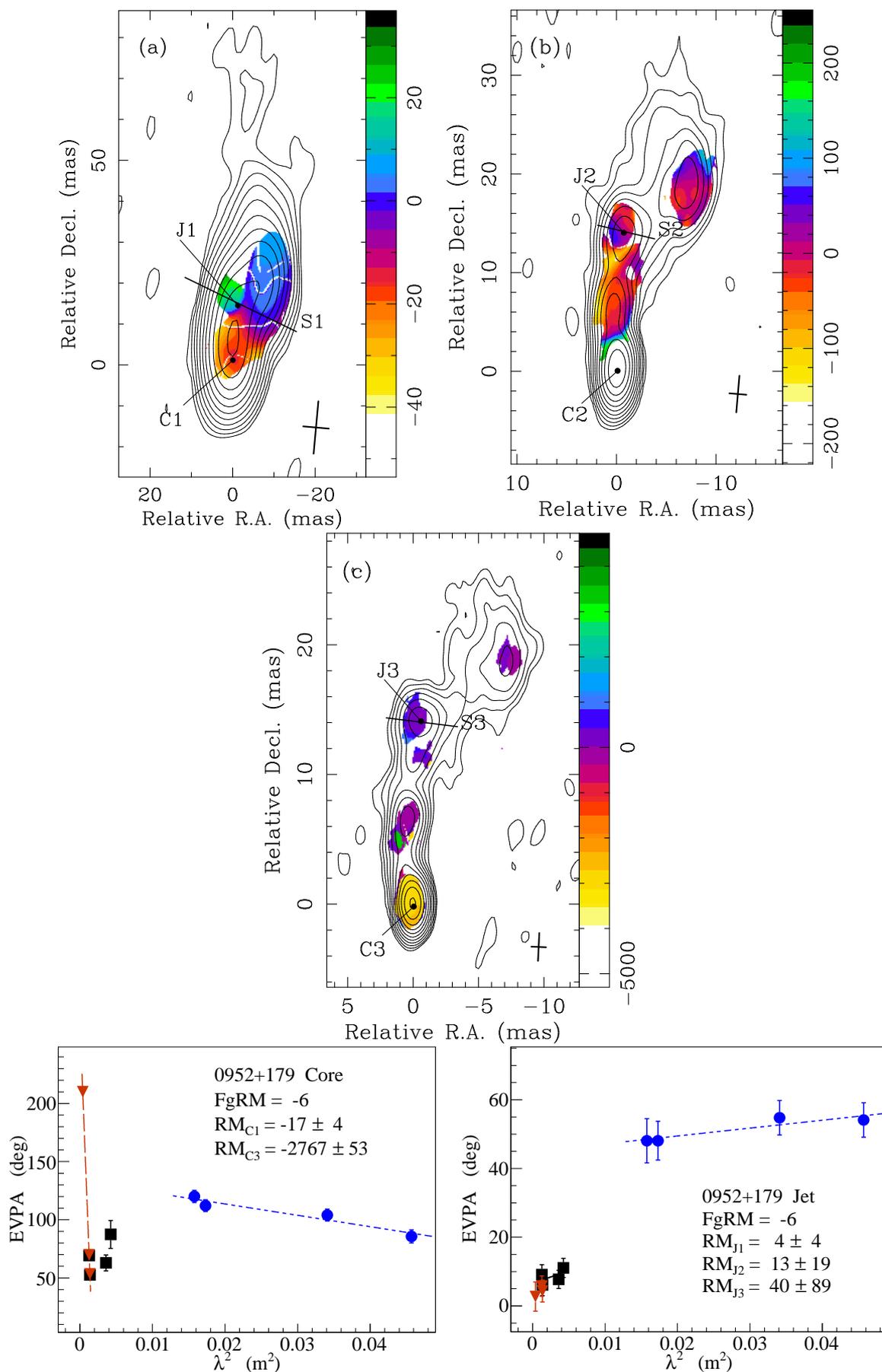


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 0952+179 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 4.6–8.4 (панель сверху справа) и 8.1–15.4 ГГц (панель в центре).

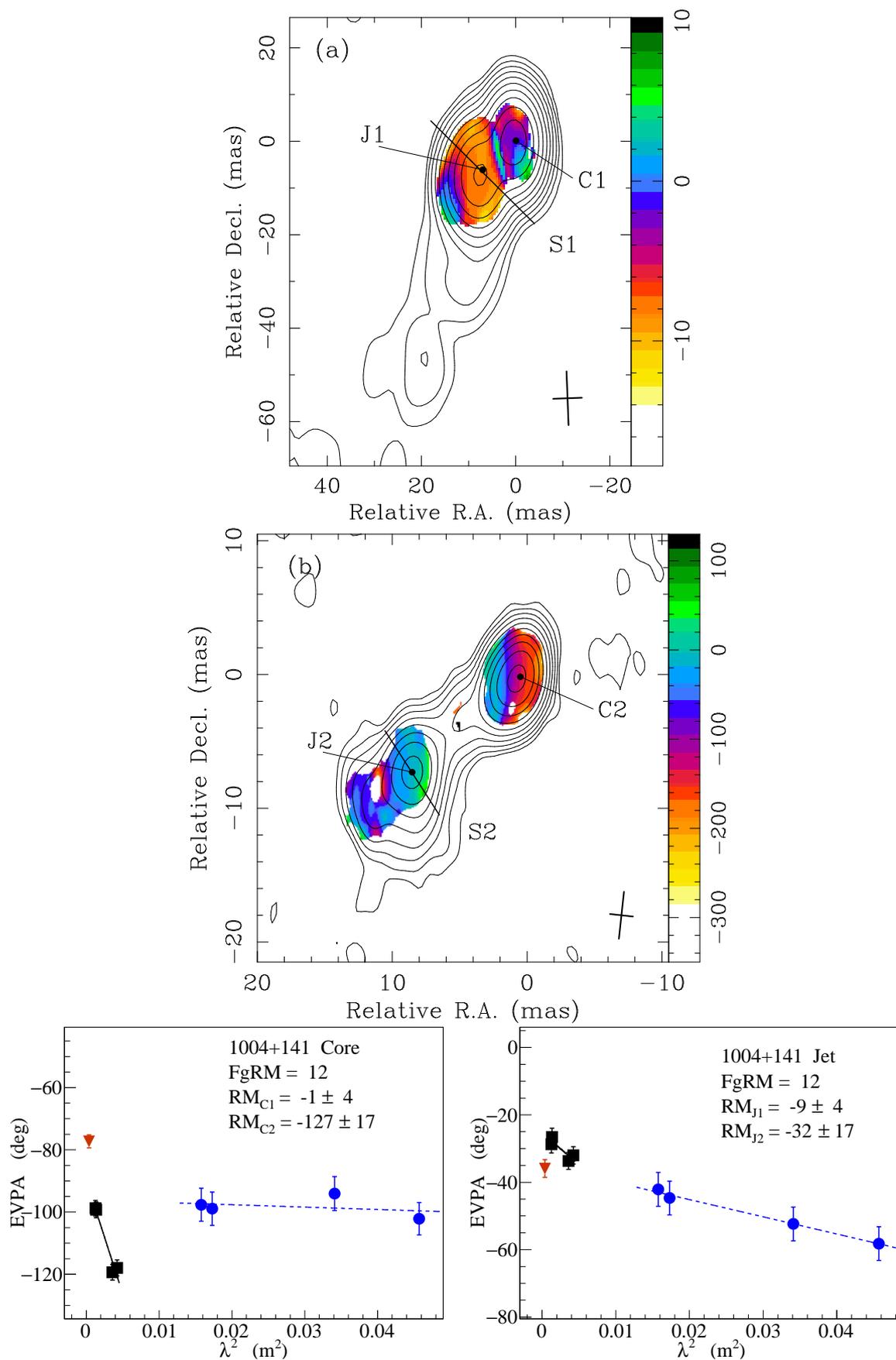


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1004+141 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху) и 4.6–8.4 ГГц (панель в центре).

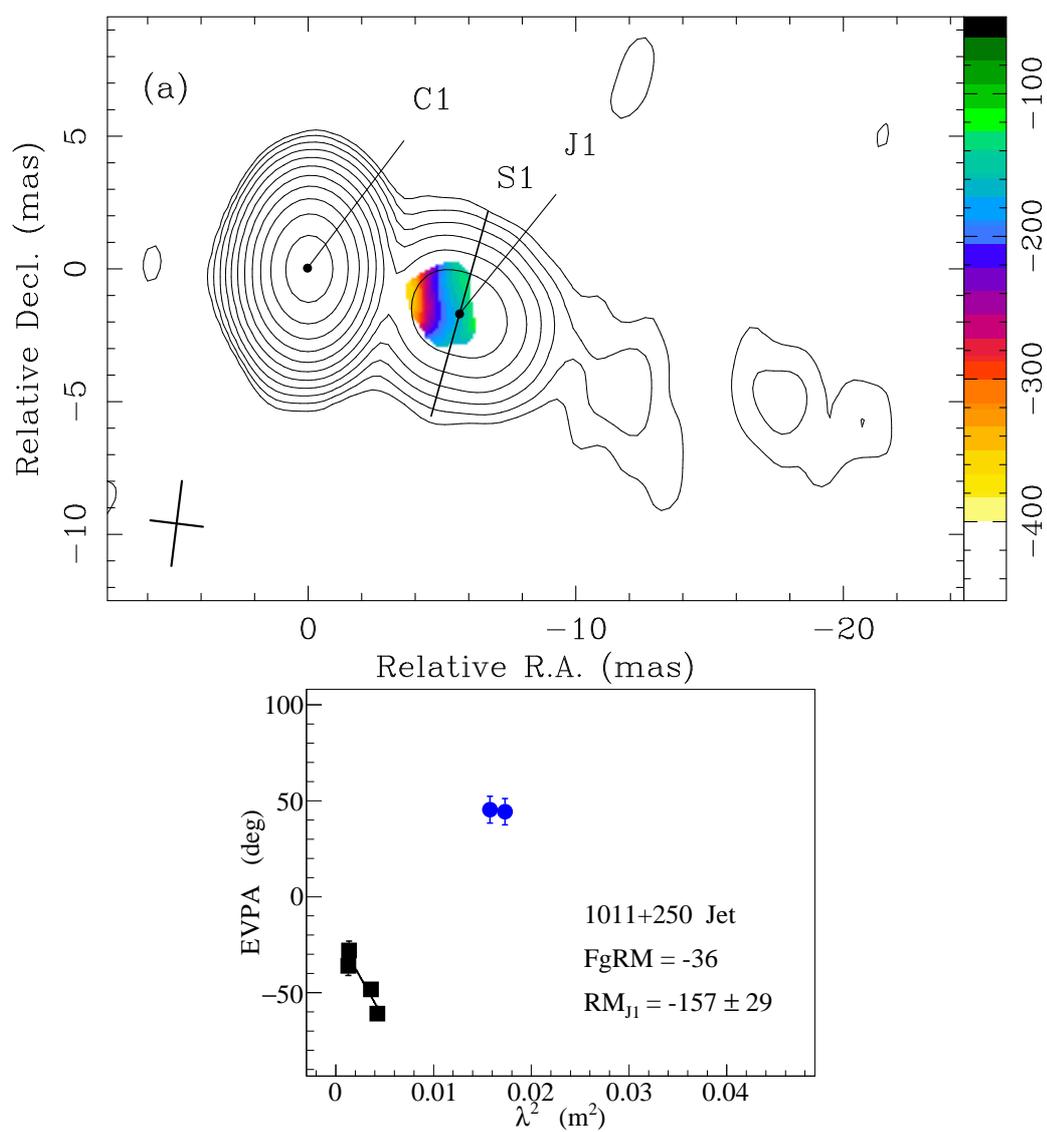


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1011+250 в интервале 4.6–8.4 ГГц.

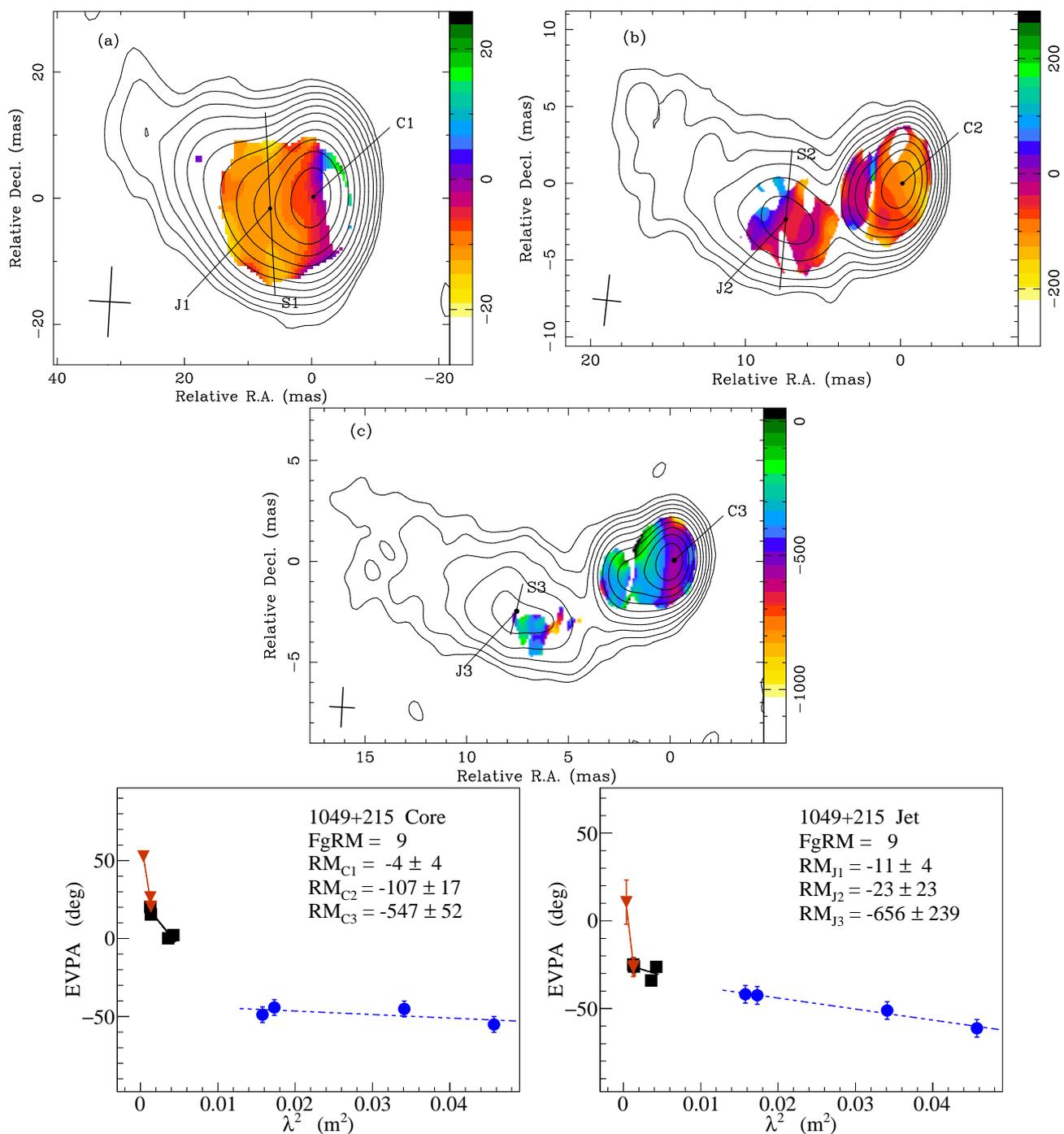


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1049+215 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 4.6–8.4 (панель сверху справа) и 8.1–15.4 ГГц (панель в центре).

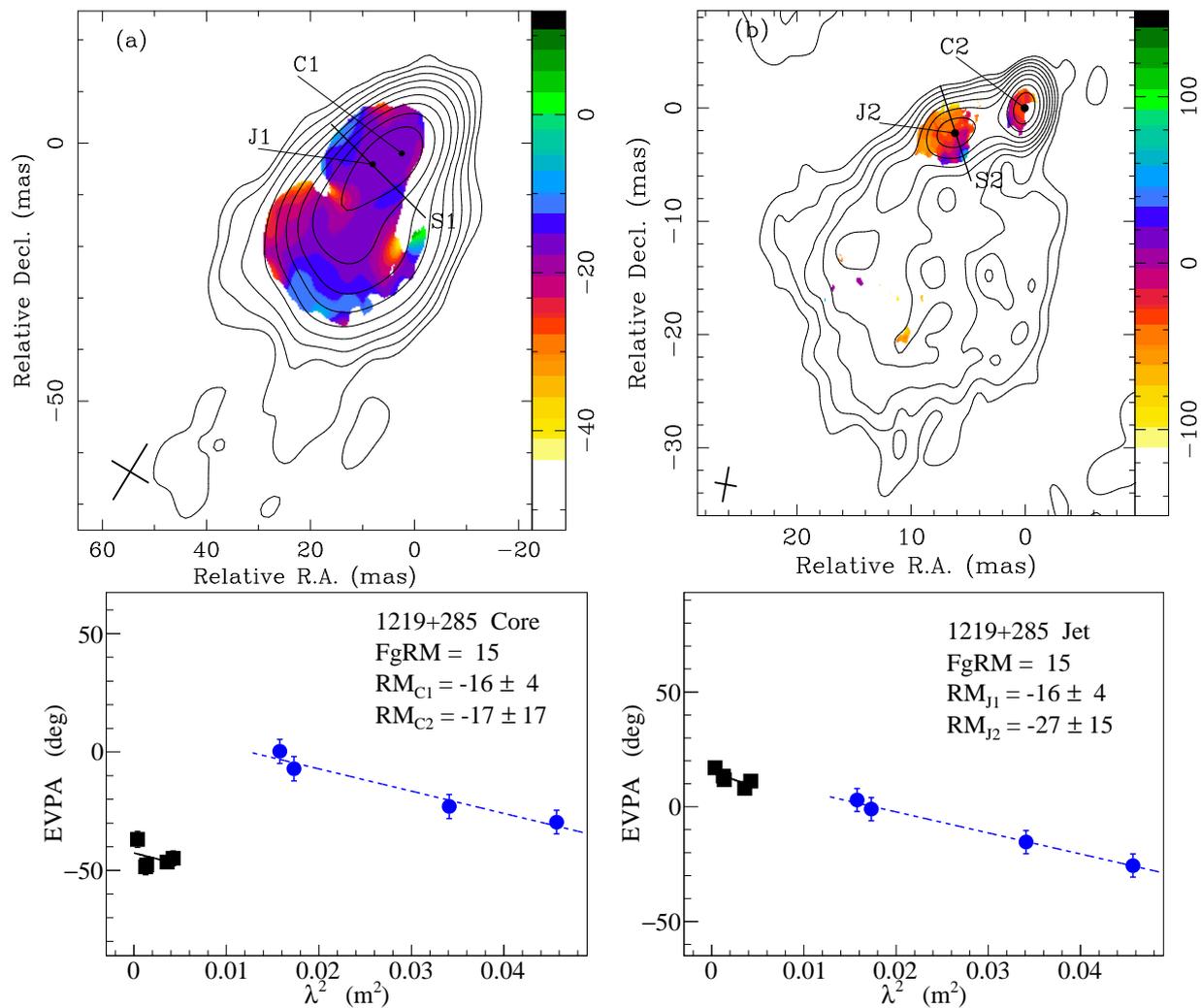


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения лацертиды 1219+285 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 4.6–15.4 ГГц (панель сверху справа).

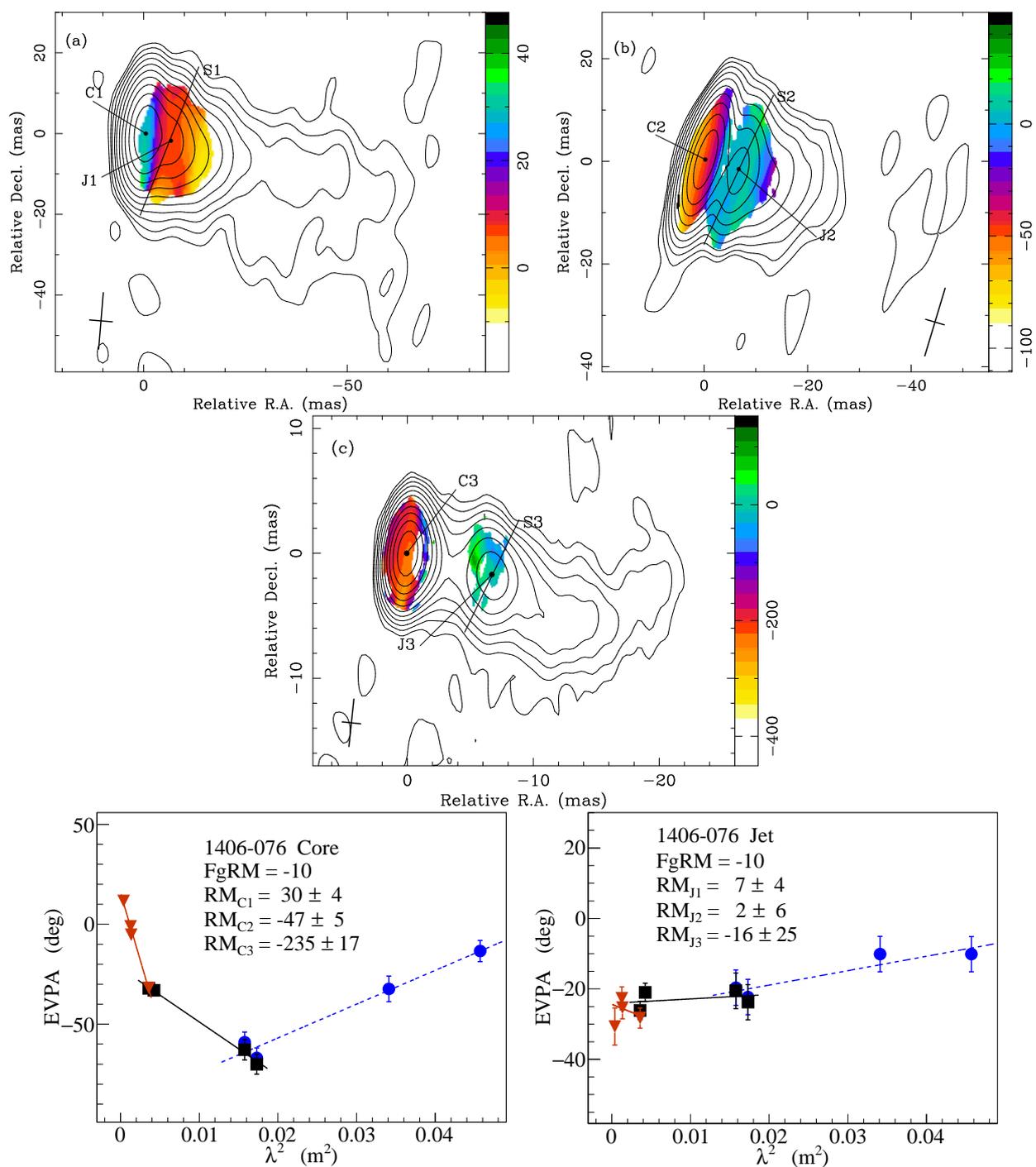


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1406–076 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 2.2–5.0 (панель сверху справа) и 5.0–15.4 ГГц (панель в центре).

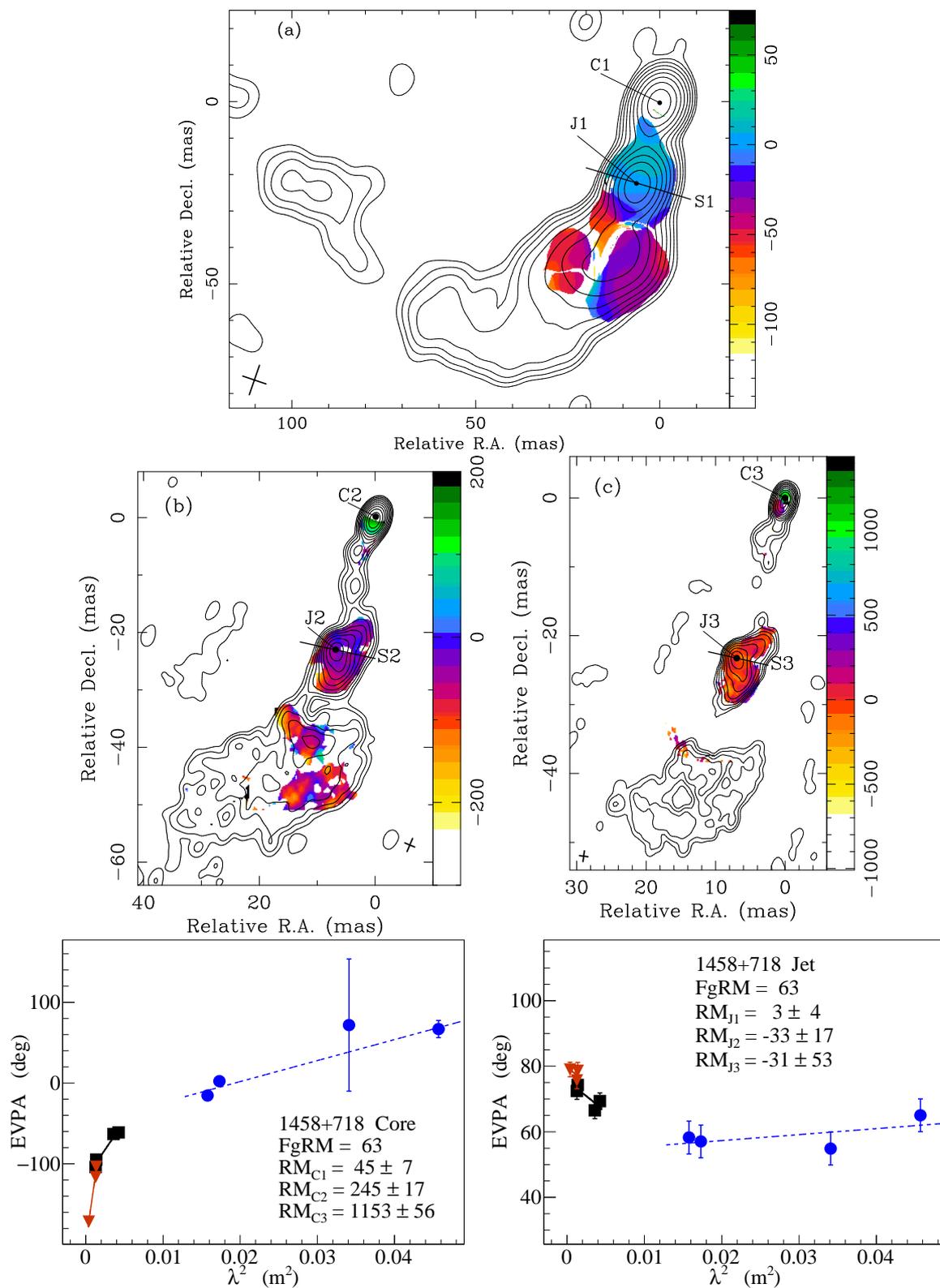


Рисунок 2.7 — Продолжение. Вверху: VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1458+718 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху), 4.6–8.4 (панель в центре слева) и 8.1–15.4 ГГц (панель в центре справа).

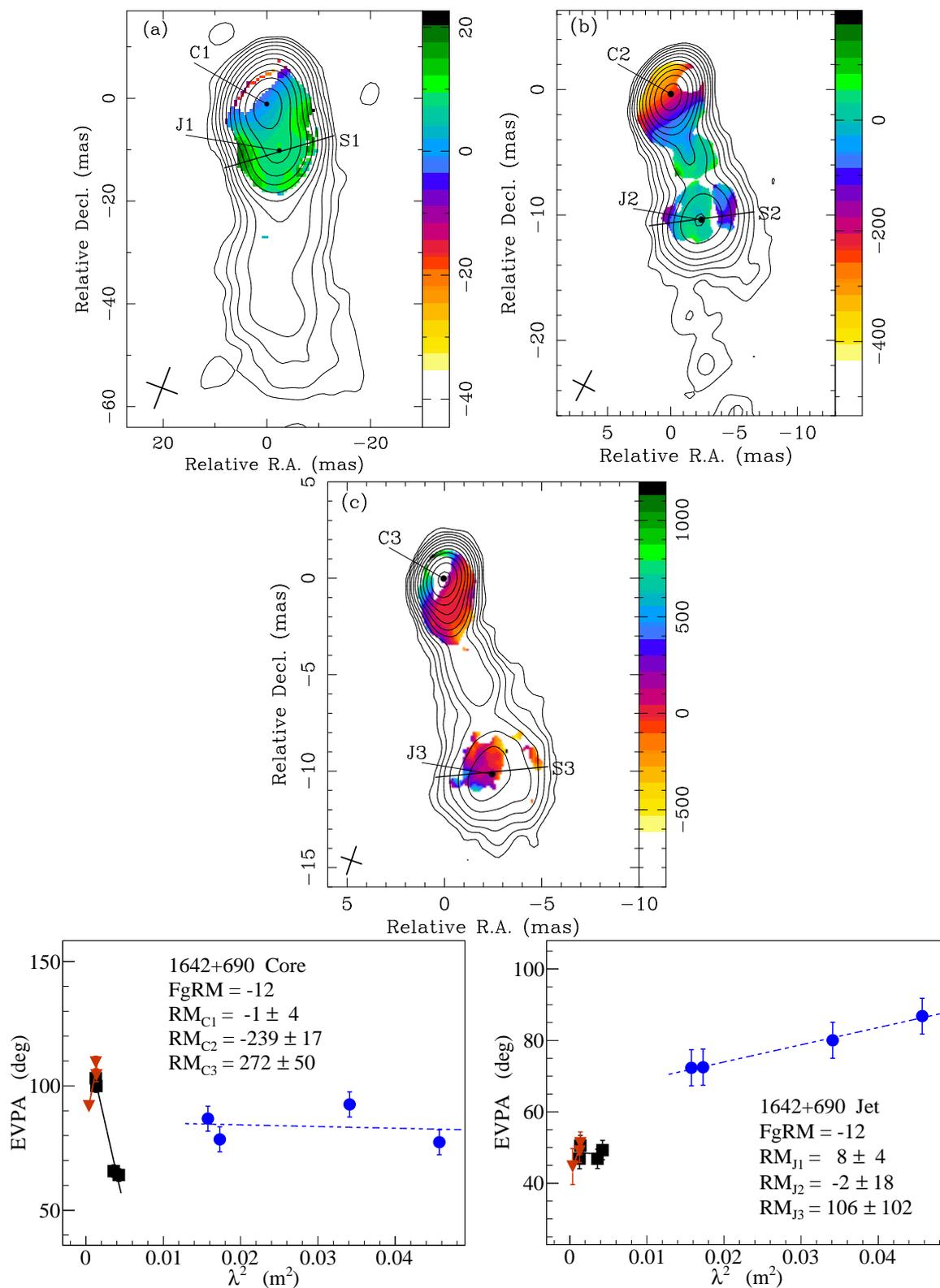


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1642+690 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху слева), 4.6–8.4 (панель сверху справа) и 8.1–15.4 ГГц (панель в центре).

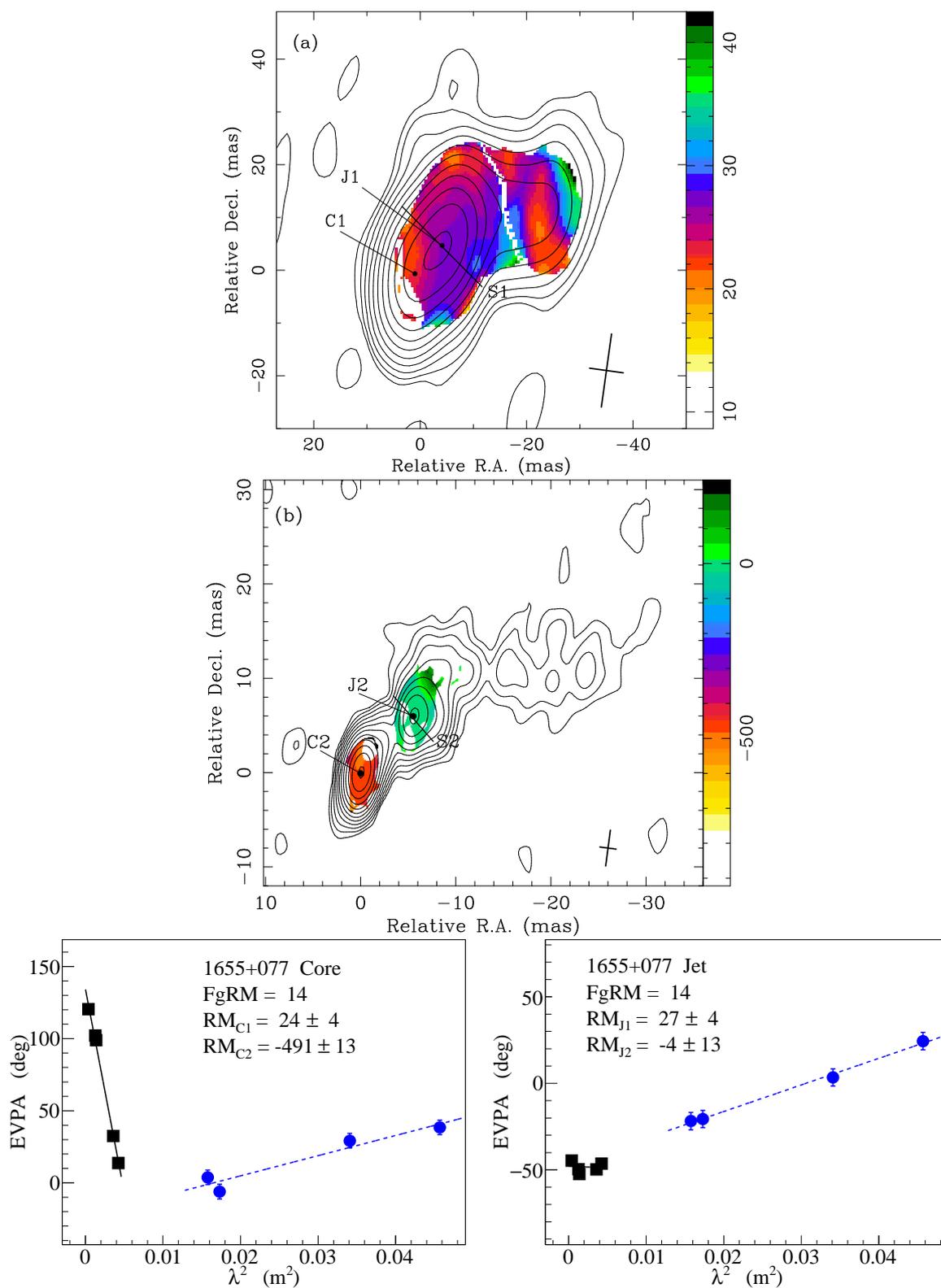


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1655+077 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху) и 4.6–15.4 (панель в центре).

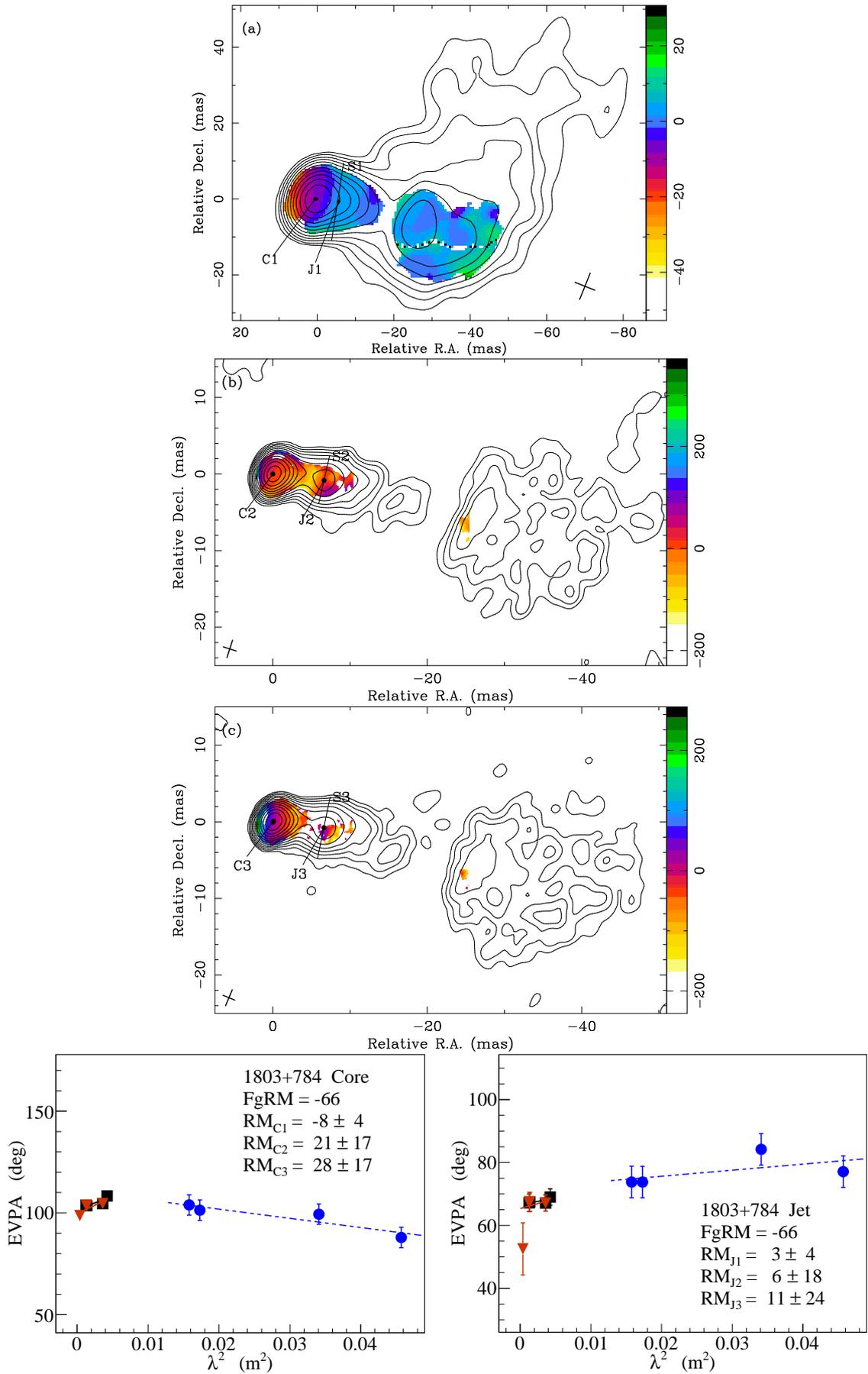


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1803+784 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху), 4.6–8.4 (вторая сверху панель) и 5.0–15.4 ГГц (третья сверху панель).

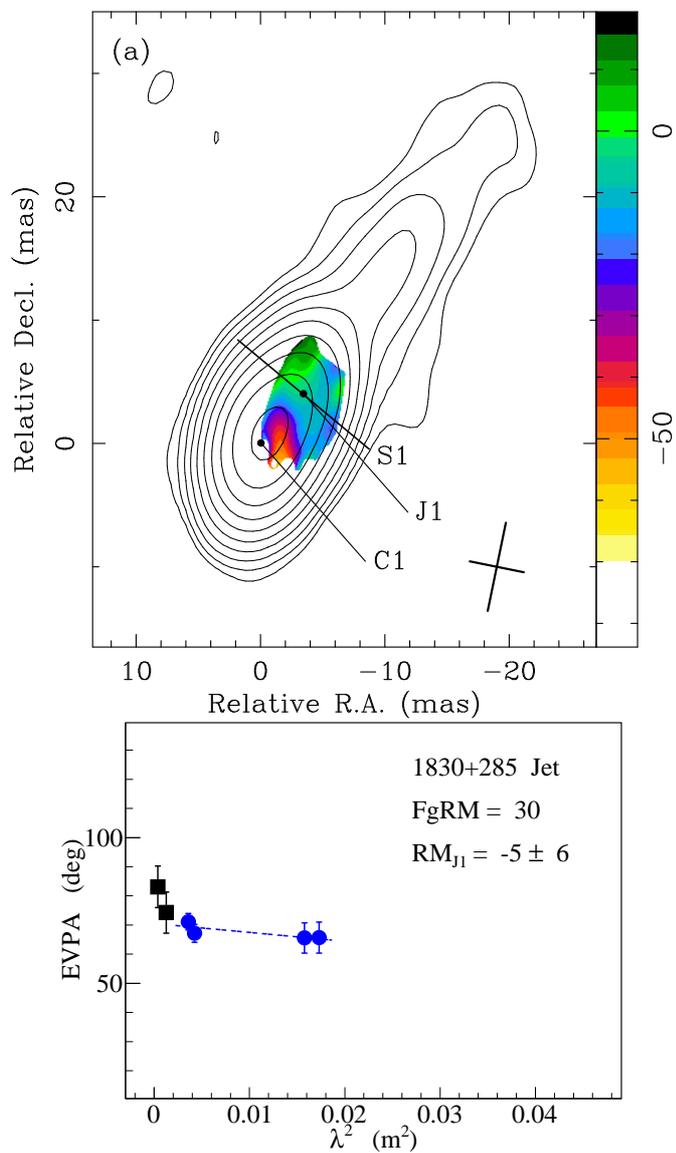


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 1830+285 в интервале 2.2–5.0 ГГц.

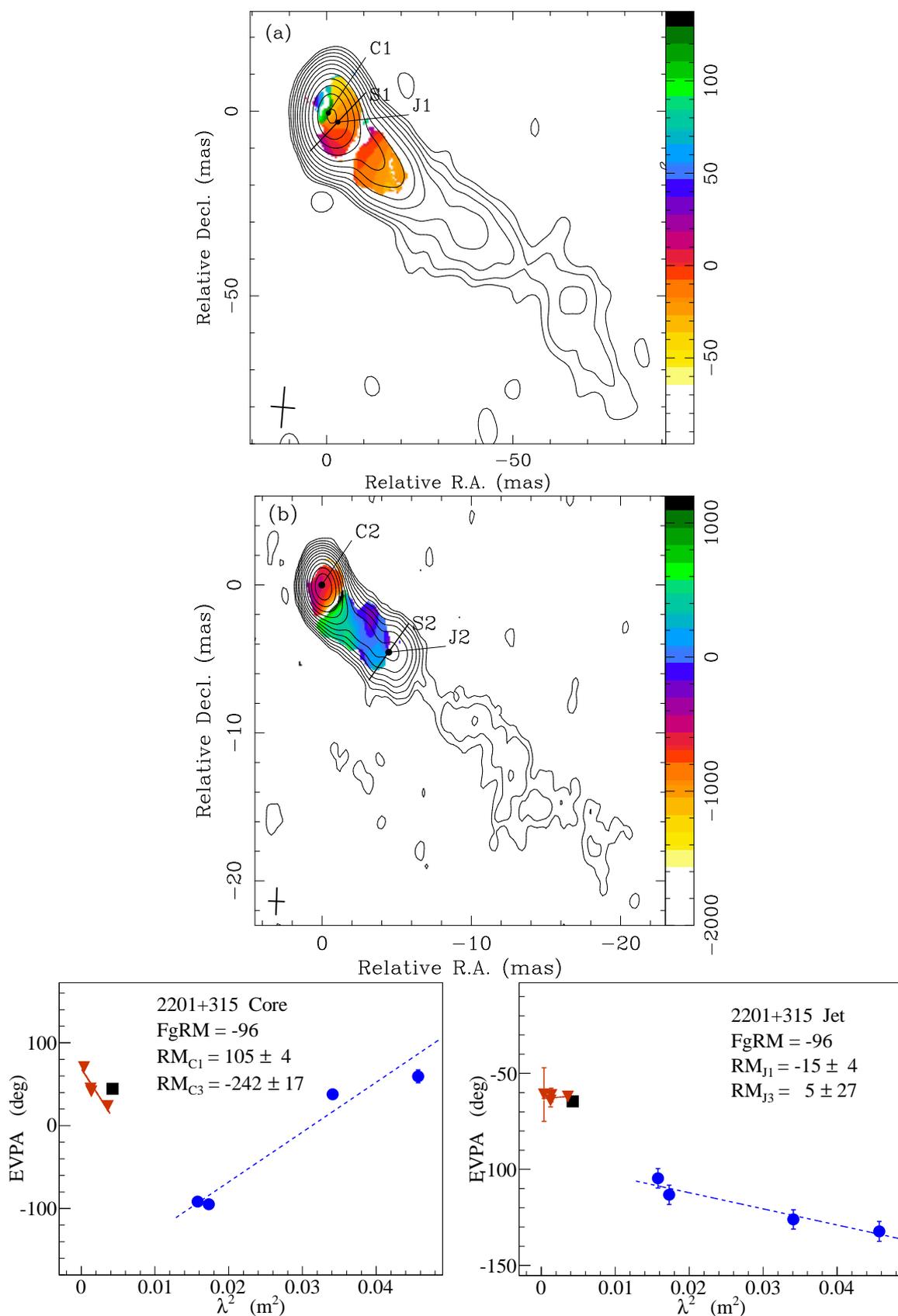


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 2201+315 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху) и 8.4–15.4 ГГц (панель в центре).

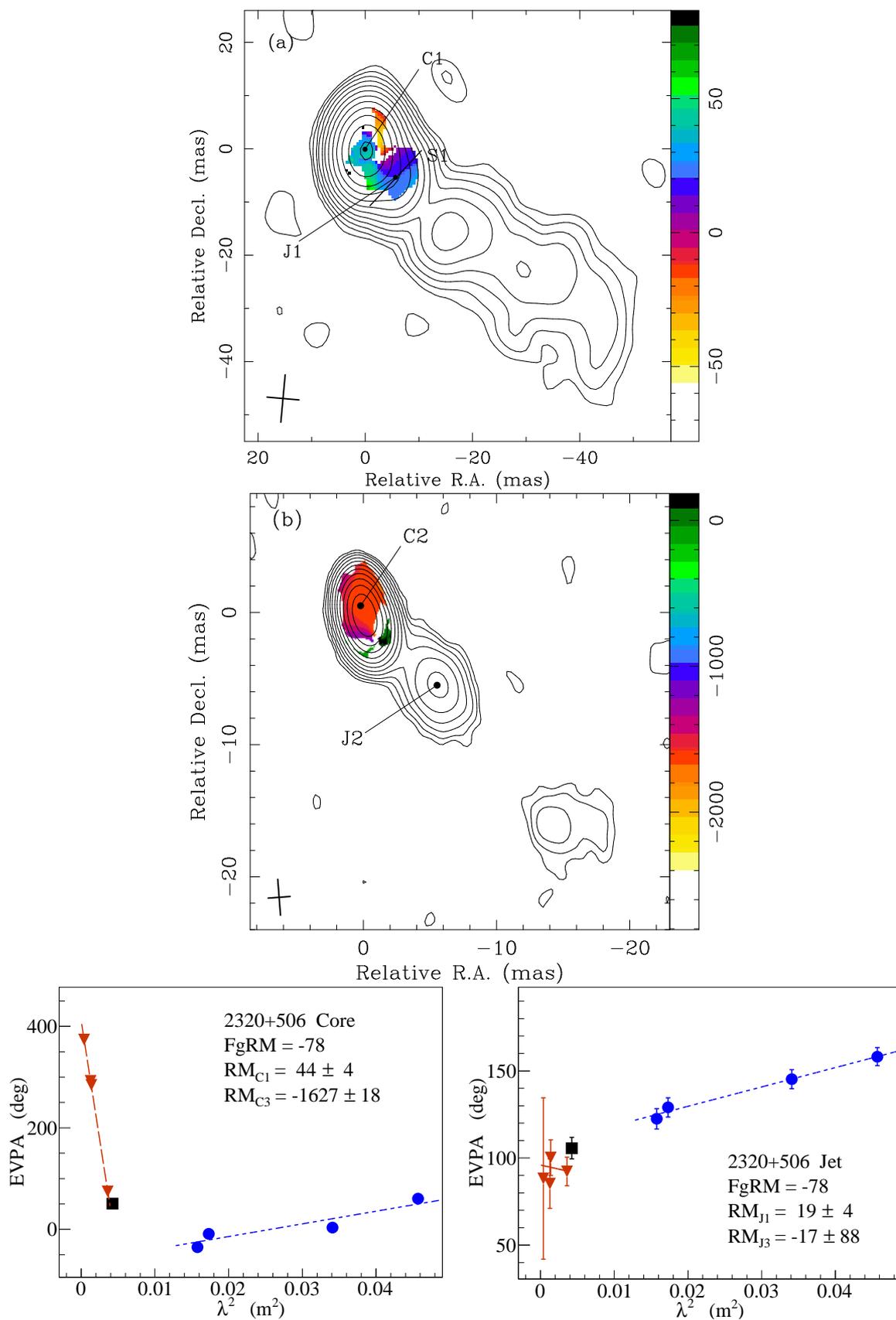


Рисунок 2.7 — Продолжение. VLBA карты фарадеевского вращения квазара 2320+506 в интервале 1.4–2.4 (панель сверху) и 5.0–15.4 ГГц (панель в центре).

надцати источников, для которых мера вращения в ядерной области измерена в нескольких частотных интервалах, имеют значения $a \approx 1-3$. Полученные значения степени a близки к величинам, ожидаемым в рамках моделей струй с конической формой струи и возможным существованием сферического кокона с тепловой замагниченной плазмой, окружающего струю и образуемого аккреционным диском центральной машины АЯГ [116; 122]. Два источника этой выборки показывают значения меньше 1, и три источника – значение больше 3. Аналогичные результаты были получены другими авторами, например, Йорстад и др. [85], О’Салливан и Габузда [83] и Триппе и др. [123]. Наблюдаемое отклонение величин от ожидаемой зависимости может объясняться несколькими причинами: (1) отличной от конической формой струи, (2) вспышечной активностью источника, сопровождающейся усилением продольной компоненты магнитного поля или изменениями физических условий в основании струи, (3) клочковатой природой фарадеевского экрана, который разрешается на более коротких длинах волн, (4) наличием нескольких неразрешенных компонентов струи или компонентов с разными мерами вращения, и (5) внутренней (активной) природой фарадеевского экрана, когда вращение плоскости поляризации происходит в том же объеме, в котором рождается синхротронное излучение. В §3.3 показано, что эти эффекты действительно наблюдаются в исследуемых источниках.

Оценим меру вращения, образуемую замагниченным веществом, расположенным в области ядра, видимого на 15 ГГц. Пушкарев и др. [20] оценил среднее расстояние РСДБ ядра от центральной машины АЯГ для блазаров в ~ 13 пк, в то время как сила магнитного поля в этой области составила ~ 70 мГс. Учитывая, что фарадеевское вращение происходит в плазме плотностью $1-10 \text{ см}^{-3}$ [95] и в области размером $0.1-1$ пк, то мера вращения согласно формуле (2.1) составит $\gtrsim 6 \cdot 10^3 \text{ рад/м}^2$. При этом измеренная нами средняя мера вращения в системе источника в диапазоне $8.1-15.4$ ГГц (см. таблицу 2.3) составляет $M_{B_0} = 1.5 \cdot 10^3 \text{ рад/м}^2$. Величины довольно хорошо согласуются, что делает внешнюю оболочку струи, толщиной около $0.1-1$ пк, вероятным источником возникновения фарадеевского вращения. Существование такого слоя наблюдается в некоторых АЯГ (например, [91; 92]) и предсказывается многими моделями релятивистских струй [115; 116].

Семь из тринадцати исследуемых источников показывают изменение знака фарадеевского вращения в разных интервалах частот в ядерной области струи. Помимо вышеперечисленных эффектов такое поведение могут объяснить вариации направления распространения струи, возникающие за счет ее искривления

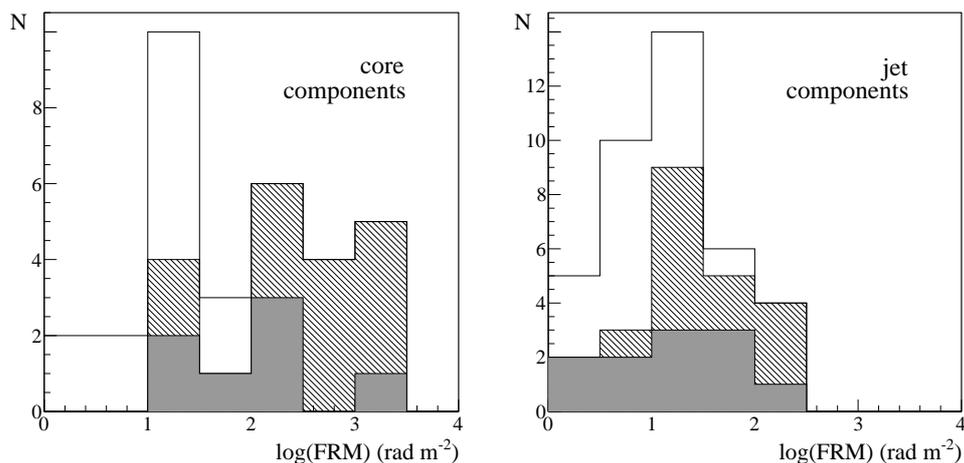


Рисунок 2.8 — Распределение фарадеевского вращения в РСДБ ядрах с синхротронным самопоглощением (панель слева) и оптически тонких деталях струй (панель справа) 18 АЯГ по наблюдениям на радиоинтерферометре VLBA. Различная заливка соответствует следующим частотным интервалам: 1.4–2.4 (белый цвет), 4.6–8.4 (серый цвет) и 8.1–15.4 ГГц (наклонная штриховка). По горизонтальной оси отложен логарифм абсолютной величины фарадеевского вращения ($\text{рад}/\text{м}^2$), по вертикальной оси – количество случаев (ед). Результат диссертанта из работы [А4].

или изменения скорости течения плазмы (например, ускорение или замедление), часто наблюдаемые в струях АЯГ [124; 125].

2.5.4 Поведение величины меры вращения во времени

Восемь из двадцати исследуемых нами источников наблюдались ранее другими авторами: 0507+179, W Comae, 1406–076, 3C 309.1, 1642+690, 1655+077, 1803+784 и 2201+315. Один из перечисленных источников (1458+718) показывает признаки переменности фарадеевской меры вращения во времени на масштабах года. Не представляется возможным сказать о наличии такой переменности в квазаре 0507+179 и лацертиде 1803+784. В то время как остальные пять источников проявляют стабильность своих значений МВ. Как было показано в §2.4.3, быстрое изменение фарадеевского вращения возможно только если замагниченная плазма расположена очень близко к области формирования синхротронного излучения, т.е. является внешней оболочкой джета. Ниже приведены детальные обсуждения каждого источника.

Комментарии к отдельным источникам

0507+179. Триппе и др. [123] измерили верхний предел на величину МВ в $14000 \text{ рад}/\text{м}^2$ в ядре квазара в диапазоне частот 80–253 ГГц. Наблюдения были

выполнены интерферометром NOEMA¹⁴ в период 2007–2011 гг. Наши измерения МВ в диапазоне 8.1–15.4 ГГц составляют (1055 ± 53) рад/м². Результаты измерений согласуются с величинами Триппе и др. и нельзя сказать определенно о переменности МВ во времени в этом источнике.

1219+295 (W Comae). Измерения МВ Габузды и др. [126] составляют $-(32 \pm 9)$ рад/м² в оптически тонком компоненте струи лацертиды и $-(40 \pm 7)$ рад/м² в ядре. Эти измерения получены на интерферометре VLBA на частотах 5.0, 8.4 и 15.3 ГГц 6 апреля 1997 г. Наши измерения МВ в диапазоне 4.6–15.4 ГГц в этих местоположениях струи составляют $-(42 \pm 15)$ и $-(32 \pm 17)$ рад/м² соответственно (добавлена МВ от Галактики, поскольку Габузда и др. производила коррекцию измеренных величин за интегральное значение по карте, составляющее в их измерениях минус 1 рад/м²). Несмотря на десятилетнюю разницу между датами наблюдений, МВ вдоль струи существенно не меняется.

1406–076. Вращение EVPA с λ^2 в ядре этого квазара увеличивается в сторону коротких длин волн. В результате чего мера вращения увеличивается с (30 ± 4) , до $-(47 \pm 5)$ и $-(235 \pm 17)$ рад/м² в диапазонах 1.4–2.4, 2.2–5.0 и 5.0–15.4 ГГц соответственно. Ховатта и др. [82] оценили фарадеевское вращение в этой области в $-(505 \pm 108)$ рад/м² в интервале 8–15 ГГц, с использованием наблюдений на телескопе VLBA 5 апреля 2006 г. Наши измерения хорошо согласуются с этими величинами. Ветухновская и др. [127] измерили МВ ≈ 64 рад/м² на частотах 5 и 15 ГГц интерферометром VLBA 5 апреля 1997 г. Эта величина является нижней оценкой МВ из-за использования только двух длин волн в анализе. Если не вносить коррекцию 180° на величину поляризационного угла на частоте 5 ГГц, выполненную Ветухновской и др., тогда их измерения составляют МВ ≈ -900 рад/м², и близко к нашим измерениям. Таким образом, мера вращения в ядре квазара остается постоянной на длительном промежутке времени.

1458+718 (3C 309.1). МВ в околядерной области квазара составляет (245 ± 17) рад/м² в диапазоне 4.6–15.4 ГГц и увеличивается до (1153 ± 56) рад/м² в ядре источника в диапазоне 8.1–15.4 ГГц. Другие наблюдения 3C 309.1 выполнены Ховатта и др. [82] на VLBA на частотах 8–15 ГГц 6 сентября 2006 г. и Аароном и др. [128] на VLBA на частотах 5 ГГц 24 марта 1995 г. и на 8.4 ГГц 11 декабря 1995 г. Их оценка МВ в околядерной области составляет (628 ± 125) (Ховатта и др.) и ≈ 450 (Аарон и др.) рад/м². Эти величины близки к нашим МВ на расстоянии 1–2 мсек дуги от ядра. Измерения фарадеевского враще-

¹⁴Northern Extended Millimeter Array

Таблица 2.5 — Измерения фарадеевской меры вращения в ядре лацертиды 1803+784. Результат диссертанта из работы [A4].

Дата	ν (ГГц)	МВ (рад/м ²)	Ссылка
1997-04-06	5–22	-237 ± 64	1
1998–2001	43–222	4360 ± 3740	2
2000-06-27	8.1–15.2	-201 ± 55	3
2002-08-24	15.3–43.1	~ 600	4
2003-08-22	4.6–15.4	~ -300	4
2006-09-06	8–15	112 ± 74	5
2007-05-03	5.0–15.4	28 ± 17	6

Примечание – Ссылки: 1 – Габузда и Чернецкий [129]; 2 – Йорстад и др. [130]; 3 – Завала и Тэйлор [81]; 4 – Махмуд и др. [131]; 5 – Ховатта и др. [82]; 6 – данная работа.

ния на расстоянии ~ 25 мсек дуги составляют $-(31 \pm 53)$ (наши измерения) и (231 ± 103) рад/м² (измерения Ховатта и др.), что согласуется в пределах ошибок.

1642+690. Мера вращения в околядерной области струи источника меняется от ~ 900 до ~ 200 рад/м² (8.1–15.4 ГГц), что скорее всего связано с уменьшением оптической толщи по мере удаления от центра АЯГ. МВ в положении смоделированного ядерного компонента составляют (272 ± 50) рад/м² (этот же диапазон), в то время как измерения Ховатты и др. равны (148 ± 75) рад/м² (3 сентября 2006 г.). В пределах ошибок, величины фарадеевского вращения совпадают.

1655+077. Верхний предел на абсолютную величину МВ в ядре источника по наблюдениям Агудо и др. [132] на частотах 86 и 229 ГГц (40-м радиотелескоп IRAM) составляет 41900 рад/м² (16 августа 2010 г.). Большое вращение EVPA с λ^2 на коротких длинах волн, видимое в ядре квазара в наших наблюдениях, согласуется с измерениями Агудо и др. Тем не менее, мы измерили существенно меньшую величину, равную $-(491 \pm 13)$ рад/м² (4.6–15.4 ГГц). В то время как Ховатта и др. сообщают величину МВ = (1286 ± 91) рад/м² (8–15 ГГц, 10 ноября 2006 г.). Значимая переменность МВ в ядре квазара на протяжении 6.5 месяцев указывает на очень близкое расположение фарадеевского экрана к струе, а более высокая МВ в измерениях Ховатты и др. может означать инжекцию более плотного сгустка плазмы в основании струи, проявляемая в кинематическом анализе Листера и др. [125] в виде нового компонента джета.

1803+784. Эта лацертида является предметом активных поляризационных исследований. В таблице 2.5 перечислены доступные измерения МВ, выполненные в течении 10 лет. Величины фарадеевского вращения совпадают в пределах

ошибок, и сложно сказать о наличии значимой временной переменности.

2201+315. Источник демонстрирует сложную структуру фарадеевского экрана: в то время как МВ в ядре составляет $-(242 \pm 17)$ рад/м² (8.1–15.4 ГГц), 2 мсек дуги вдоль по струе его величина увеличивается до (602 ± 32) рад/м² и уменьшается до (253 ± 15) рад/м² на расстоянии 3 мсек дуги от ядра. Та же самая поляризационная структура видна в наблюдениях Завалы и Тейлора [81] и Ховатты и др. [82] в близком интервале частот. Их измерения МВ в положении 2 и 3 мсек дуги от начала струи составляют ~ 612 и ~ 5 рад/м² (Завала и Тейлор, 20 июня 2001 г.) и (528 ± 91) и $-(21 \pm 168)$ рад/м² (Ховатта и др., 6 октября 2010 г.). Вероятное объяснение такой структуры – наличие стоячей ударной волны или искривление джета в области 2 мсек дуги от положения ядра. Наличие неподвижного компонента в этой области [125] может являться подтверждением этих предположений. Таким образом, структура фарадеевского вещества 2201+315 остается постоянной на протяжении десятка парсек и в течении длительного интервала времени.

2.6 Распределение фарадеевского вращения поперек струй АЯГ

В настоящем параграфе представлены результаты обработки данных наблюдений, поставленных и проведенных научным руководителем диссертации Ковалевым Ю. Ю. в 2007, в рамках эксперимента «VK134» на телескопе VLBA. Автор работы не принимал участия в наблюдениях, а проводил поляризационную калибровку, и дальнейшую обработку и анализ данных. Исследования и результаты данного параграфа опубликованы в работе [A4].

2.6.1 Поперечные профили и градиенты фарадеевского вращения

Согласно уравнению (2.1), фарадеевское вращение характеризует распределение вещества и направление магнитного поля вдоль луча зрения. В §2.7.1 было показано систематическое увеличение величины вращения по струе, связанное с увеличением плотности частиц и напряженности магнитных полей. Помимо этого, изменение вращения может происходить и поперек направления распространения струи. Вариации величины фарадеевского вращения в таком случае могут порождаться разными способами. К основным эффектам относятся: (1) неоднородная структура струи из-за распространения разного рода неустойчивостей вдоль нее; (2) взаимодействие струи с окружающим ее

веществом; (3) изменение направления магнитного поля; (4) несимметричность струи относительно ее центральной части или видимость только части струи в определенное время. Перечисленные эффекты рассмотрены ниже подробнее. Стоит отметить, что изменение знака фарадеевского вращения поперек струи возникает только при наличии эффекта (3) и, частично, (1).

(1) Распространение неустойчивостей различного рода (например, гидродинамические и Кельвина-Гельмгольца) вдоль релятивистских струй искажает их форму, создавая клочковатую, волнообразную структуру [133]. Из-за сложной формы, такие структуры лучше видны в АЯГ, наблюдаемых сбоку или под большими углами зрения. Примером таких источников является радиогалактика 3С 446 [134]. Тем не менее, в блазарах наличие неустойчивостей может быть прослежено по систематическому изменению направления магнитного поля вдоль струи, например, как в квазаре 3С 273 [135].

(2) Взаимодействие струй с окружающей их средой наблюдается во многих блазарах. Этот эффект может сопровождаться формированием наклонной ударной волны, увеличением МВ и изгибом струи в месте взаимодействия. Истинное отклонение струи от направления распространения в системе источника может составлять несколько градусов. Однако из-за очень малого угла наклона струи к лучу зрения, эффект проекции делает поворот значительным. Одним из ярких примеров таких случаев, является радиогалактика 3С 120, в которой Гомез и др. [136] зарегистрировали изменение фарадеевского вращения вдоль и поперек струи, а также изменение этой величины со временем.

(3) Теоретические модели предсказывают, что вращение черной дыры будет сопровождаться закручиванием магнитных линий [13; 137; 138]. Таким образом, поля будут отличаться от полоидальных (ориентированных вдоль направления струи) и будут приобретать спиралевидную форму (иметь тороидальную компоненту, ориентированную перпендикулярно направлению распространения). В результате, в проекции на небесную сферу, такое поле будет менять свое направление, создавая градиент МВ, в том числе, с изменением знака. В дополнении к этому теоретические расчеты показывают (например, [31]), что струи со спиралевидным полем, видимые в системе наблюдателя под определенным углом, могут проявлять поляризационную структуру «сердцевина-оболочка» [115; 139]. В таком случае, внутренние области струи («сердцевина») имеют поперечно ориентированное магнитное поле, в то время как на краях джета поле имеет продольное направление. Наличие тороидальной компоненты поля, существующей в струях на протяжении десятков–сотен парсек, показано к настоящему времени во многих источниках. Несколько ярких примеров – струи блазаров

1803+784 [131; 140], VL Lacertae [15; 83], и объекты со структурой «сердцевина-оболочка»: 1055+018 [91; 141], Mrk 501 [141; 142], OQ 530 [141] и другие [141; 143]. Количество АЯГ, проявляющих значительные поперечные градиенты мер вращения, составляет несколько десятков (например, [82; 126; 135; 144–146]).

(4) Данные анализа локального направления магнитного поля в струях АЯГ показывают, например, [132], что оно может быть ориентировано под разными углами к направлению распространения. Такое поведение может объясняться только несимметричностью поперечной структуры струи. Подтверждение такой конфигурации джета требует длительных наблюдений.

С целью поиска и исследования свойств градиентов фарадеевского вращения в струях АЯГ нами проведен анализ наблюдений 20 АЯГ телескопом VLBA в широком интервале длин волн.

2.6.2 VLBA наблюдения струй 20 АЯГ в диапазоне 1.4–15.4 ГГц и обработка данных

В §2.5 проведено описание выборки 20 АЯГ, наблюдавшихся на телескопе VLBA (код «VK134») в 2007 г., а также приведены результаты исследования распределения фарадеевского вращения вдоль струй этих объектов. В связи с тем, что рассматриваемые источники имеют яркие протяженные струи, и каждый источник наблюдался в течении длительного интервала времени, исследование этих АЯГ представляет собой уникальную возможность для проведения детального анализа распределения фарадеевского вращения поперек струй.

Направление распространения струи определялось его «хребтовой линией» (*англ.* *ridgeline*) в полной интенсивности. Для ее построения в азимутальный срез струи, рассчитываемый от центра карты, вписывалась Гауссова функция. Положение максимума Гауссианы определяло координаты точки хребтовой линии струи на данном расстоянии. Описанное действие повторялось с шагом, равным размеру пикселя карты, до тех пор, пока уровень сигнала превышал удвоенной величины уровня шумов по карте. Сглаживание хребтовой линии выполнялось линейной интерполяцией значений по двум соседним пикселям. Поперечные профили фарадеевского вращения в таком случае брались вдоль срезов, перпендикулярных хребтовой линии.

Абсолютные ошибки поляризационных углов, определяемые их привязкой к шкале градусов, не учитывались при анализе поперечных профилей мер вращения. Эти ошибки оказывают влияние только на абсолютные значения фарадеевского вращения, в то время как значимость поперечного градиента МВ опреде-

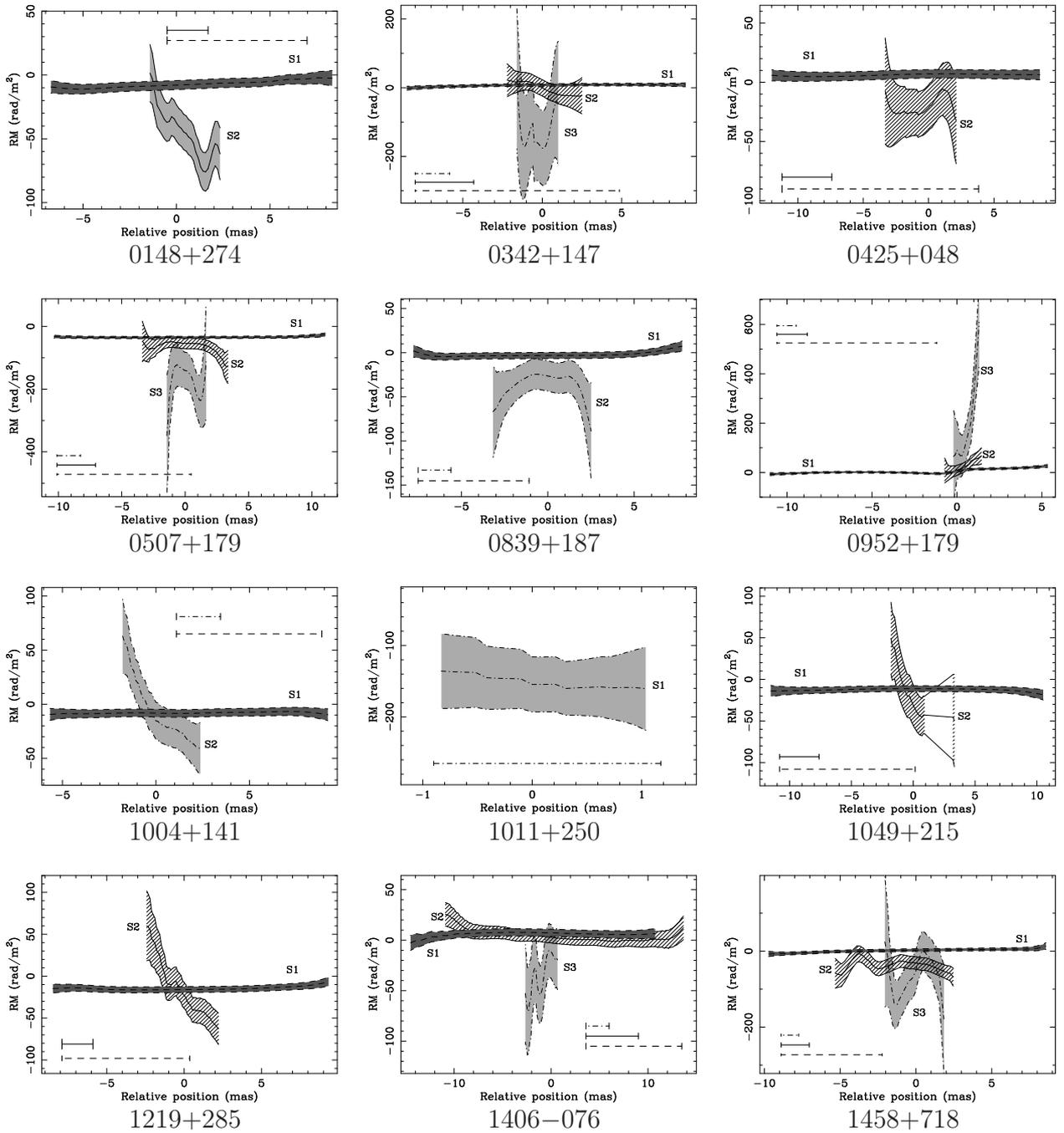


Рисунок 2.9 — Поперечные профили меры вращения в струях исследуемых активных ядер галактик по наблюдениям на VLBA. Прямые горизонтальные линии обозначают размер диаграммы направленности по половинной мощности вдоль направления поперечного среза. Имена источников даны под соответствующими им рисунками. По горизонтальной оси отложено расстояние вдоль среза (мсек дуги), по вертикальной оси – величина фарадеевского вращения (рад/м²). Результат диссертанта из работы [A4].

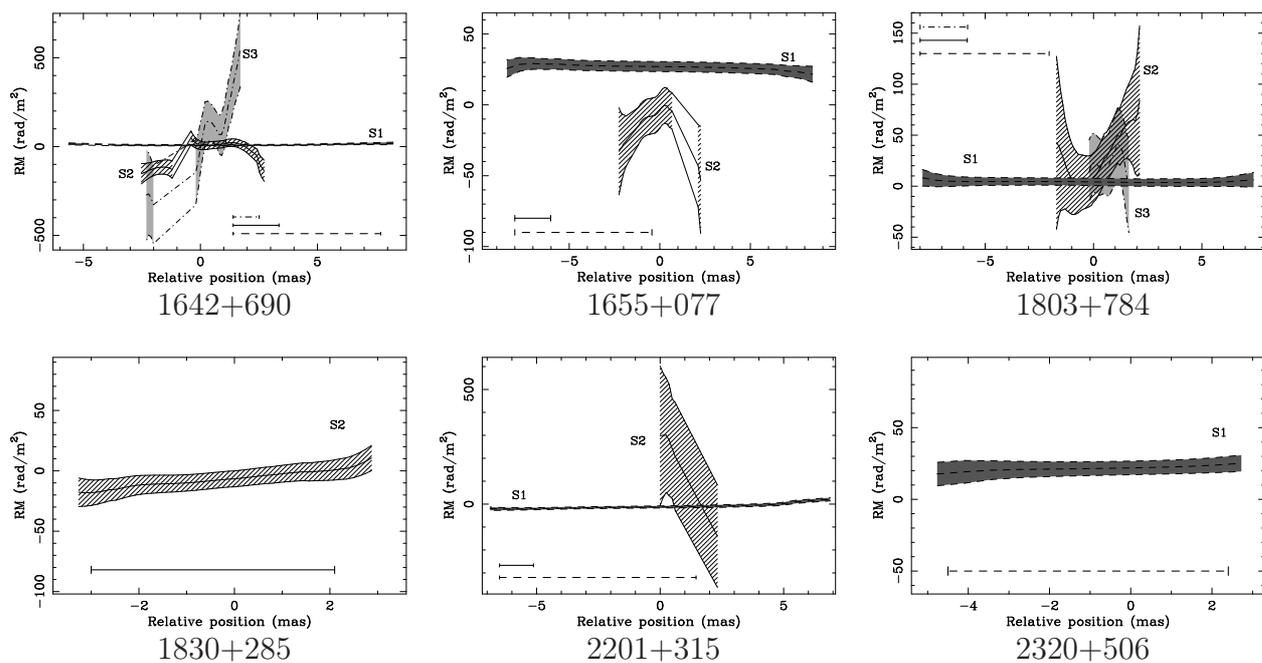


Рисунок 2.9 — Окончание.

ляется только относительными изменениями поляризационных углов [82; 131].

Моделирования Бродерика и МакКинни [117] показывают, что сложная структура струи в околоядерной области и эффекты поглощения могут быть причиной появления ложных градиентов МВ в этой области. В связи с этим анализ поперечных срезов МВ качественнее проводить на расстоянии от РСДБ ядра, большем чем размер одной диаграммы направленности на половине мощности интенсивности, т.е. в области оптически тонкого излучения струи. В связи с этим, а также с целью сравнительного анализа поперечных профилей МВ на разных частотах, все анализируемые ниже срезы МВ взяты в положении смоделированного оптически тонкого компонента струи, находящегося на значительном удалении от ядерной области.

Критерий оценки значимости градиента МВ включал два этапа. Во-первых, профиль МВ вдоль среза аппроксимировался линейной зависимостью (два параметра определялись в процессе подгонки). Если параметр наклона линии отличался от нуля в пределах трех среднеквадратичных отклонений, тогда проводился следующий этап анализа. Для этого в тот же профиль МВ вписывалась постоянная линия, равная средневзвешенному значению МВ вдоль среза. Если величина критерия подгонки χ^2 превышала теоретическое значение для заданного количества степеней свободы, то поперечный градиент МВ считался значимым. Количество степеней свободы в этом случае рассчитывалось как количество пикселей вдоль среза минус два (параметры подгонки). Из-за то-

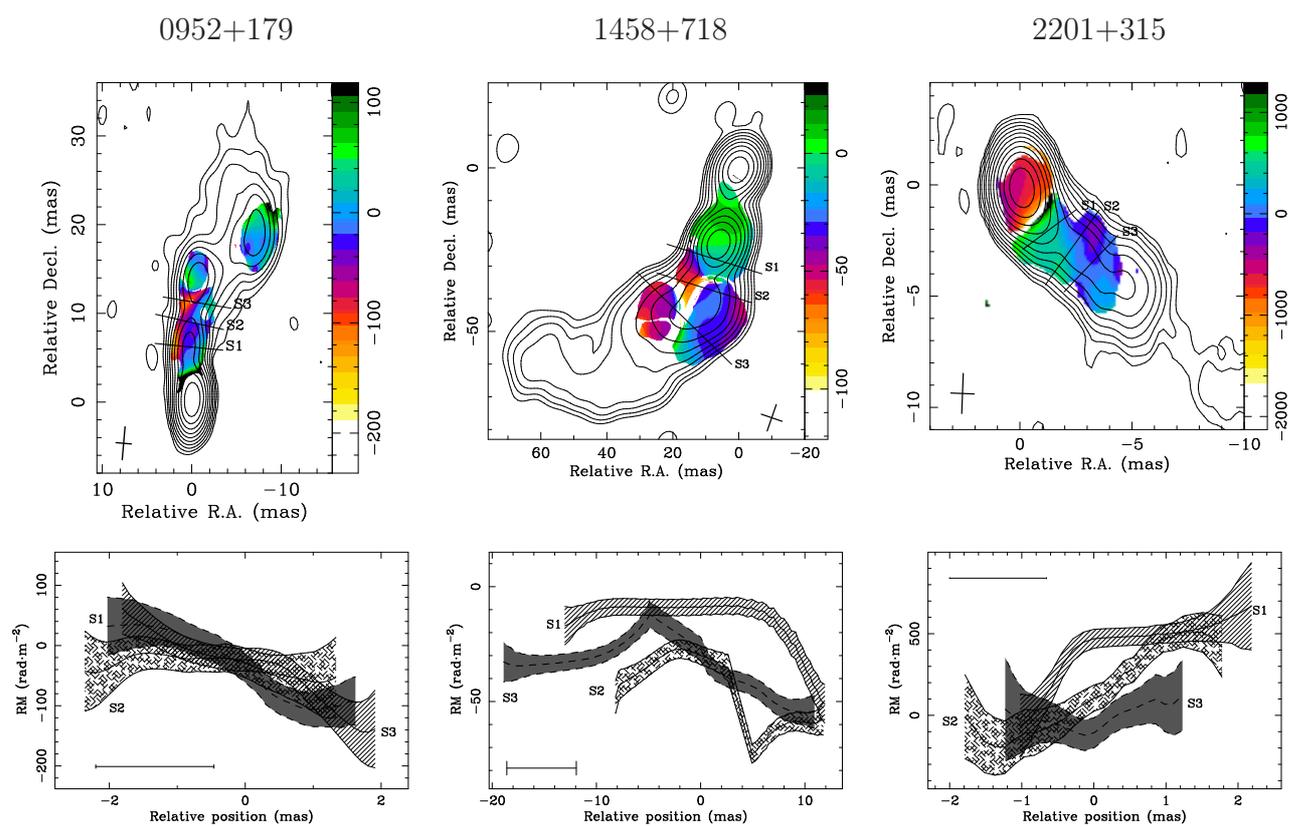


Рисунок 2.10 — Карты фарадеевского вращения и поперечные срезы мер вращения в квазарах 0952+179 (4.6–8.4 ГГц), 1458+718 (1.4–2.4 ГГц) и 2201+315 (8.1–15.4 ГГц) по наблюдениям на телескопе VLBA. Срезы совмещены относительно положения хребтовой линии выброса. По горизонтальной оси отложено расстояние вдоль среза (мсек дуги), по вертикальной оси — величина фарадеевского вращения ($\text{рад}/\text{м}^2$). Результат диссертанта из работы [A4].

Таблица 2.6 — Значимые поперечные градиенты мер вращения в проекте VLBA «BK134». Результат диссертанта из работы [A4].

Источник	Назв.	Диапоз. (ГГц)	RM ₁ (рад/м ²)	RM ₂ (рад/м ²)	|\Delta RM| (рад/м ²)	Значимость	Ширина (ДН)
Срезы в положении смоделированного оптически тонкого компонента							
0148+274	S2	4.6–15.4	1±22	-62±20	63±30	2.1σ	1.7
0952+179	S1	1.4–2.4	-8±6	26±6	34±8	4.1σ	2.3
	S3	8.1–15.4	65±192	610±177	545±261	2.1σ	1.3
1004+141	S2	4.6–8.4	63±35	-41±24	104±42	2.5σ	1.8
1219+285	S2	4.6–15.4	60±42	-63±19	123±46	2.7σ	2.3
1642+690	S2	4.6–8.4	-153±57	-135±59	17±82	2.9σ ¹	2.7
	S3	8.1–15.4	-272±258	554±216	826±336	2.5σ	3.6
2201+315	S1	1.4–2.4	-20±7	21±7	41±10	4.1σ	1.7
Срезы в других местах струй							
0952+179	S1	4.6–8.4	62±43	-139±64	200±77	2.6σ	1.7
	S3	4.6–8.4	32±49	-92±40	124±63	2.0σ	1.8
1458+718	S1	1.4–2.4	-17±8	-51±8	34±12	2.9σ	6.7
	S2	1.4–2.4	-27±7	-72±7	45±10	4.5σ ¹	6.7
	S3	1.4–2.4	-12±9	-54±7	42±11	3.7σ ¹	6.9
2201+315	S1	8.1–15.4	-64±195	668±267	732±330	2.2σ	1.3

Примечание – ¹ – изменение величины меры вращения вдоль среза происходит скачкообразно.

го, что соседние пиксели на картах параметров Стокса I , Q и U зависимы, а используемые средние значения шумов по карте распределены на них неравномерно, критерий χ^2 в таком случае является только качественной оценкой значимости. Моделирования, такие как выполненные в работах Ховатты и др. [82] или Альгабы [84], могут быть использованы для более аккуратного расчета статистической значимости градиента.

Нами также использованы предложения других авторов [117; 147] для оценки критерия значимости градиентов МВ, $|\Delta \text{RM}|$. В этом случае рассматривается величина, равная разнице величин мер вращения на краях среза RM_1 и RM_2 (или экстремальных значений МВ вдоль среза), деленная на среднеквадратичную сумму ошибок этих величин МВ. Значимость критериев, определенная этим методом и двухэтапным подходом, описанным выше, отличается, поскольку ошибки определения меры вращения на краях струй всегда больше из-за меньшего значения сигнал/шум. В то время как в центре среза МВ ошибки значительно меньше.

2.6.3 Результаты наблюдений

Всего для 18 источников выборки (два объекта 0610+260 и 1845+797 исключены из-за отсутствия значимого поляризационного потока) было построено 43 карты фарадеевского вращения, подробнее о которых изложено в §2.5.3. Поперечные профили мер вращения в положении смоделированной оптически тонкой детали струи могут быть построены только по 41 карте. Три из анализируемых срезов МВ имеют ширину меньше одной диаграммы направленности по уровню половинной мощности, девять срезов имеют ширину примерно 1.5 HPBW, в то время как остальные срезы разрешают струю поперек (больше 1.5 HPBW). Моделирования, выполненные Махмуд и др. [131], показывают, что реальные градиенты МВ для случаев с высоким отношением сигнал-шум могут быть обнаружены даже если поперечный срез МВ составляет долю диаграммы направленности. В связи с этим мы рассматривали все срезы фарадеевского вращения.

На рисунке 2.9 показаны поперечные срезы в исследуемых источниках. Значимые градиенты были обнаружены в 6 источниках (8 срезов из 41): 0148+274, 0952+179, 1004+141, 1219+285, 1642+690 и 2201+315, в том числе одновременно в нескольких рассмотренных частотных диапазонах. В трех источниках градиенты мер вращения были обнаружены в других областях джета, нежели указанный выше компонент выброса: 0952+179, 1458+718 и 2201+315. Карты фарадеевского вращения в этих источниках и обсуждаемые срезы даны на рисунке 2.10. Таблица 2.6 суммирует результаты по всем источникам с измеренными значительными поперечными градиентами МВ.

Мера вращения в квазарах 1458+718 и 1642+690 изменяется скачкообразно вдоль среза. Единственный найденный нами пример источника с похожим поперечным профилем – квазар 3C 454.3, исследованный Ховаттой и др. [82] и Заманинасабом и др. [144]. Наиболее вероятно, что существование спиралевидного поля в струе квазара ответственно за такую форму градиента МВ. Сложно сказать, какая причина вызывает сложную форму поперечного профиля МВ в источниках 1458+718 и 1642+690, тем не менее в §3.4 показано, что оба источника проявляют свойства наличия спиралевидного поля в их струях.

В половине случаев значимых поперечных градиентов не происходит изменения знака величины фарадеевского вдоль среза (например, 0148+274, 1458+718). Такое поведение может объясняться изменением физических условий в этой области струи (любой из параметров или комбинация n_e , B_{\parallel} , dl). При этом не обязательно существование спиралевидного поля, меняющего свое направле-

ние в плоскости проекции струи на небо. Чтобы сказать точнее, что вызывает такую форму градиентов, требуются дополнительный анализ, как, например, временная переменность EVPA и MB в области градиента, изучение спектрального индекса и поля скоростей струи. Наземно-космические радиоинтерферометрические наблюдения также представляют уникальную возможность изучать распределение фарадеевского вещества в струях АЯГ и наблюдать спиралевидные магнитные поля [15].

Таким образом в семи из восемнадцати исследуемых источников обнаружены поперечные градиенты меры вращения, что говорит о неоднородности фарадеевского экрана и об изменениях физических свойств струйных выбросов АЯГ.

2.7 Большие величины фарадеевского вращения и синтез фарадеевских мер вращения

В этом параграфе представлены результаты обработки наблюдений Галактического центра, поставленных и проведенных сотрудником Северо-Западного университета (шт. Иллинойс, США) Фархадом Юсеф-Задэ в 2014 г., в рамках проекта «VLA/13A-130» (код наблюдений «SE0824F») на телескопе VLA на частотах 40–48 ГГц. Автор работы не принимал участия в наблюдениях, а участвовал в обработке данных, анализе, обсуждении и подготовке статьи. Содержание данного параграфа следует работе [A2].

2.7.1 Увеличение фарадеевского вращения при приближении к центру АЯГ

Результаты §2.3–2.5 показывают, что величина фарадеевского вращения систематически увеличивается вдоль по струе, по мере приближения к центральной ЧД АЯГ. При этом, проявляемый эффект выражен при наблюдении источников на более высоких частотах. Эти выводы подтверждаются работами других авторов (например, [111; 148; 149]). Такая зависимость объясняется эффектом синхротронного самопоглощения в основании релятивистских струй [95; 150; 151], в результате чего короткие длины волн видят излучение, исходящее из областей, находящихся ближе к центру АЯГ. Основное объяснение этому наблюдательному эффекту основано на предположении о существовании сильных, упорядоченных магнитных полей [23; 152; 153] и более плотных областей, находящихся в центральных областях АЯГ (например, область широких эмиссионных линий).

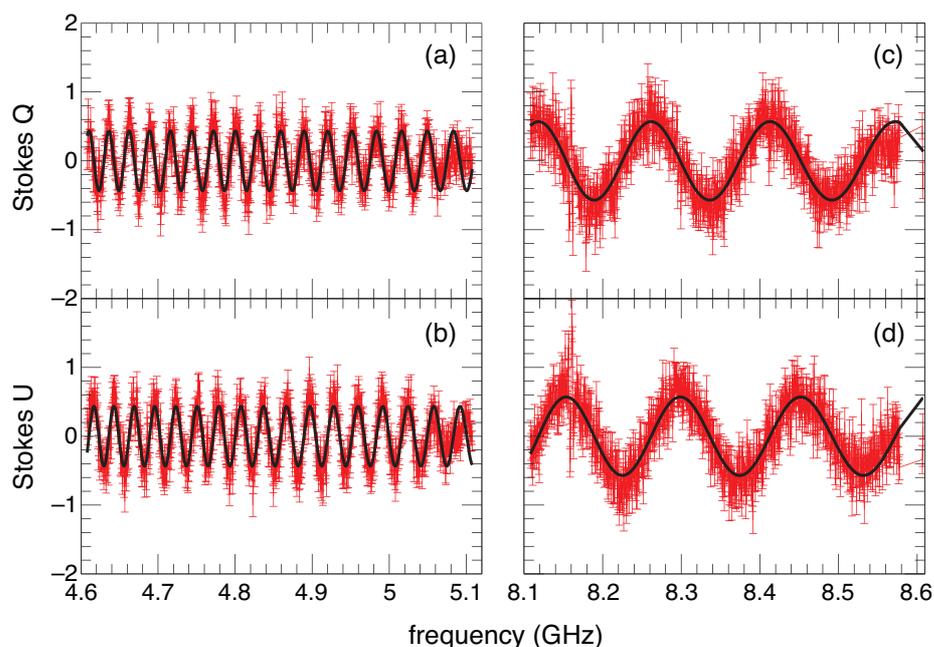


Рисунок 2.11 — Частотная зависимость параметров Стокса Q (верхний ряд) и U (нижний ряд) для магнетара J1745–2900 на частотах 4.85 (панель слева) и 8.35 (панель справа) ГГц в наблюдениях телескопом в Эффельсберге. Черные кривые представляют результат применения синтеза фарадеевских мер вращения. По горизонтальной оси отложена частота (ГГц), по вертикальной оси – поляризационный поток в Стоксах Q и U (отн. ед.). Рисунок взят из работы Итоф и др. [21].

Теоретические модели предсказывают величины полей $\sim 10^2$ – 10^4 Гс [5; 24; 25] в рамках формирования струй механизмом Блэндфорда-Знаека [152]. Наблюдаемые величины полей ~ 1 Гс на расстоянии ~ 1 пк от сверхмассивной черной дыры [20] подтверждают эти выкладки. Более того часть синхротронного излучения может генерироваться не электронами, а релятивистскими протонами. Такая модель с более «тяжелыми» струями АЯГ объясняет некоторые наблюдательные проявления, которые сложно объяснить в рамках электрон-позитронного состава джетов. Одно из таких проявлений – высокие яркостные температуры в ядрах АЯГ, видимые наземно-космическим телескопом Радио-Астрон (например, [12]). Наличие протонов в струйных выбросах требует существования экстремально больших магнитных полей ($\sim 10^6$ Гс). Модель когерентного излучения частиц (например, [17]) также привлекается к анализу наблюдаемых свойств АЯГ. Эта модель предполагает существование еще больших магнитных полей ($\sim 10^9$ Гс). Таким образом регистрация экстремально больших фарадеевских вращений позволила бы существенно продвинуться в вопросе состава и механизма излучения релятивистских выбросов АЯГ.

Поля величиной 1 Гс могут вызывать вращение плоскости поляризации волны в среде плотностью 10 см^{-3} и толщиной 0.1 пк около 10^6 рад/м². Единый

механизм формирования струйных выбросов в сверхмассивных ЧД [154] совместно с изложенными выше предпосылками наличия сильных магнитных полей предполагают существование областей с большими ($\sim 10^6$ рад/м²) и экстремально большими ($\sim 10^7$ рад/м²) мерами вращения во многих АЯГ. К настоящему моменту, наличие таких областей подтверждено только в нескольких источниках, наблюдения которых выполнены преимущественно на мм и субмм длинах волн (данные МВ приведены в системе наблюдателя):

- Стрелец А*: $RM = -(4.3 \pm 0.1) \times 10^5$ рад/м² на 1–400 ГГц, [21];
- радиогалактика 3C 84: $RM \approx (8.7 \pm 2.3) \times 10^5$ рад/м² в диапазоне 224–342 ГГц, [86];
- квазар PKS 1830–21: $RM \approx (9.4 \pm 0.4) \times 10^6$ рад/м² на частоте 300 ГГц, [26];
- Сейфертовская радиогалактика 1637+574: $RM = (4.2 \pm 1.2) \times 10^5$ рад/м² в диапазоне 8–253 ГГц, [123];
- квазар СТА 102: $RM = -(3.44 \pm 0.01) \times 10^4$ рад/м² на частотах 43–350 ГГц, [130].

Такие величины МВ проявляются в наблюдениях существенно нелинейным поведением поляризационного потока с длиной волны, имеющее выраженный осциллирующий характер (см. пример для PSR J1745–2900 на рисунке 2.11). В связи с этим, поиск и исследования таких сигналов требует использование новых методик анализа, таких как синтез фарадеевской меры вращения [87; 88] и фарадеевский синтез [89], и проведение широкополосных поляриметрических наблюдений. С целью поиска больших и экстремально больших МВ в струях АЯГ, нами опробован, отработан и применен метода синтеза фарадеевской меры вращения к наблюдениям Галактического магнетара PSR J1745–2900 [155; 156]. Результаты этих исследований изложены ниже.

2.7.2 Метод синтеза фарадеевской меры вращения

Метод синтеза фарадеевской меры вращения основан на Фурье преобразовании поляризационного сигнала в пространстве λ^2 и последующей реконструкции фарадеевского спектра мер вращения $F(\phi)$ (также называемой фарадеевской функцией дисперсии, [67]). Спектр МВ, $\bar{F}(\phi)$, может быть определен из

наблюдений как

$$\bar{F}(\phi) = F(\phi) * R(\phi) = K \int_{-\infty}^{+\infty} pIe^{2i\chi} e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2, \quad (2.7)$$

где $pIe^{2i\chi}$ – комплексная поляризация, K – нормировочный коэффициент, $F(\phi)$ – фарадеевский спектр для заданной глубины ϕ . Передаточная функция меры вращения (*англ.* Rotation Measure Transfer Function, [88]) телескопа $R(\phi)$ определяется как

$$R(\phi) = K \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (2.8)$$

и характеризуется спектральными свойствами инструмента. В том числе, полуширина $R(\phi)$ на половине максимума, деленная на удвоенное произведение сигнал/шум, характеризует точность определения величины фарадеевского вращения. Нормализовочный коэффициент K определяется частотной настройкой телескопа для определенных наблюдений и шумами измерений в виде:

$$K = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \omega d\lambda^2 \right)^{-1}, \quad (2.9)$$

где ω – весовая функция или функция сэмпирования, равная нулю для $\lambda^2 < 0$ и отличная от нуля для всех λ^2 , для которых есть измерения. Величина ω в каждом измерении равна обратному квадрату среднеквадратичного значения шума.

Таким образом, восстановление спектра МВ происходит по всем возможным фарадеевским глубинам. При этом, максимальная величина МВ, ϕ_{max} , определяется шириной спектрального канала, $\delta\lambda^2$, как $\phi_{max} \approx \sqrt{(3)}/\delta\lambda^2$. Метод синтеза фарадеевских мер вращения имеет ряд преимуществ перед линейной аппроксимацией спектра. Среди прочих, это высокая эффективность выделения любого периодического сигнала в пространстве λ^2 (в том числе, с переменной амплитудой и фазой), сигналов с несколькими мерами вращения и поиск очень больших мер вращения. Более того, метод позволяет разрешать поляризационную структуру неразрешенного источника.

2.7.3 Магнетар J1745–2900

Методика синтеза фарадеевских мер вращения была опробована на наблюдениях Галактического магнетара PSR J1745–2900. Выбор этого источника обусловлен близким расположением к центру Галактики [157; 158], являющимся

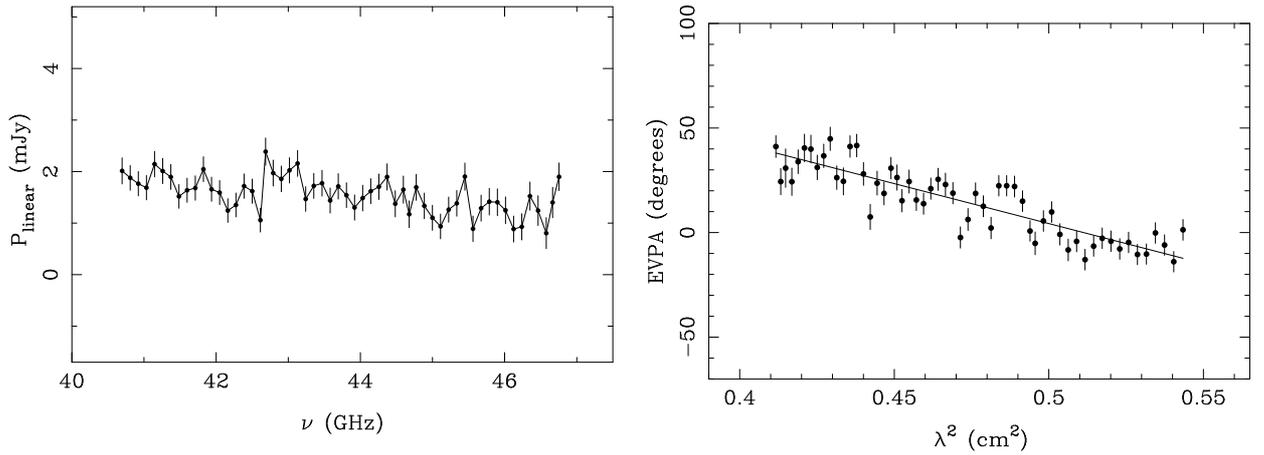


Рисунок 2.12 — Панель слева: зависимость линейной поляризации от частоты для PSR J1745–2900 по наблюдениям на VLA. По горизонтальной оси отложена частота (ГГц), по вертикальной оси – плотность поляризационного потока (мЯн/луч). Панель справа: зависимость поляризационного угла от квадрата длины волны для PSR J1745–2900 по наблюдениям на VLA. По горизонтальной оси отложен квадрат длины волны (см^2), по вертикальной оси – EVPA (град.). Совместный результат диссертанта из работы [A2].

одним из рекорсменов среди космических объектов по величине меры вращения. Сложная структура замагниченного вещества, в котором находится магнетар, может потенциально производить еще более высокое вращение, нежели фарадеевский экран, создаваемый центром Галактики. Поляризационные свойства Стрельца A* и этого магнетара исследованы в широком диапазоне многими авторами (например, [90; 159; 160]). Это позволяет производить сравнение характеристик исследуемых объектов, получаемых различными методиками, в том числе синтезом фарадеевских MB и линейной аппроксимацией.

Наблюдения Галактического центра были выполнены антенной решеткой VLA (конфигурация «A») в 2014 г. Наблюдения проводились в течении 5 часов с использованием центральной частоты 44 ГГц. Полоса наблюдений составила 8192 МГц, и была поделена на 4096 спектральных каналов, каждый шириной 2 МГц. Обработка данных выполнена в пакете Obi в континуумной моде, т.е. отдельного выделения пульсирующего излучения PSR J1745–2900 не производилось. Инструментальная и поляризационная калибровка выполнена с использованием наблюдений квазаров 3C 286, J1733–1304 (NRAO 530) и J1744–3116 (PKS 1741–312). Точность амплитудной калибровки составила 5%, а ошибка измерения направления поляризационного угла 4.7. Размер диаграммы направленности на половине мощности потока по карте параметра Стокса I , размером $15' \times 15'$, составил $73'' \times 46''$ по прямому восхождению и склонению соответственно.

Для увеличения величины сигнал/шум, наблюдения были усреднены по нес-

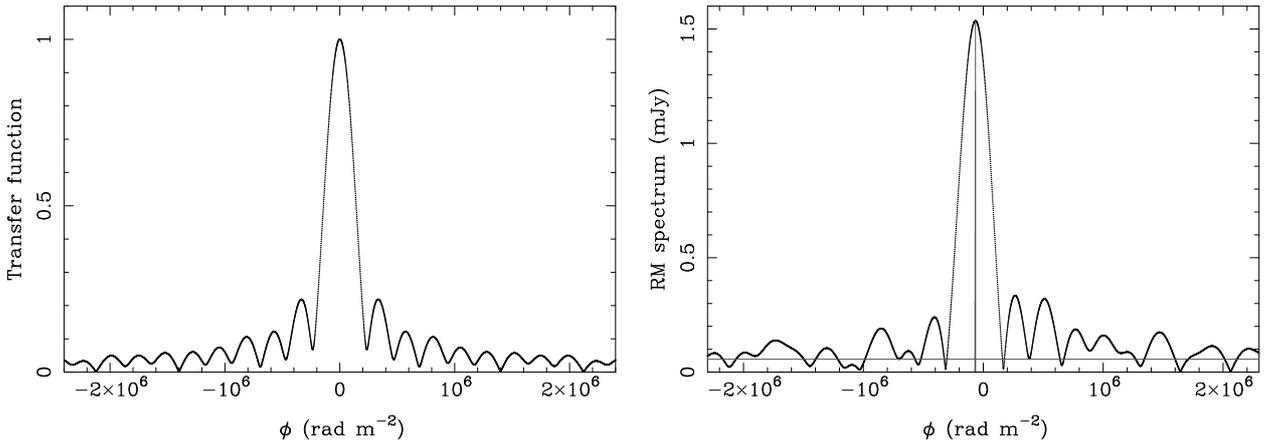


Рисунок 2.13 — Панель слева: передаточная функция меры вращения VLA на центральной частоте 44 ГГц со спектральным разрешением 34 МГц. Панель справа: фарадеевский спектр магнетара PSR J1745–2900 на центральной частоте 44 ГГц. По горизонтальной оси отложена мера вращения (рад/м²), по вертикальной оси – передаточная функция (отн. ед.) и поляризационный поток (мЯн). Результат диссертанта из работы [A2].

кольким спектральным каналам: (1) для линейной аппроксимации EVPA с λ^2 усреднены каждые 52 канала (спектральное разрешение 104 МГц), и для (2) применения синтеза фарадеевских МВ усреднены каждые 17 каналов (спектральное разрешение 34 МГц).

Измеренный поляризационный поток и направление поляризации магнетара J1745–2900, в том числе линейная регрессия EVPA с λ^2 , приведены на рисунке 2.12. Измеренное фарадеевское вращение таким способом составило $-(67000 \pm 3000)$ рад/м². Передаточная функция МВ проведенных наблюдений представлена на рисунке 2.13, на котором также представлен спектр фарадеевских мер вращения магнетара. Выделен только один компонент фарадеевского вращения, амплитуда которого превышает 3σ . Он соответствует $RM = -(67000 \pm 12000)$ рад/м².

Таким образом, успешная апробация метода синтеза фарадеевских мер вращения подтверждается результатами линейной регрессии. Более того, измеренные величины согласуются с результатами других авторов, выполненных на других частотах. Например, самое точное измерение МВ магнетара составляет $-(66960 \pm 50)$ рад/м² на частотах 4.85 и 8.35 ГГц [21].

2.8 Выводы

В текущей главе были исследованы свойства фарадеевского вращения и особенности его распределения вдоль релятивистских струй активных ядер галактик. Для этих целей было обработано и проанализировано четыре эксперимента,

выполненных на радиоинтерферометрах VLBA и VLA в различных частотных диапазонах, и исследованы свойства 31 объекта. При этом для всех источников измерения фарадеевского вращения и для 21 источника РСДБ карты фарадеевского вращения были получены впервые в соответствующем диапазоне длин волн. В итоге были получены следующие результаты:

1. Поляриметрические наблюдения компактных областей струй на более высоких частотах наблюдений эффективнее других исследований: они позволяют исследовать плотные фарадеевские экраны, которые из-за деполяризации излучения не доступны в наблюдениях на более низких длинах волн, а также разрешают мелкомасштабную структуру струй и фарадеевских экранов, как видно на примере источников 3C 48 и 3C 138. Измеренные абсолютные величины фарадеевских мер вращения находятся в пределах от (1 ± 4) до (9671 ± 484) рад/м². При этом медианная величина меры вращения, приведенная в систему отсчета источников, составила ~ 1461 рад/м² в области видимого начала струйного выброса 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, соответственно. Максимальная мера вращения в системе покоя источника составила $(1.80 \pm 0.09) \times 10^4$ рад/м² в квазаре 3C 48. Вследствии очень маленького размера областей образования широких эмиссионных линий и их близкого расположения к центральной сверхмассивной черной дыре АЯГ, маловероятно, что вращение плоскости поляризации излучения происходит в этих областях. Вероятно, некоторая часть фарадеевского вращения рождается в областях образования узких эмиссионных линий, которые могут достигать несколько сотен парсек в размерах и иметь клочковатую структуру. Для этой области оценка напряженности магнитного поля составляет единицы–десятки микрогаусс при использовании измеренного нами фарадеевское вращения ≥ 1500 рад/м² в системе источника и в предположении плотности плазмы в этой области 10^3 см⁻³, объемного фактора заполнения 0.01 и размера ~ 100 пк.
2. Обнаружены градиенты фарадеевского вращения поперек струй впервые в семи квазарах: 0148+274, 0952+179, 1004+141, 1219+285, 1458+718, 1642+690 и 2201+315. В половине этих случаев поведение поперечных профилей фарадеевского вращения вдоль среза происходит с изменением знака и наблюдается на всем протяжении вдоль струи. Это является характерной особенностью спиралевидного магнитного поля, наличие которого предска-

зывается большинством теоретических и аналитических моделей активных ядер галактик. В остальных источниках изменение МВ вдоль среза может обуславливаться изменением напряженности магнитного поля, плотности или толщины фарадеевского экрана в отсутствии спиралевидных магнитных полей.

3. Показано наличие переменности фарадеевской меры вращения на масштабах месяцев и лет в шести активных ядрах галактик: DA 193, 0710+439, OI 061, 3C 138, 3C 279 и 1655+077. Скорости вещества в областях образования широких и узких эмиссионных линий (приблизительные скорости газа в которых составляют единицы-десятки тысяч км/с) не способны объяснить такую быструю временную переменность фарадеевского вращения. Наиболее вероятно, вариации фарадеевского вращения происходят в тепловой замагниченной плазме, располагающейся в непосредственной близости от областей генерации синхротронного излучения джета. Это может быть внешний слой или оболочка струи. Этот результат подтверждается выводами других авторов [136; 161], теоретическими моделями [162] и Монте-Карло моделированием [117; 121].
4. Распределение фарадеевской меры вращения по струйным выбросам АЯГ неоднородно и имеет тенденцию существенно увеличиваться в РСДБ ядрах. В то время как поляризационный угол ведет себя линейно с квадратом длины волны в оптически тонких деталях джета и средние значения мер вращения не превышают сотен рад/м², в околядерных областях вращение поляризационного угла увеличивается в сторону более коротких длин волн и величины мер вращения доходят до единиц и десятков тысяч рад/м² в системе наблюдателя.
5. Обнаруженное систематическое увеличение меры вращения в ядрах струй с увеличением частоты наблюдений (обсуждаемое в п. 4), вероятнее всего, объясняется увеличением напряженности магнитного поля и плотности плазмы по мере приближения к центральной машине АЯГ. При этом эффект синхротронного самопоглощения в ядерных областях приводит к тому, что более высокочастотное излучение выходит из областей струй, находящихся ближе к центральной машине АЯГ, а следовательно, с более экстремальными n_e и B . В предположении толщины фарадеевского экрана, близко расположенного к струе, приблизительно 0.1–1 пк и создаваемой им меры вращения 1500 рад/м² оценки напряженности магнитного поля и

плотности плазмы в положении начала струи, видимой на 15 ГГц, составляют 10–100 мГс и $1\text{--}10\text{ см}^{-3}$ соответственно, что согласуется с оценками, получаемыми другими методами.

6. Степенное увеличение меры вращения с частотой наблюдений в ядрах струй указывает на возможное существование очень плотных областей в близкой окрестности сверхмассивной черной дыры АЯГ, образующих фарадеевское вращение $10^5\text{--}10^8\text{ рад/м}^2$ в системе наблюдателя. Такие экстремально высокие величины мер вращения проявляются в наблюдениях сложной зависимостью поляризационного потока и угла с длиной волны, и требуют для анализа привлечения новых методик, таких как синтез фарадеевских мер вращения. С целью поиска больших и экстремально больших мер вращения в струях АЯГ, нами успешно опробован, отработан и применен этот метод к наблюдениям Галактического магнетара J1745–2900, мера вращения которого составила $-(6.7 \pm 0.3) \times 10^4\text{ рад/м}^2$.

Глава 3

Степень и направление линейной поляризации в струях активных ядер галактик

В данной главе рассмотрены свойства замагниченной плазмы и исследованы особенности конфигурации магнитных полей 20 активных ядер галактик на основе обработки и анализа данных наблюдений, выполненных на телескопе VLBA в 2007 г. Данная глава использует результаты параграфов 2.5 и 2.6, где исследовались свойства и особенности распределения фарадеевского вращения в струях этих объектов. Приведенные исследования основаны на анализе линейной поляризации. Изучение свойств круговой поляризации не вошло в цели и задачи этой работы. Результаты настоящей главы опубликованы в научном рецензируемом журнале из списка ВАК [А4] и в трудах конференций [В6; 10]

3.1 Деполяризация, фарадеевские эффекты и магнитные поля струйных выбросов АЯГ

Плазма и магнитные поля в окрестности релятивистских струй влияют на распространение излучения от джета к наблюдателю, вызывая различные поляризационные эффекты помимо фарадеевского вращения. Эти эффекты были описаны Берном еще в 1966 г. [67], а в 1998 г. Соколов и др. [34] представил более детальный анализ этих механизмов, расширив их список. Указанные эффекты сопровождаются нелинейным изменением величины и направления линейной поляризации с длиной волны, а именно деполяризацей. Такое поведение происходит из-за определенной конфигурации магнитных полей и сложной структуры фарадеевского экрана, который в некоторых случаях может занимать ту же пространственную область струи, в которой генерируется синхротронное

излучение. К основным эффектам относят (1) внутреннюю фарадеевскую деполаризацию (*англ.* internal Faraday depolarization), (2) внешнюю фарадеевскую деполаризацию (*англ.* external Faraday dispersion), (3) спектральную и (4) аномальную (обратную, *англ.* inverse) деполаризацию и/или реполаризацию. Мы обсуждаем эти эффекты ниже.

В §2.1 мера вращения была определена для случая внешнего фарадеевского экрана без деполаризации, задаваемая видом (2.1) (так называемые фарадеевски тонкие источники). Поляризационные механизмы, рассматриваемые в настоящем параграфе, затрагивают общие эффекты, в результате поляризационный угол может меняться по источнику нелинейно (фарадеевски толстые источники), в результате чего мера вращения становится функцией длины волны. При этом фарадеевская мера вращения все равно может быть определена выражением (2.2), если рассматриваются достаточно узкие интервалы длин волн $d(\lambda^2)$.

Внутренняя деполаризация имеет место, когда области образования излучения и фарадеевского вращения перемешаны. Она делится на дифференциальное фарадеевское вращение (*англ.* differential Faraday rotation) и внутреннюю фарадеевскую дисперсию (*англ.* internal Faraday dispersion). Дифференциальное вращение [67; 163] возникает, когда плоскость поляризации синхротронного излучения, генерируемого в среде с упорядоченными (регулярными) магнитными полями, испытывает разное фарадеевское вращение в разных областях источника. В результате, излучение выходящее с больших глубин, испытывает большее фарадеевское вращение, а интегральная степень поляризации по источнику уменьшается. При этом уменьшение степени поляризации с увеличением длины волны наблюдений имеет осциллирующий характер вида:

$$m = m_0 \frac{\sin R\lambda^2}{R\lambda^2} e^{2i(\chi_0 + \frac{1}{2}R\lambda^2)}, \quad (3.1)$$

а $EVPA - \lambda^2$ испытывает скачок в местах минимума степени поляризации. Здесь m_0 – внутренняя степень поляризации синхротронного излучения, R – внутренняя фарадеевская мера вращения источника, также называемая фарадеевской глубиной.

Внутренняя дисперсия также возникает в смешанных излучающих и фарадеевски вращающих средах, но магнитное поле в таком случае имеет хаотичную (или беспорядочную) ориентацию. В результате, плоскость поляризации излучения испытывает случайные флуктуации, а следовательно различное фарадеевское вращение, по мере распространения по этой среде. Степень поляризации в таком случае уменьшается с увеличением длины волны по следующему зако-

ну:

$$m = m_0 e^{2i\chi_0} \frac{1 - e^{2iR\lambda^2 - 2\sigma_{\text{RM}}^2 \lambda^4}}{2\sigma_{\text{RM}}^2 \lambda^4 - 2iR\lambda^2}, \quad (3.2)$$

где σ_{RM} – функция дисперсии хаотичной среды.

Внешняя фарадеевская деполяризация возникает на внешней замагниченной плазме (относительно области генерации излучения) за счет флуктуации ее свойств на масштабах, меньших диаграммы направленности [67; 164]. Отклонения магнитного поля от однородного и упорядоченного приводят к возникновению градиента меры вращения и деполяризации излучения. В случае хаотичных магнитных полей, деполяризация происходит из-за случайных флуктуаций направления поляризации, в то время как случайные флуктуации величины или направления упорядоченного поля приводят к такому же эффекту (также называется деполяризацией в диаграмме телескопа или «деполяризацией Берна»). Оба эффекта описываются одной зависимостью:

$$m = m_0 e^{2i(\chi_0 + RM\lambda^2)} e^{-2\sigma_{\text{RM}}^2 \lambda^4}, \quad (3.3)$$

где σ_{RM} – дисперсия МВ по источнику.

Триббл [164] заметил, что наблюдаемое спадание степени поляризации во многих источниках следует не экспоненциальной (3.3), а степенной зависимости, которая в общей форме может быть представлена как:

$$m = A\lambda^{-\beta}, \quad (3.4)$$

где A – коэффициент, зависящий от физических условий среды, β – поляризационный спектральный индекс. Эту форму деполяризации принято называть «моделью Триббла».

Наблюдения Россетти и др. [102] и Мантовани др. [101] показали, что степень поляризации может резко спадать на коротких длинах волн и оставаться постоянной на более длинных волнах. Они интерпретировали результаты неоднородным фарадеевским экраном, который частично покрывает источник и модифицировали данную выше зависимость в виде:

$$m = m_0 e^{2i(\chi_0 + RM\lambda^2)} (f_c e^{-2\sigma_{\text{RM}}^2 \lambda^4} + (1 - f_c)), \quad (3.5)$$

где f_c – коэффициент покрытия источника. Эту модель деполяризации часто называют «законом Россетти-Мантовани».

Спектральная деполяризация или реполяризация возникает при существовании нескольких неразрешенных компонентов струи [53] или компонентов с

разными фарадеевскими вращениями [97] в диаграмме направленности. В таком случае степень поляризации имеет осциллирующий характер, в том числе может быть больше на больших длинах волн.

Эффект значительной реполяризация излучения (увеличение величины поляризации с увеличением длины волны) называется аномальной [34] или обратной [165] деполяризацией, которая возникает в упорядоченных магнитных полях, систематически меняющих свое направление вдоль луча зрения. Подобная ситуация может происходить, например, в спиралевидных полях. В этом случае внутренний угол поляризованного излучения будет различным для различных областей источника.

Существует дополнительно механизм, в случае которого величина и угол линейной поляризации будут вести себя постоянно с длиной волны – это хорошо упорядоченное и, наоборот, хаотически направленное магнитные поля. При этом поведение степени поляризации будет следовать следующей зависимости [67]:

$$m = \frac{3 - 3\alpha}{5 - 3\alpha} \cdot \frac{B_u^2}{B_u^2 + B_r^2}, \quad (3.6)$$

где спектральный индекс α определен выражением (1.13), а B_u и B_r – упорядоченная и хаотическая компоненты магнитного поля соответственно.

Излучение в области РСДБ ядра может иметь более сложное поведение m и $EVPA$ с λ [166–168] в силу того, что оно частично непрозрачно в этой области. Для детального анализа таких областей требуются еще более широкополосные наблюдения.

Для того, чтобы определить, какой эффект имеет место в источнике, необходимы длинноволновые поляриметрические РСДБ наблюдения с высоким спектральным разрешением. Выделение фарадеевских компонентов вращения в этом случае эффективно выполнять с помощью фарадеевского синтеза мер вращения, и в дальнейшем использовать эти результаты для совместного моделирования параметров Стокса I , Q , U и $EVPA$, как, например, выполнено О’Салливан и др. [169].

После того, как фарадеевские эффекты учтены, можно восстанавливать внутреннюю ориентацию магнитных полей источников. Со времени первых измерений направления линейной поляризации внегалактических источников, в том числе активных ядер галактик, Гарднером и Вайтуоком в 1963 г. [69] было проведено многочисленное количество исследований. В том числе, это работы по поляриметрическому анализу АЯГ по наблюдениям в сантиметровом диапазоне с помощью VLBA (например, [11; 81]), а также с использованием дру-

гих телескопов в мм и суб-мм диапазонах [130; 132]. Тем не менее, единого мнения о структуре и свойствах магнитных полей релятивистских выбросов нет: некоторые авторы говорят о турбулентных полях [29; 170], упорядоченном широкомасштабном поле [30; 91], спиралевидных полях [141]. Более того, распределение направления поляризационного угла относительно направления распространения струи не имеет выраженной тенденции (см., например, [132]). Наличие вспышечной активности источника, распространение ударной волны по струе и формирование плазменных неустойчивостей влияют на изначальную геометрию магнитных полей в струях АЯГ. Все эти вопросы требуют детального изучения. С целью исследования характеристик поляризованного излучения и свойств магнитных полей релятивистских струй на парсекowych масштабах, нами проведен анализ 20 АЯГ посредством широкополосных поляриметрических РСДБ наблюдений.

3.2 Наблюдения и обработка данных

Особенности рассматриваемых активных ядер галактик описаны в §2.5.1, в то время как конфигурация наблюдений и описание обработки данных даны в §2.5.2. Качественный анализ поведения степени и направления поляризации проведен для двух смоделированных компонентов струй (см. §1.7): РСДБ ядра и яркой оптически тонкой детали струи. Вместе с этим скорректированные за фарадеевское вращение карты линейной поляризации построены по всем областям источника, в которых присутствует значимый поляризационный поток.

Для моделирования кривых $m-\lambda^2$ теоретическими зависимостями (см. §3.1) мы воспользовались подходом, предложенным Фарнсом и др. [35]. Он основан на нелинейной регрессии наблюдаемых зависимостей математическими функциями, которые воспроизводят λ^2 -зависимое поведение степени поляризации рассматриваемых поляризационных эффектов. Было использовано четыре функции: Гауссова функция, Гауссова функция с постоянной подложкой, две Гауссовы функции и полином, задающиеся следующими выражениями соответственно:

$$m = a_0 \exp \left[\frac{-(\lambda - a_1)^2}{2a_2} \right], \quad (3.7)$$

$$m = a_0 \exp \left[\frac{-(\lambda - a_1)^2}{2a_2} \right] + a_3, \quad (3.8)$$

$$m = a_0 \exp \left[\frac{-(\lambda - a_1)^2}{2a_2} \right] + a_3 \exp \left[\frac{-(\lambda - a_4)^2}{2a_5} \right], \quad (3.9)$$

$$m = a_0 \lambda^{a_1}. \quad (3.10)$$

Коэффициенты a_i определяются в процессе подгонки.

Для того, чтобы определить, какая из используемых функций (с разным количеством параметров k) лучше описывает наблюдательные данные, был использован Бейесовский информационный критерий (критерий Шварца, [171]), определяемый в виде:

$$\text{BIC} \approx -2\ln L + k\ln N, \quad (3.11)$$

где N – количество измерений и $\ln L$ – максимум функции правдоподобия $p(y|\theta)$:

$$L = \max(p(y|\theta)),$$

$$p(y|\theta) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(y_i - y_i^M(\theta))^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3.12)$$

где $y = \{y_1, \dots, y_N\}$ набор измерений с ошибками $\{\sigma_1, \dots, \sigma_N\}$, и $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_k\}$ параметры модельных функций, предсказывающих измерения $\{y_1^M(\theta), \dots, y_N^M(\theta)\}$. Преимущество этого критерия перед критерием согласия Пирсона [172] состоит в учете количества параметров, описывающих модельные функции. Модель, лучше описывающая наблюдательные данные, соответствует наименьшему значению критерия BIC.

Таблица 3.1 — Результаты моделирования наблюдаемых зависимостей $m - \lambda^2$ параметрическими функциями («Мод. функц.») и физическими моделями («Физ. механизм») и свойства линейной поляризации АЯГ проекта «ВК134». Результат диссертанта из работы [А4].

Источник	Мод. функц. в ядре	Физ. механизм в ядре	Мод. функц. в струе	Физ. механизм в струе	Град. МВ	Проявления спир. поля	EVPA в струе
0148+274	сложн.	неск. комп. ¹	сложн.	аномальн.	+	абберация	⊥
0342+147	(3.10)	Триббл	(3.10)	Триббл	–	...	⊥
0425+048	(3.10)	Берн	(3.7)	незнач. депол.	–	...	неизв.
0507+179	(3.9)	неск. комп.	(3.8)	Рос.-Мантов.	–	...	⊥
0610+260	...	...	(3.8)	Триббл	...	...	...
0839+187	(3.8)	Рос.-Мантов.	(3.7)	незнач. депол.	–	...	⊥
0952+179	сложн.	неск. комп.	(3.8)	Триббл	+	90° скачки	неизв.
1004+141	(3.8)	Рос.-Мантов.	(3.8)	Триббл	+	...	||
1011+250	...	...	(3.10)	Берн	–	...	⊥
1049+215	сложн.	неск. комп.	(3.7)	незнач. депол.	–	...	⊥
1219+285	сложн.	неск. комп. /аномальн.	(3.7)	незнач. депол.	+	...	неизв.
1406–076	(3.7)	Триббл	(3.7)	незнач. депол.	–	...	⊥
1458+718	(3.7)	неск. комп. /аномальн.	сложн.	аномальн.	+	сердц.-об.	⊥
1642+690	сложн.	неск. комп.	(3.8)	аномальн.	+	сердц.-об.	||
1655+077	(3.9)	неск. комп.	(3.8)	Триббл	–	...	||
1803+784	(3.10)	аномальн.	(3.8)	незнач. депол.	–	...	||
1830+285	...	...	(3.7)	Триббл	–	...	⊥
1845+797	...	...	...	...	...	...	...
2201+215	...	неизв.	(3.7)	Триббл	+	...	⊥
2320+506	(3.8)	Берн/Триббл	(3.10)	Триббл	–	абберация	⊥

Примечание – Описание физических моделей деполаризации дано в §3.1. Флаг «неизвестно» соответствует случаям, если ни одна из моделей не описывала наблюдательные данные. Сокращения: «Град. МВ» – градиент меры вращения, «неск. комп.» – несколько компонентов, «сердц.-об.» – структура «сердцевина-оболочка», «сложн.» – сложное поведение, «Рос.-Мантов.» – закон Россетти-Мантовани, «спир.» – спиралевидная форма поля, «незнач. депол.» – постоянная степень поляризации с длиной волны.

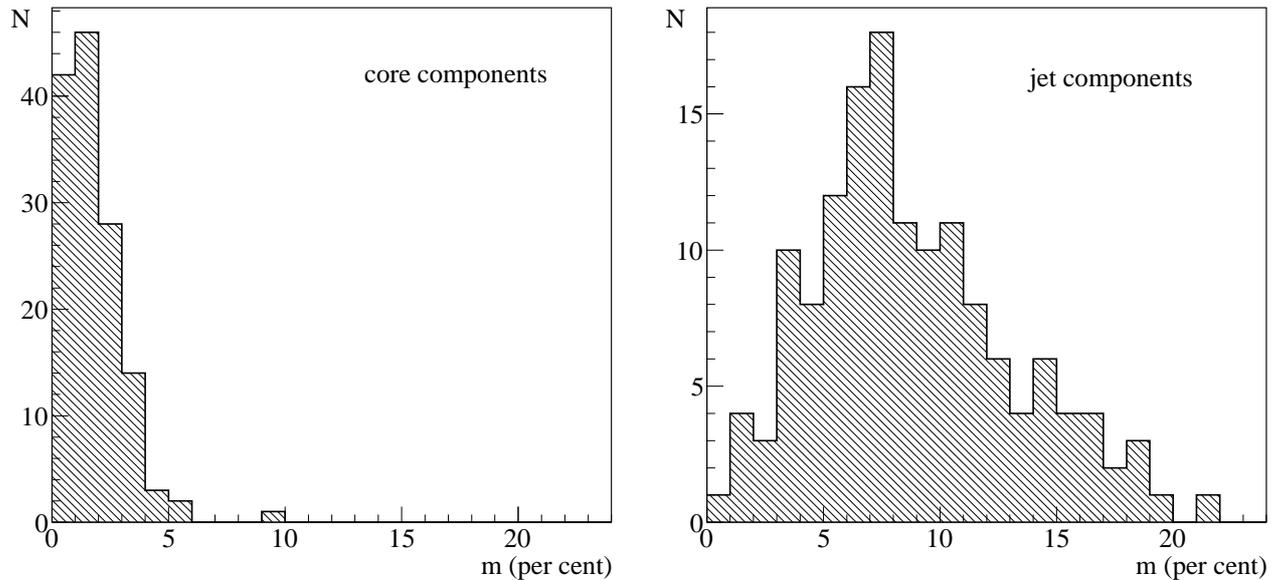


Рисунок 3.1 — Распределение степени линейной поляризации в ядрах с синхротронным самопоглощением (панель слева) и оптически прозрачных (панель справа) компонентах струй двадцати АЯГ в девяти частотных диапазонах. По горизонтальной оси отложена степень поляризации (проценты), по вертикальной оси – количество случаев (ед.). Результат диссертанта из работы [A4].

3.3 Результаты наблюдений: свойства и распределение линейной поляризации по струе

Распределение степени поляризации в ядрах и оптически прозрачных компонентах струй всех объектов показана на рисунке 3.1. Величина средней степени поляризации в ядрах составляет 1%, в то время как максимальное значение не превышает 8%. Эти величины хорошо согласуются с предсказаниями теоретических моделей для среды частично непрозрачной [166]. Средняя степень поляризации в оптически прозрачных компонентах струй составляет 8% и не превышает 25%, что значительно меньше величины, ожидаемой при наличии упорядоченного магнитного поля [163]. Наблюдаемые величины хорошо согласуются с измерениями, выполненными другими авторами (например, [11]). Вероятнее всего, низкая степень поляризации объясняется деполяризацией излучения на неоднородной плазме и наличием хаотично ориентированных магнитных полей (см. [121]).

Наблюдаемые зависимости степени поляризации с квадратом длины волны показаны на рисунке 3.2 для всех исследуемых АЯГ. Практически все компоненты источников демонстрируют сложное поведение. Результаты моделирования наблюдаемых величин параметрическими функциями (3.7)–(3.10) также представлены на рисунке 3.2 и даны в таблице 3.1. Большинство источников

(12 из 18) показывают уменьшение степени поляризации с увеличением длины волны. Вероятная причина такого поведения – неоднородный фарадеевский экран, описываемый моделями Берна, Триббла, Россетти-Мантованни, содержащий турбулентные, либо наоборот – упорядоченные поля, меняющие свое направление. Шесть исследуемых источников проявляют свойства аномальной деполяризации и увеличивают свою степень поляризации в сторону более длинных длин волн. В четырех источниках видно сложное, осциллирующее поведение $m - \lambda^2$, которое объясняется наличием нескольких компонентов струи или фарадеевского вращения, видимых на 15 ГГц картах параметра Стокса I и картах фарадеевского вращения более высокого разрешения.

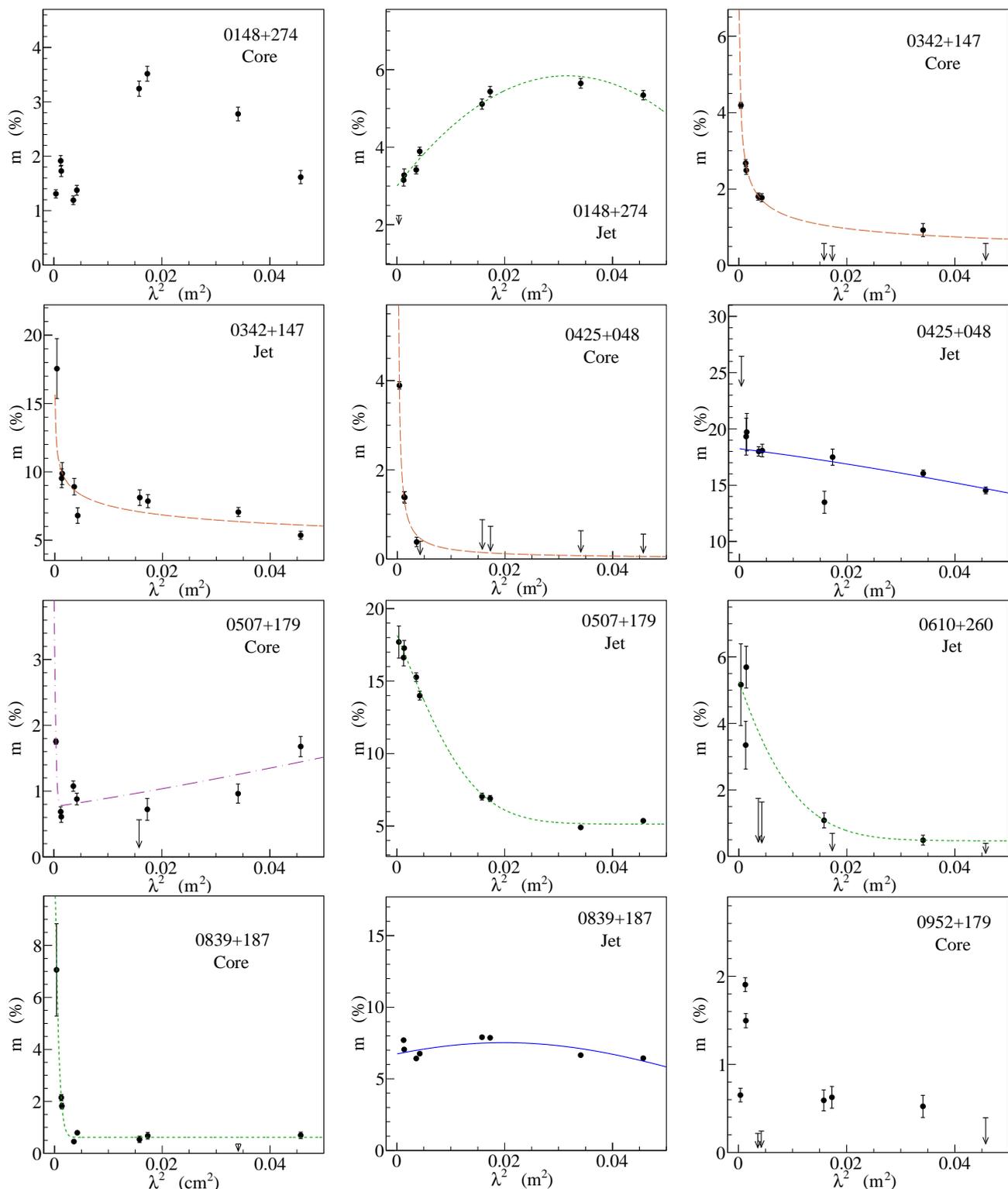


Рисунок 3.2 — Зависимость степени линейной поляризации от квадрата длины волны в ядрах с синхротронным самопоглощением («core») и оптически прозрачных («jet») компонентах струй исследуемых АЯГ. Верхние пределы показаны на уровне 3σ . По горизонтальной оси отложен квадрат длины волны (см^2), по вертикальной оси — степень линейной поляризации (проценты). Модельные функции, аппроксимирующие данные, показаны следующими цветами: синий — Гауссова функция, зеленый — Гауссова функция с подложкой, фиолетовый — две Гауссовы функции, коричневый — полином. Результат диссертанта из работы [A4].

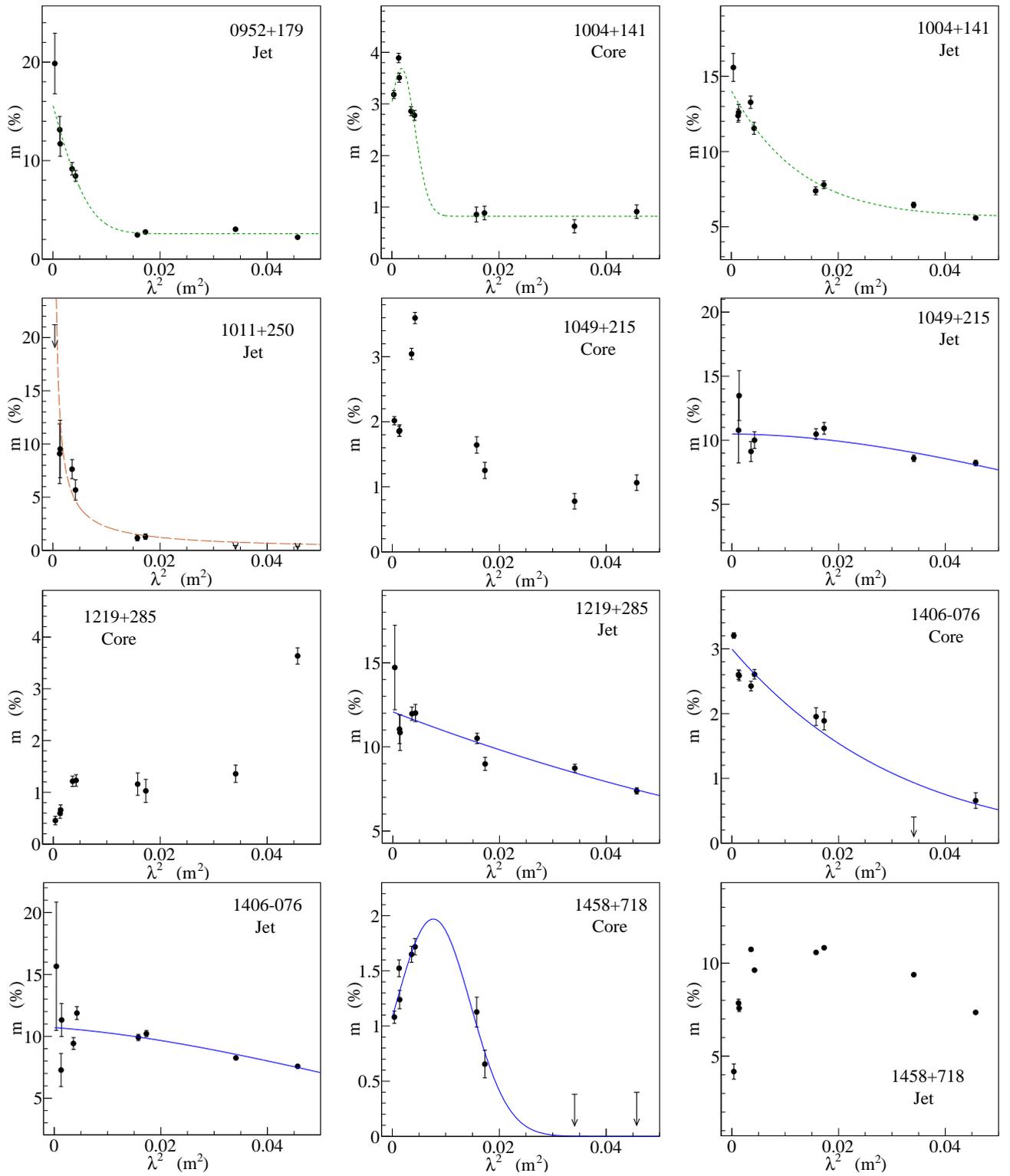


Рисунок 3.2 — Продолжение.

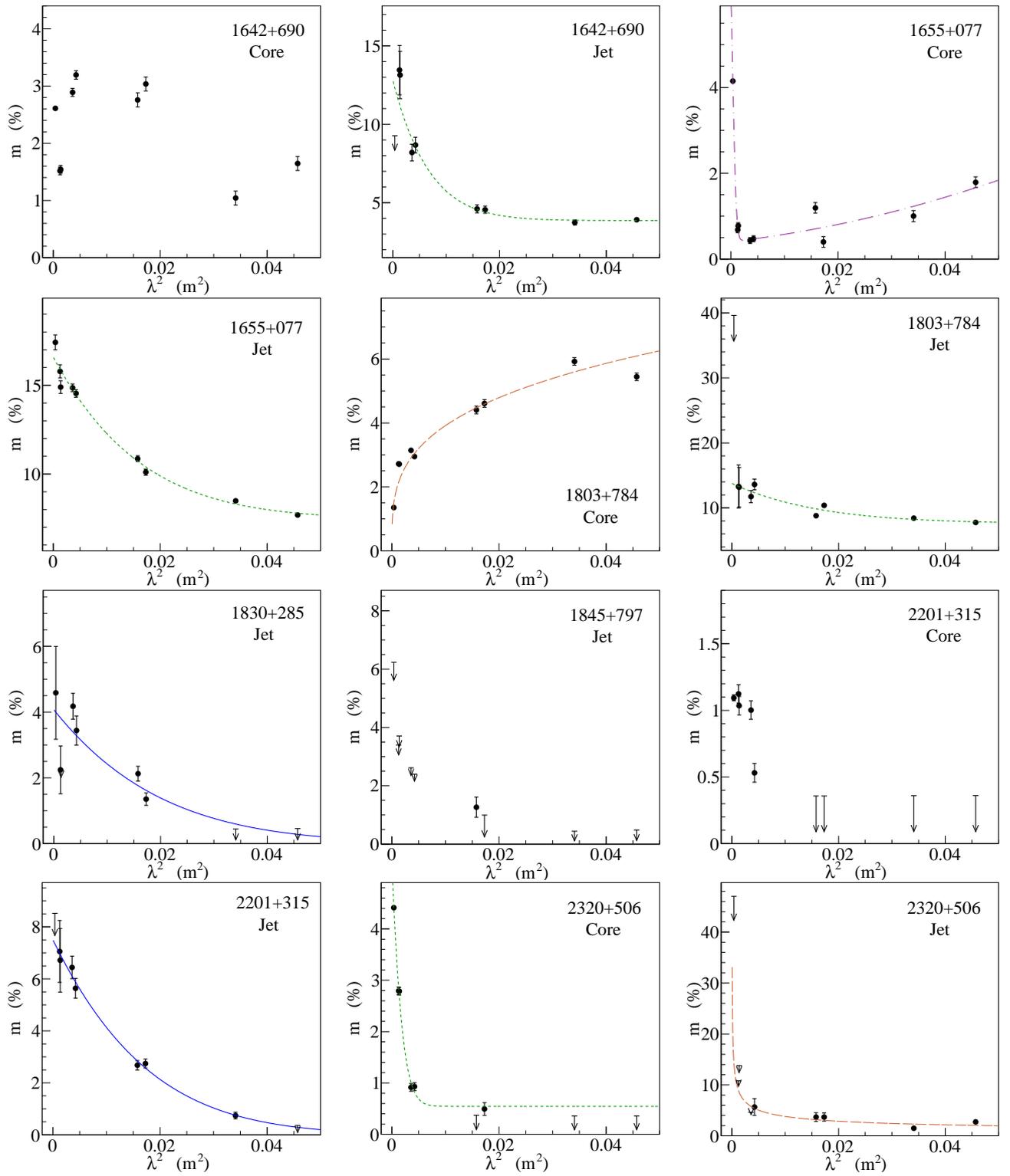


Рисунок 3.2 — Окончание.

Перечисленные выше наблюдаемые эффекты сопровождаются линейным поведением поляризационного угла в оптически тонких компонентах источников во всем наблюдаемом диапазоне частот (см. §2.5.3). Это указывает на простое фарадеевское вращение на внешней замагниченной плазме. В то же время ядра показывают более сложное поведение, ожидаемое в случае наличия внутреннего фарадеевского вращения.

3.4 Результаты наблюдений: Поляризационная структура струй

3.4.1 Ядра и оптически прозрачные компоненты струйных выбросов

Для анализа ориентации электрического поля, наблюдаемого в источниках в положении смоделированных компонентов струй, был рассмотрен угол EVPA, скорректированный за фарадеевское вращение, χ_0 , относительно направления распространения струи в плоскости изображения, θ . Позиционный угол джета в каждой точке при этом определялся касательной к хребтовой линии, определенной по методике, описанной в параграфе 2.6.2. Результирующая абсолютная разница углов, $|\chi_0 - \theta|$, полученная с использованием всех частот, в которых определена MB, для ядра и оптически тонкой детали выброса представлена на рисунке 3.3 и суммирована в таблице 3.2 (ошибка измерений разницы углов составляет $\sim 10^\circ$).

Магнитное поле ориентировано перпендикулярно электрическому полю для оптически прозрачного излучения, в то время как ориентации полей совпадают в областях с оптической толщиной $\tau \gg 1$ [173]. В релятивистски движущейся плазме эти соотношения между ориентацией полей немного изменяются [31]. Радиоядра соответствуют поверхности фотосферы $\tau \approx 1$, то есть они частично прозрачны. Вероятнее всего, относительная ориентация направлений электрического и магнитного полей в этих областях ведет себя таким же образом, что и в оптически прозрачных областях. То есть ориентация полей ортогональная.

Из рисунка 3.3 видно, что 55% компонентов струй (ядра и оптически тонкие детали) имеют сонаправленную или поперечную ориентацию истинного EVPA относительно направления распространения струи в плоскости изображения ($|\chi_0 - \theta| \approx 0^\circ, 90^\circ$). То есть общее распределение $|\chi_0 - \theta|$ имеет слабо выраженное бимодальное распределение, ожидаемое в рамках теоретических моделей осесимметричных струй АЯГ [31; 174–176], когда EVPA может иметь только две

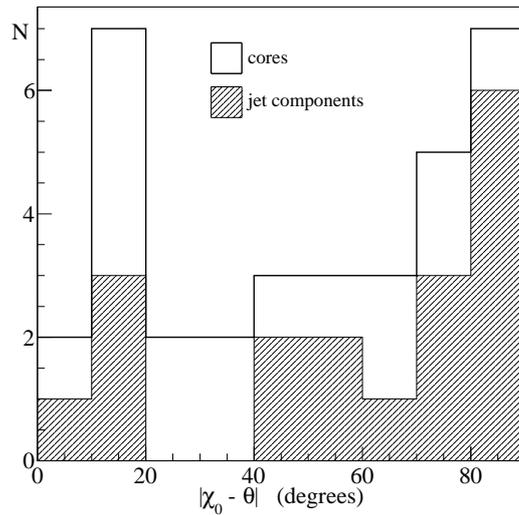


Рисунок 3.3 — Распределение разницы между направлением распространения струи и направлением вектора линейной поляризации в ядрах (белый цвет) и оптически тонких (штриховая заливка) компонентах струй 18 АЯГ. По горизонтальной оси отложена разница углов (градусы), по вертикальной оси – количество отсчетов (ед.). Результат диссертанта из работы [А4].

ориентации: сонаправленно и перпендикулярно направлению распространения струи. Вместе с тем в остальных 45% случаев истинный EVPA ориентирован под произвольным углом относительно направления распространения выброса (т.е. $|\chi_0 - \theta| \not\approx 0^\circ, 90^\circ$). Аналогичные этим результаты были получены в рамках других исследований, например [11; 82; 132; 177]. Наблюдаемое отличие от предсказаний теории может объясняться рядом причин, например, наклонными ударными волнами или плазменными неустойчивостями, суперпозицией нескольких неразрешенных компонентов струи в диаграмме телескопа, недочтенное фарадеевское вращение, хаотично ориентированное магнитное поле или несимметричность струйных выбросов, когда в определенный момент высвечивается только часть джета. В параграфе 3.4.3 приведено обсуждение наличия этих эффектов в каждом источнике.

3.4.2 Карты EVPA

Карты распределения ориентации и величины линейной поляризации, скорректированной за фарадеевское вращение, в исследуемых струях АЯГ, показаны на рисунке 3.4 в исследуемом диапазоне частот 1.4–15.4 ГГц. Изображения источников на более низких частотах совмещены с положением смоделированной оптически прозрачной детали струи на 15 ГГц по склонению, в то время как сдвиг по прямому восхождению произвольный. Это выполнено для прямого сравнительного анализа изображений источника на разных частотах: оптиче-

Таблица 3.2 — Разница между ориентацией EVPA в ядре, χ_0^{core} , и оптически тонком компоненте, χ_0^{jet} , и направлением распространения струи в плоскости изображения, θ . Приведенные величины соответствуют медианным значениям, полученным по всем частотам. Графическое представление этой таблицы дано на рисунке 3.3. Результат диссертанта из работы [A4].

Источники	$|\chi_0^{\text{core}} - \theta|$ (град.)	$|\chi_0^{\text{jet}} - \theta|$ (град.)
0148+274	15	81
0342+147	18	75
0425+048	37	41
0507+179	72	61
0610+260	–	–
0839+187	82	85
0952+179	65	15
1004+141	40	13
1011+250	–	86
1049+215	48	51
1219+285	18	83
1406–076	67	87
1458+718	3	87
1642+690	71	45
1655+077	27	4
1803+784	15	15
1830+285	–	77
1845+797	–	–
2201+315	55	78
2302+506	27	55

ски тонкое излучение выходит из одних и тех же областей струи на разных частотах, в то время как положение частично оптически непрозрачных ядер сдвигается вверх по струе с увеличением частоты наблюдений за счет эффекта синхротронного самопоглощения.

В большинстве исследуемых источников наблюдается простая поляризационная структура в области оптически тонкого синхротронного излучения, проявляемая в сохранении ориентации истинных векторов линейной поляризации во всем исследуемом интервале длин волн. Это связано с внешним вращением на тонком фарадеевском экране. Ядра показывают более сложную структуру, что предсказуемо, поскольку частоты исследуемого диапазона отличаются на порядок, а эффект видимого сдвига начала струи значителен в рассматриваемых источниках.

Источники проявляют следующие поляризационные свойства вдоль реляти-

вистских струй:

- существование несколько неразрешенных фарадеевских компонентов, дающих осциллирующее поведение $EVPA-\lambda^2$;
- скачки $EVPA$ на 90° при смещении вдоль струи, которые могут быть вызваны изменением направления распространения струи, взаимодействием выброса с окружающей средой или наличием ударных волн в джете и др.;
- структура «сердцевина-оболочка», при которой ориентация $EVPA$ на краях и в центре струи отличается на 90° ;
- наклон поляризационного угла относительно направления распространения джета на угол, отличный от 0° и 90° , в области начала релятивистского выброса, возможная причина которого – вспышечная активность источника, сопровождаемая вбросом плазмы и появлением нового компонента струи.

В следующем параграфе каждый источник рассмотрен более детально, в том числе приведено обсуждение того, какие перечисленные выше механизмы деполяризации представлены в отдельных струях АЯГ.

3.4.3 Комментарии по отдельным источникам

Обсуждение, приведенное в этом параграфе, основано на спектральном поведении степени поляризации (рисунок 3.2) и поляризационного угла (рисунок 2.7), поперечных профилях меры вращения (рисунок 2.9), и скорректированных за фарадеевское вращение картах ориентации позиционного угла и величины линейной поляризации (рисунок 3.4).

0148+274. Степень поляризации струи источника не превышает 6% и показывает сложное поведение с квадратом длины волны как в ядре, так и оптически тонком компоненте. Такое поведение в ядре выброса может возникать из-за суперпозиции двух компонент МВ в этой области, видимой на зависимости $m - \lambda^2$ и карте меры вращения в диапазоне 4.6–15.4 ГГц, или двух компонентов струи с разными поляризационными потоками, видимой на картах распределения линейной поляризации вдоль струи АЯГ. При этом горбатое поведение $m - \lambda^2$ в области оптически тонкого компонента очень близко к зависимости, предсказываемой моделью обратной или аномальной деполяризации [34; 165]. В дополнении к этому виден значительный градиент МВ (в диапазоне 4.6–15.4 ГГц) поперек струи источника. Эти два факта являются независимыми

указаниями на наличие спиралевидного поля в фарадеевском экране 0148+274. Скорректированный EVPA совпадает с направлением распространения струи в ядре, в то время как ориентирован перпендикулярно ниже по выбросу. Наиболее вероятно, что полоидальная компонента магнитного поля доминирует в струе 0148+274.

0342+147. Степень поляризации в ядре и оптически тонком компоненте струи объекта спадает степенным образом с λ^2 согласно модели деполяризации Триббла на внешнем фарадеевском экране. Поперечные срезы МВ чуть меньше 1.5 HPBW во всех трех частотных под-диапазонах, и не показывают значительных градиентов. Высокая степень поляризации ($\sim 15\%$) и поперечная ориентация EVPA в оптически тонком компоненте струи может являться указателем на существование ударной волны в этом месте (см., например, [176]). Скорректированный EVPA соответствует доминированию полоидальной компоненте магнитного поля в струе АЯГ. Все вместе поляризационные свойства 0342+147 могут объясняться и хаотически ориентированным и упорядоченным, ориентированным вдоль струи, магнитным полем как в окружающем замагниченном веществе, так и в самой струе источника.

0425+048 (OF 42). Отсутствие значимого поляризационного потока на низких частотах и оценка МВ приблизительно несколько сотен рад/м² в ядре АЯГ может объясняться большим внутренним фарадеевским вращением в этой области. Степень поляризации в оптически тонком компоненте слабо спадает с ростом длины волны, а поперечные профили МВ не показывают знаков градиента. Направление скорректированного поляризационного угла перпендикулярно направлению выброса в ядре, и не имеет выраженной ориентации вдоль по струе: в то время как на расстоянии 10 мсек дуги от ядра EVPA направлен под углом 40° к струе, в положении смоделированного компонента (~ 20 мсек дуги) этот угол поворачивается на примерно 90°. В этом месте струя АЯГ искривляется, однако МВ не изменяется. В связи с этим маловероятно, что струя взаимодействует с окружающим ее веществом или ее изгиб обусловлен распространением плазменных неустойчивостей. Таким образом, сложно сказать что-то определенное о свойствах магнитного поля в струе 0425+048, вероятно, оно в значительной степени определяется хаотичной компонентой.

0507+179. Степень поляризации в ядре струйного выброса не превышает 2% и увеличивается в сторону низких частот, при этом максимально зарегистрированная величина m в этой области составляет 11% [123] на частотах 80–253 ГГц. Большое фарадеевское вращение, видимое на более коротких длинах волн, может являться причиной деполяризации ядерной области на более

низких частотах. Поведение $m - \lambda^2$ в области оптически тонкого излучения согласуется с деполяризацией на неоднородном внешнем экране. Поперечные профили МВ шире 1.5 HPBW и не показывают наличия значимых градиентов. Скорректированные за фарадеевское вращение карты EVPA согласуются с полоидальным магнитным полем в струе АЯГ, при этом не исключено, что вклад хаотического магнитного поля существенен.

0610+260 (3C 154). Это АЯГ имеет слабую линейную поляризацию в большинстве частотных диапазонов, в связи с чем не представляется возможным провести анализ его характеристик.

0839+187. В то время как поведение степени поляризации в ядре АЯГ следует модели деполяризации на внешнем неоднородном экране (закон Россетти-Мантовани), EVPA имеет нелинейное поведение с квадратом длины волны и увеличивает свой наклон в сторону более коротких длин волн. Несмотря на то, что струя разрешена поперек, она не демонстрирует значимого градиента МВ. Зависимость $m - \lambda^2$ в оптически тонкой детали струи постоянна, и имеет среднюю величину $\sim 8\%$. В то время как доминирующее магнитное поле в веществе, ответственном за фарадеевское вращение, может быть как упорядоченным, так и хаотическим, карты EVPA показывают, что поле в «сердцевине» струи скорее определяется продольной компонентой.

0952+179. РСДБ ядро источника слабо поляризовано ($< 2\%$) и имеет сложный поляризационный спектр. Вероятнее всего такое поведение на низких частотах обусловлено компонентом, располагающимся ниже по струе и имеющим определяющий линейный поток (т.н. модель спектрального реполяризатора, [53]). При этом деполяризация ядра возможна из-за большого фарадеевского вращающего, видимого на более коротких длинах волн, равного $-(16900 \pm 300)$ рад/м² в системе источника. В оптически тонком компоненте струи m спадает с λ^2 , однако EVPA испытывает скачек в 40° между 2.4 и 4.6 ГГц. Дифференциальное фарадеевское вращение или аномальная деполяризация в регулярных магнитных полях могут объяснить такое поляризационное поведение. Скорректированные за МВ карты EVPA согласуются по всем частотным диапазонам в этой области, что подтверждает предположение о внутреннем фарадеевском вращении. Более того, струя 0952+179 показывает наличие значимых поперечных градиентов МВ в положении смоделированного компонента, а в диапазоне 4.6–8.4 ГГц градиент сохраняется на протяжении 10 мсек дуги от ядра вдоль по струе. Поведение скорректированного EVPA меняется сложно вдоль струи: поляризационный угол сохраняет поперечную ориентацию к направлению распространения во всех областях, кроме местоположения смоделированного компонента.

делированной оптически тонкой детали джета, в которой ориентация EVPA меняется на ортогональную. Вероятно, в этом месте струя взаимодействует с окружающей средой (видимое уярчение поляризованного потока), вследствие чего джет искривляется (см. [178]). Поперечная ориентация EVPA согласуется с продольным магнитным полем в струе источника.

1004+141. Степень поляризации в обеих моделированных компонентах описывается функцией Гаусса с подложкой, что свойственно внешнему фарадеевскому экрану, частично покрывающему струю АЯГ. Поперечный срез МВ показывает градиент со значимостью 2.5σ и изменением знака. Скорректированный EVPA сохраняет продольную ориентацию к направлению распространения струи на всем ее протяжении (около 20 мсек дуги). Эти характеристики могут указывать на наличие спиралевидного магнитного поля в струе источника.

1011+250. Струя этого АЯГ имеет значительную линейную поляризацию только в области оптически тонкого синхротронного излучения и степенным образом спадает с квадратом длины волны. Ориентация EVPA, скорректированная за фарадеевское вращение, предполагает наличие полоидального магнитного поля в выбросе.

1049+215. Поляризационный спектр в ядре струи этого источника ведет себя сложным образом, что скорее всего вызвано суперпозицией двух компонентов выброса с различными поляризационными свойствами в этой области. Наличие такой сложной структуры видно на картах, полученных на более коротких длинах волн (рисунок 3.4). При этом m слабо меняется с λ^2 в местоположении оптически тонкого компонента. Скорректированный поляризационный угол меняется сложным образом вдоль по струе. Вероятно, турбулентное магнитное поле преобладает в струе этого АЯГ. Анализ кинематики струй Листера и др. [125] показывает наличие неподвижного компонента в районе 2 мсек дуги в струе АЯГ. Наличие ударной волны в этом месте объяснило бы проявляемые поляризационные и кинематические свойства 1049+215, в том числе 90° поворот EVPA и возвращение его к поперечной ориентации по мере удаления от ядра.

1219+285 (W Comae). Спектральные поляризационные свойства ядра струи имеют сложный характер. Возможно, это связано с наличием нескольких неразрешенных компонентов в этой области, или сложном характере деполяризации: степень поляризации на низких частотах существенно выше потока на более коротких длинах волн. Это может быть признаком аномальной деполяризации, возникающей в регулярных магнитных полях. Медленный спад m в оптически тонкой области струи согласуется с этим предположением, хотя хаотично ори-

ентированное магнитное поле также возможно. Значимый поперечный градиент меры вращения виден в струе на более коротких длинах волн (см. рисунок 2.9). Габузда и др. [169] также зарегистрировала градиент МВ в струе 1219+285 в наблюдениях, выполненных в апреле 1997 г. Такая временная стабильность градиента фарадеевского вращения является индикатором наличия регулярно спиралевидного магнитного поля во внешних слоях струи источника. Скорректированные карты EVPA на высоких частотах указывают на полоидальное магнитное поле во внутренней области выброса АЯГ. При этом в районе 8 мсек дуги от РСДБ ядра струя делает поворот, а поляризационный угол становится сонаправленным со струей. Возможно, из-за малого изменения угла наклона к лучу зрения становятся видны внешние слои струи, имеющие доминирующую тороидальную компоненту магнитного поля.

1406–076. Степень поляризации в ядре и оптически тонкой детали струи АЯГ медленно спадает с квадратом длины волны. Вероятно, это обусловлено либо хаотичным, либо регулярным магнитным полем. Скорректированный за фарадеевское вращение EVPA ориентирован под углом 67° в ядре и поворачивается на 90° ниже по струе. Такое поведение, скорее всего, вызвано изменением оптической толщи. Однако, движение сгустка или возмущения по струе также может являться причиной такого поведения EVPA. Тем не менее, эта конфигурация согласуется с наличием полоидального магнитного поля в струе.

1458+718 (3C 309.1). Спектральная зависимость степени поляризации в ядре и оптически тонком компоненте имеет выраженную горбатую форму. Если такое поведение в ядре может объясняться комбинацией нескольких компонентов струи, то маловероятно, что в оптически тонкой области струи этот эффект имеет место. В свою очередь наличие спиралевидного поля в струйном выбросе этого источника может объяснить зависимость $m - \lambda^2$ в обоих компонентах. Поперечный срез МВ на частотах 1.4–2.4 ГГц показывает наличие градиента на всем протяжении струи, в то время как на более высоких частотах этого градиента не видно. Скорректированные за фарадеевское вращение карты EVPA ориентированы поперек струи на протяжении 30 мсек дуги. Ниже 30 мсек дуги по струе поляризационная структура сменяется на форму «сердцевина-оболочка»: в центре джета доминирует тороидальная компонента магнитного поля, а по его краям поле вытянуто преимущественно вдоль направления течения плазмы. Такая сложная структура ранее наблюдалась, например, в источнике 1652+398 (Mrk 501, [141]). Более того, кинематика компонентов струй этих АЯГ очень похожа [125]. Если предположить, что выброс 1458+718 действительно имеет поляризационную структуру «сердцевина-оболочка», тогда наблюдаемую сме-

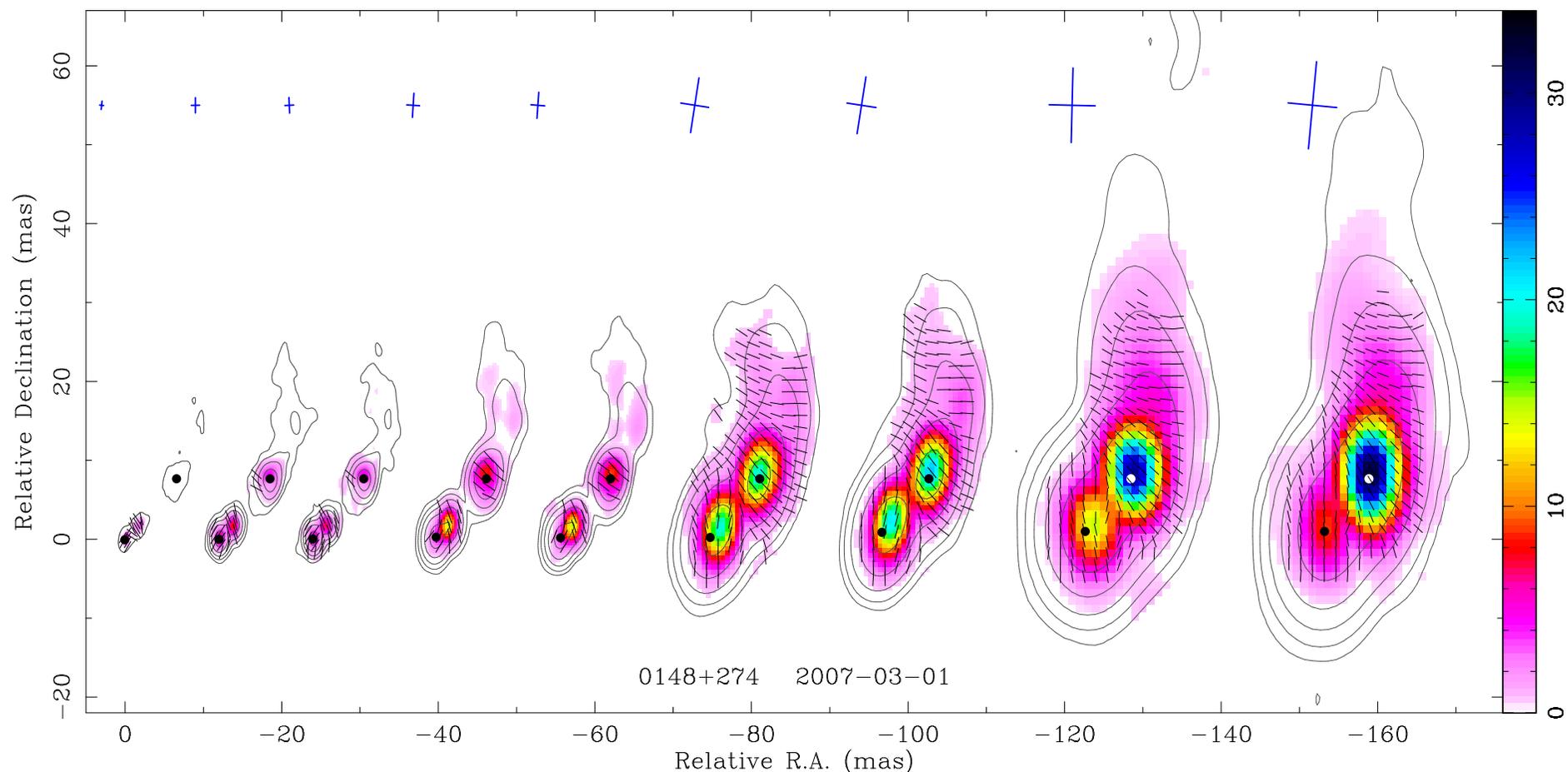


Рисунок 3.4 — Карты ориентации и величины линейной поляризации, скорректированные за фарадеевское вращение, в квазаре 0148+274 в диапазоне 1.4–15.4 ГГц. По горизонтальной оси отложено относительное прямое восхождение (мсек дуги), по вертикальной оси – относительное склонение (мсек дуги). Ядро и оптически тонкая деталь струи показаны черными или белыми точками для простоты восприятия. Ядро расположено на относительной координате в нуле по прямому восхождению или склонению, при этом ядро на самой высокой частоте диапазона имеет координаты (0,0). Цветовая схема линейно поляризованной интенсивности дана в мЯн/луч. Синтезированная диаграмма направленности по половинной мощности показана крестиками. Красные звездочки рядом указывают на отсутствие коррекции вектора линейной поляризации за фарадеевское вращение (*англ.* not Corrected for Faraday RM). Результат диссертанта из работы [A4].

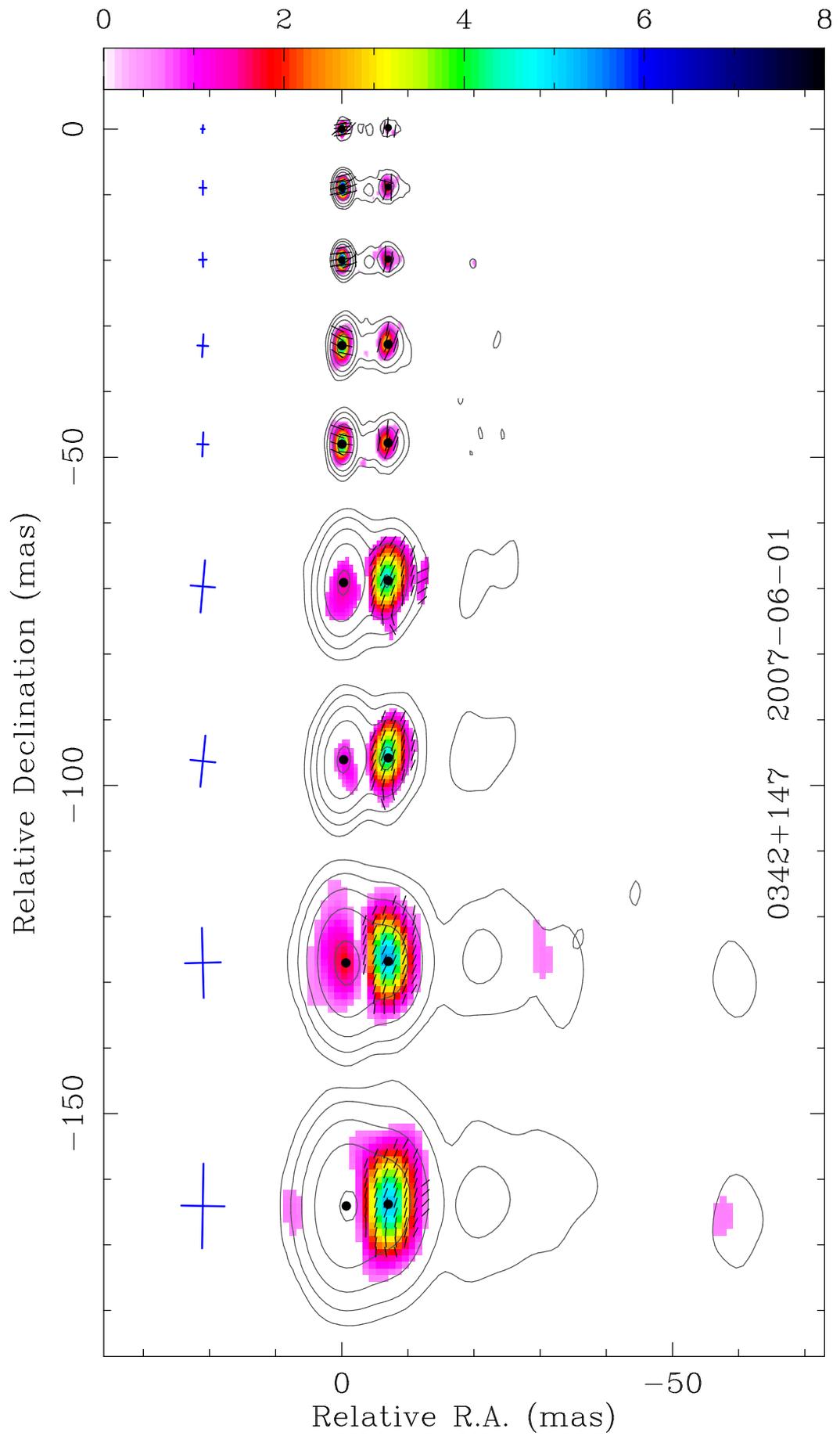


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 0342+147.

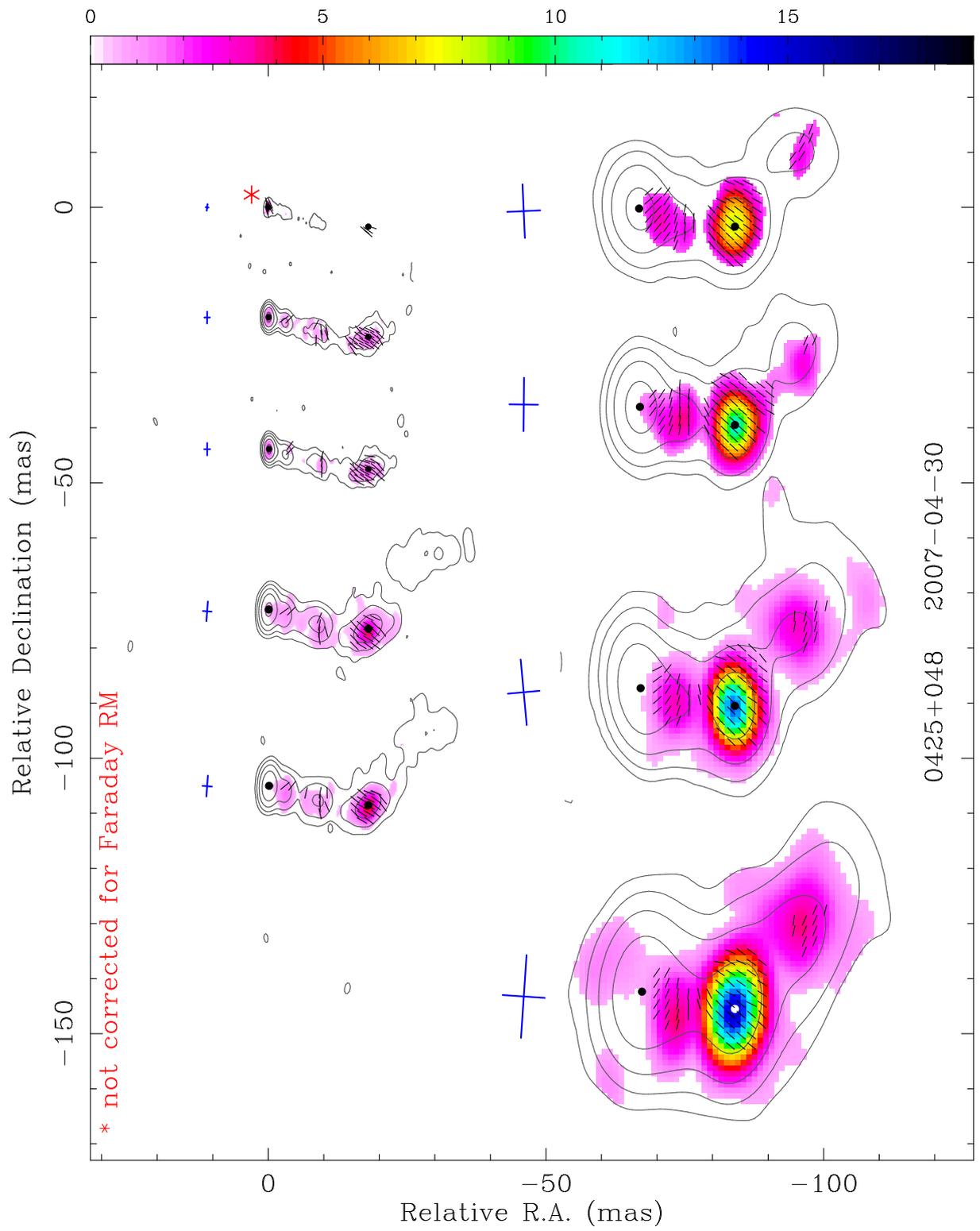


Рисунок 3.4 — Продолжение. Активное ядро галактики 0425+048.

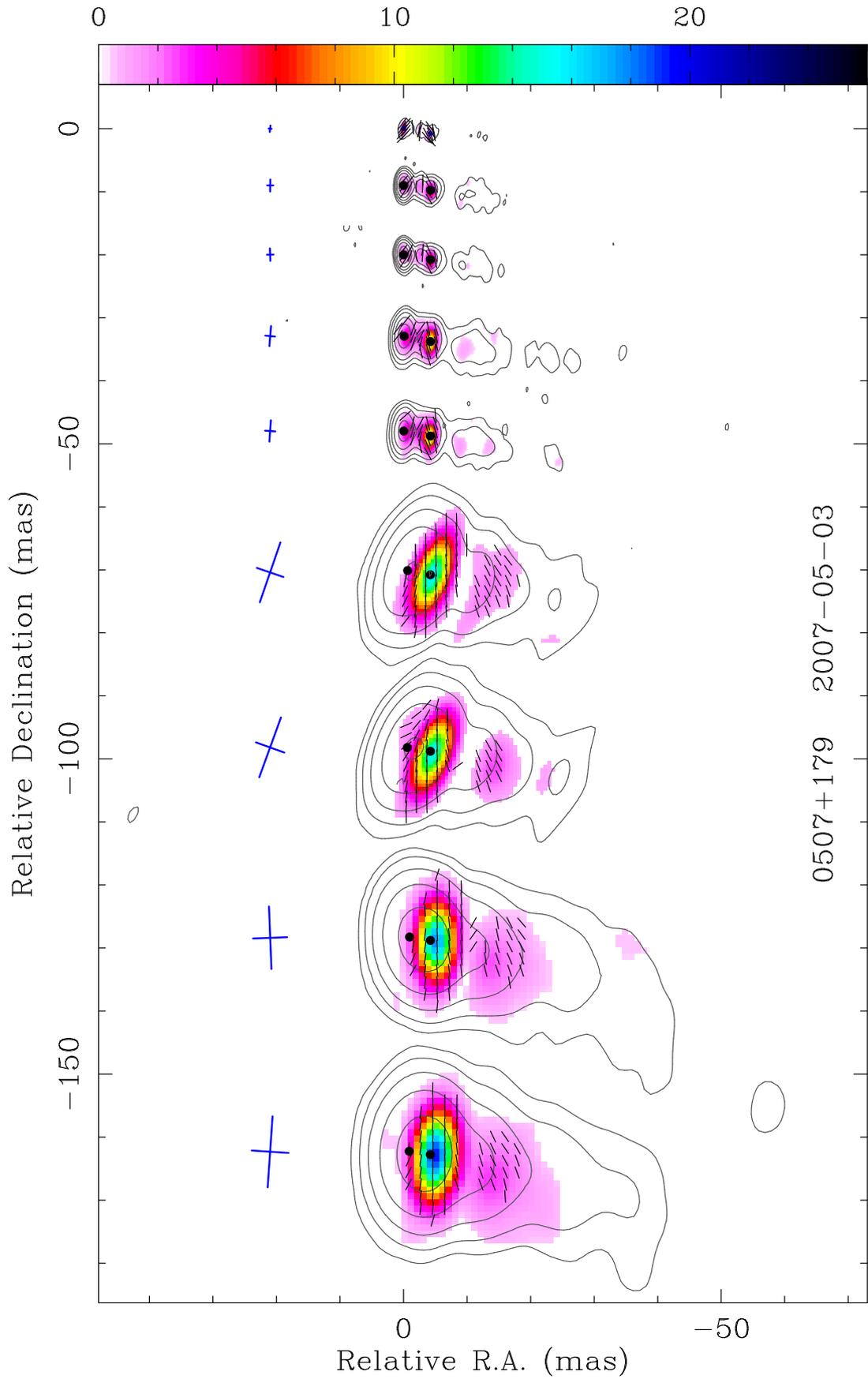


Рисунок 3.4 — Продолжение. Активное ядро галактики 0507+179.

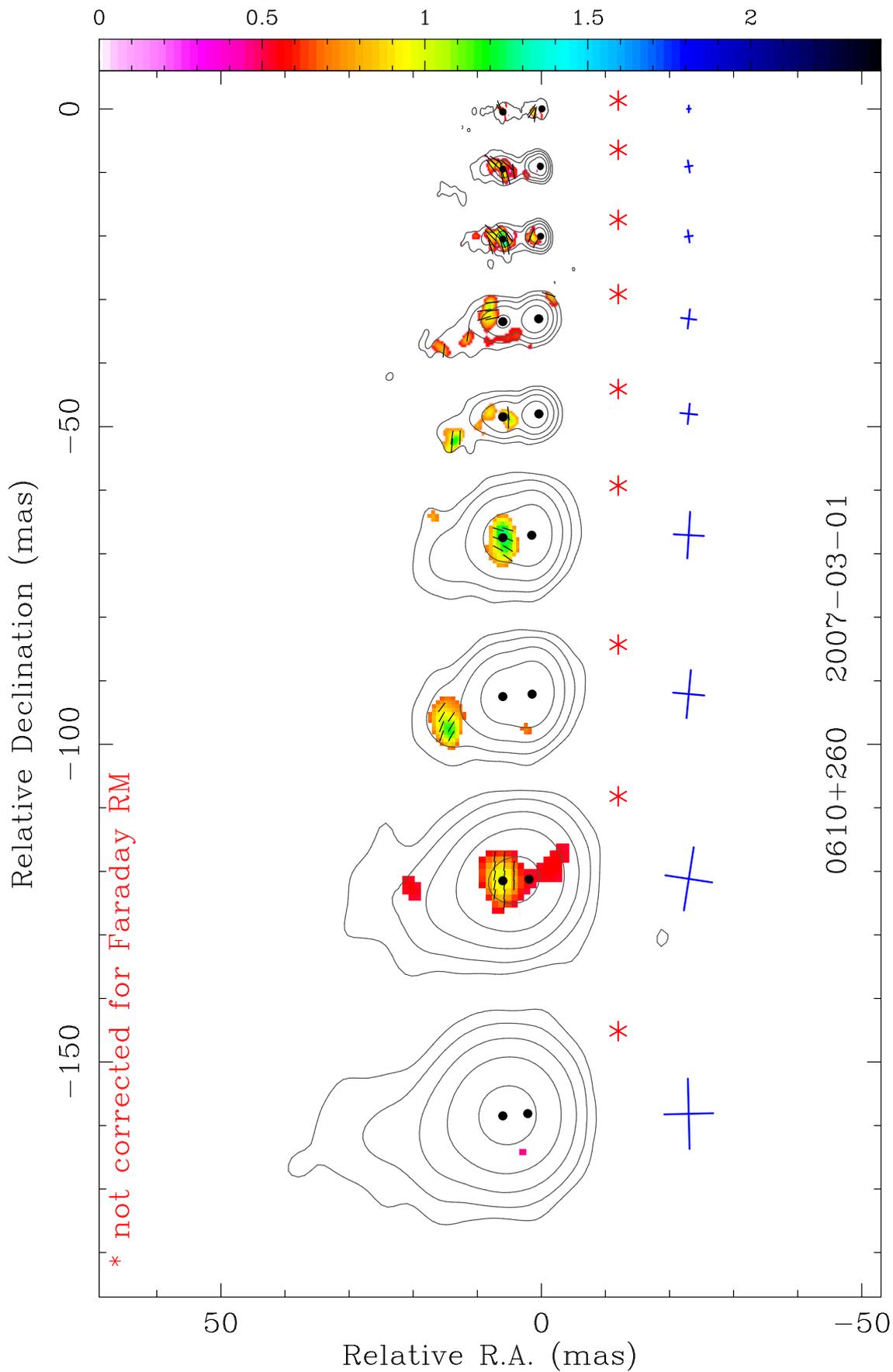


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 0610+260.

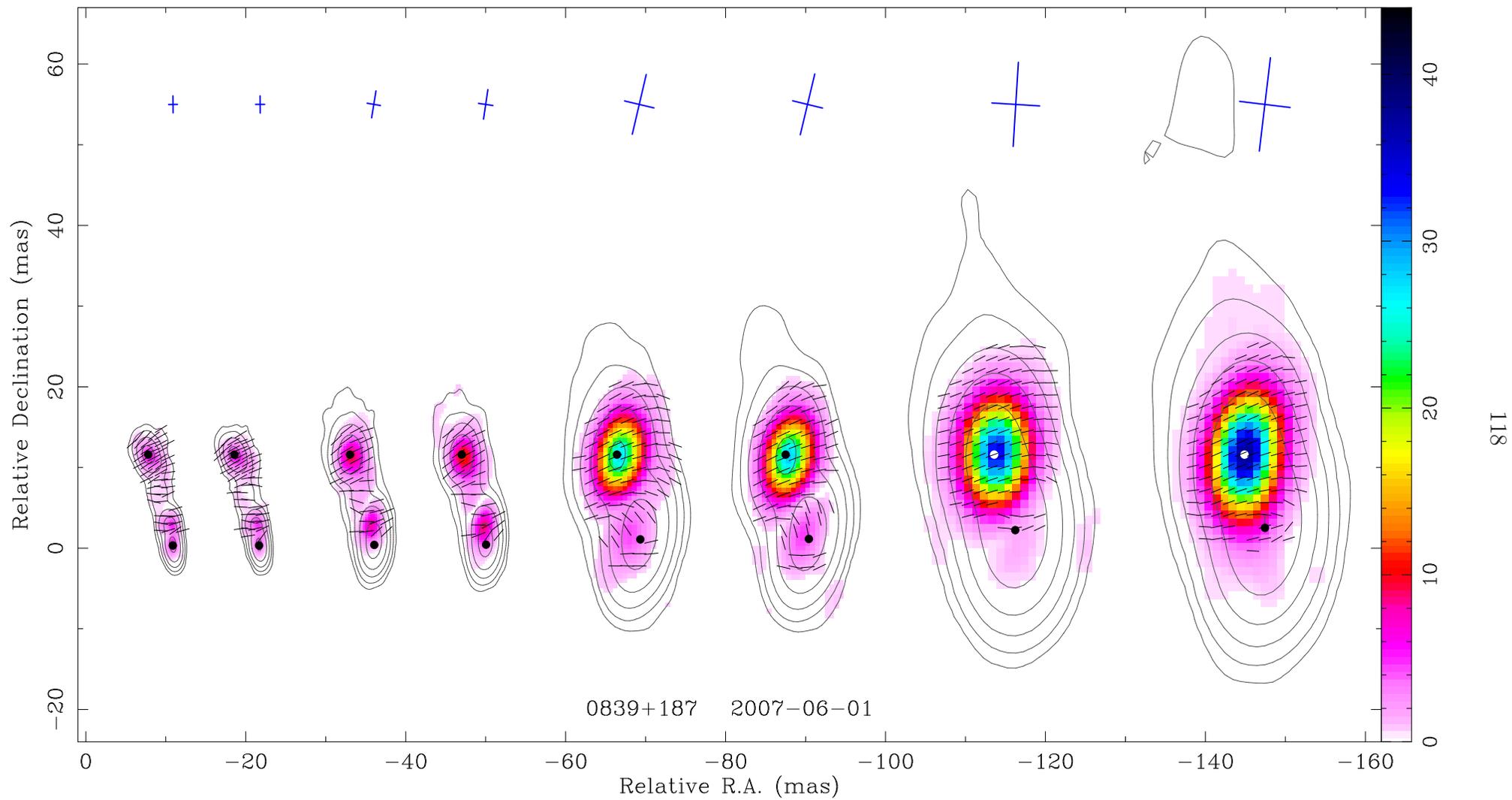


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 0839+187.

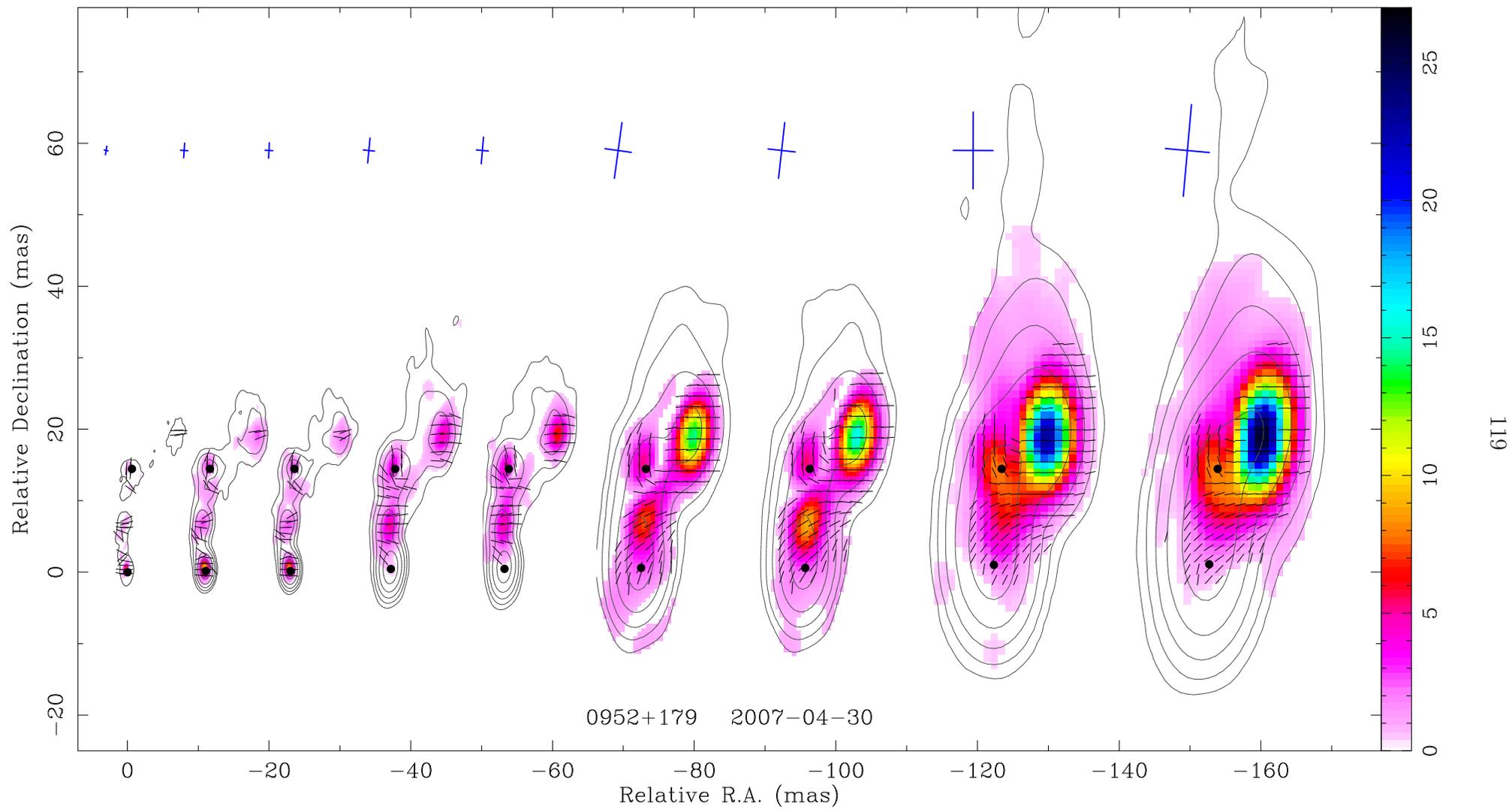


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 0952+179.

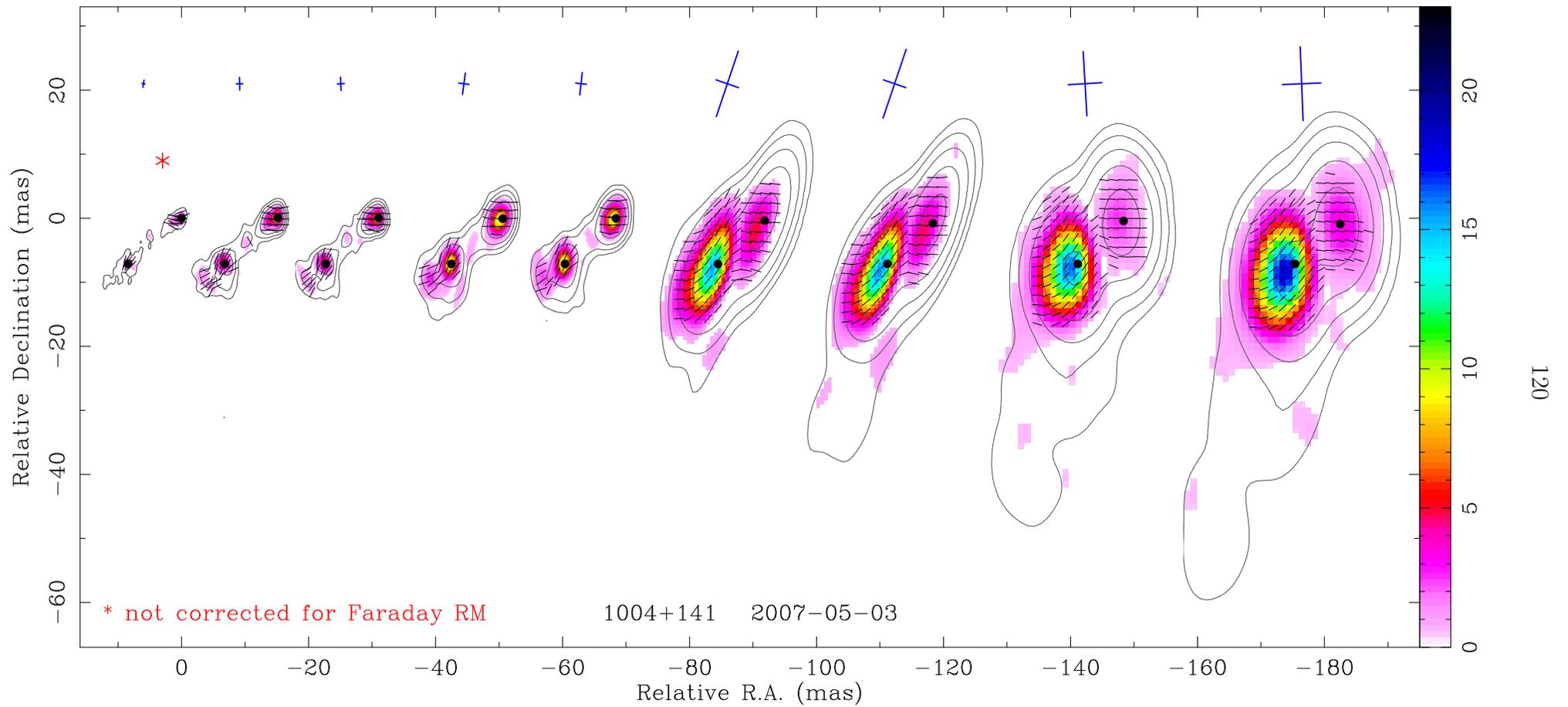


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квazar 1004+141.

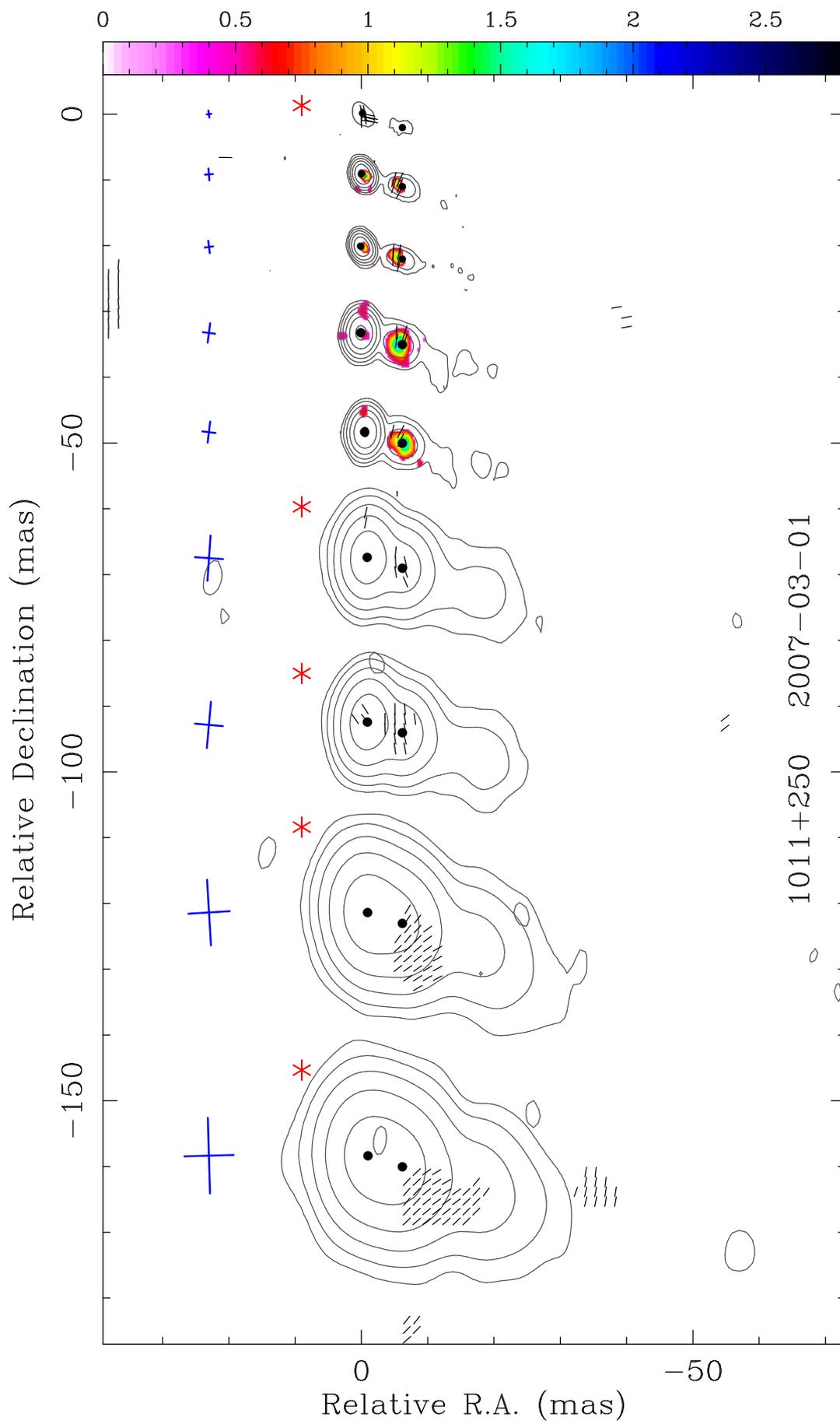


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 1011+250.

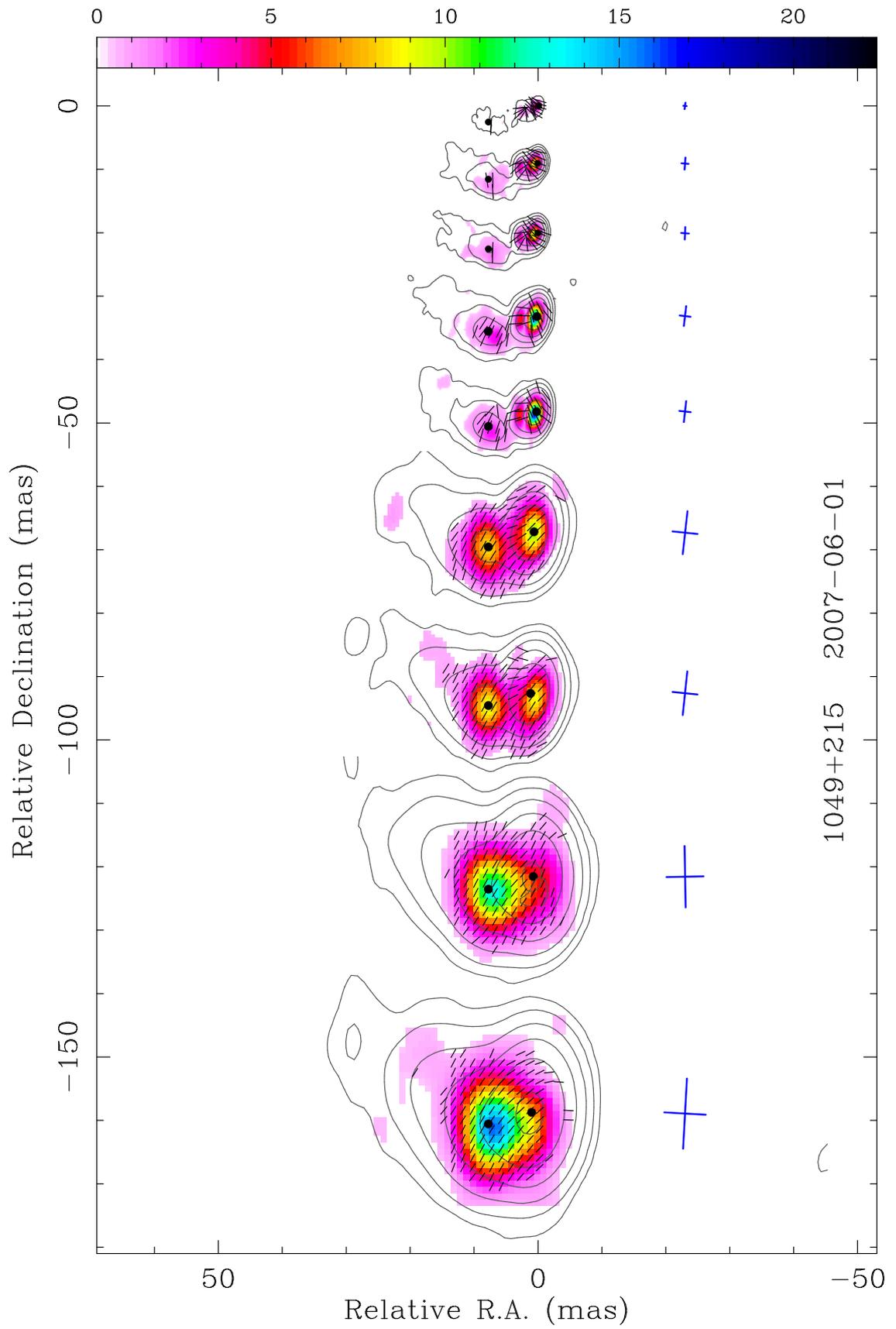


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 1049+215.

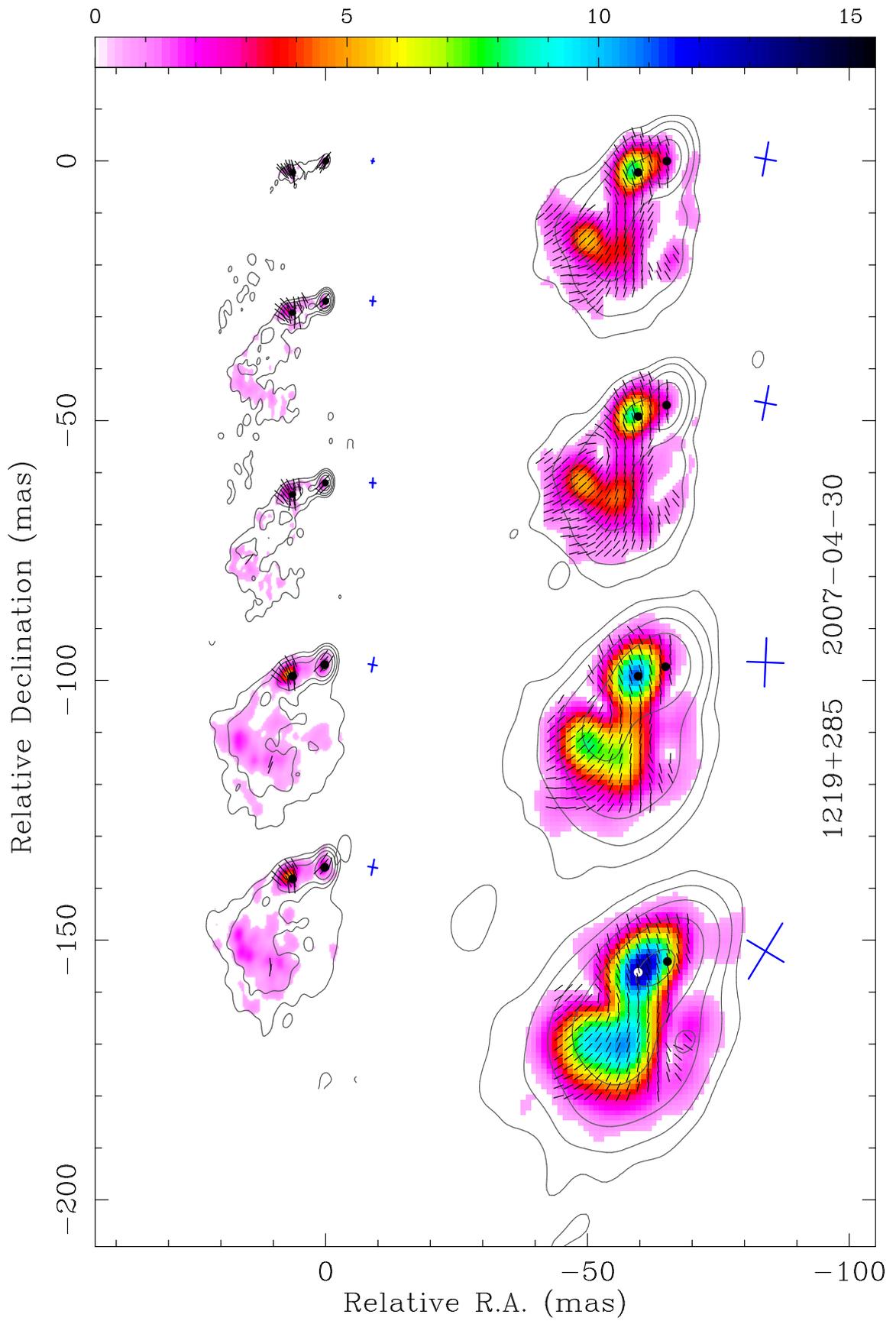


Рисунок 3.4 — Продолжение. Лацертида 1219+285.

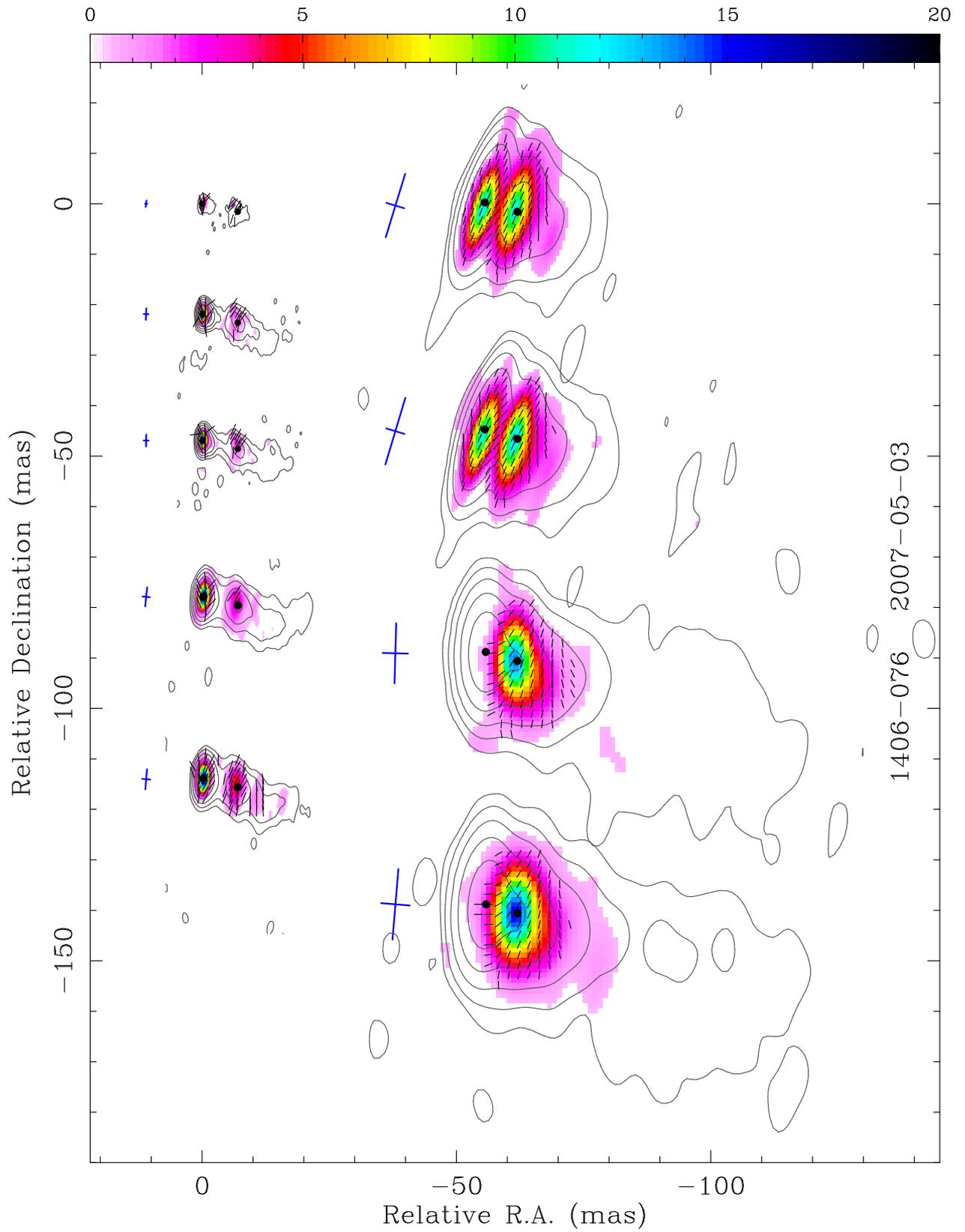


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квazar 1406-076.

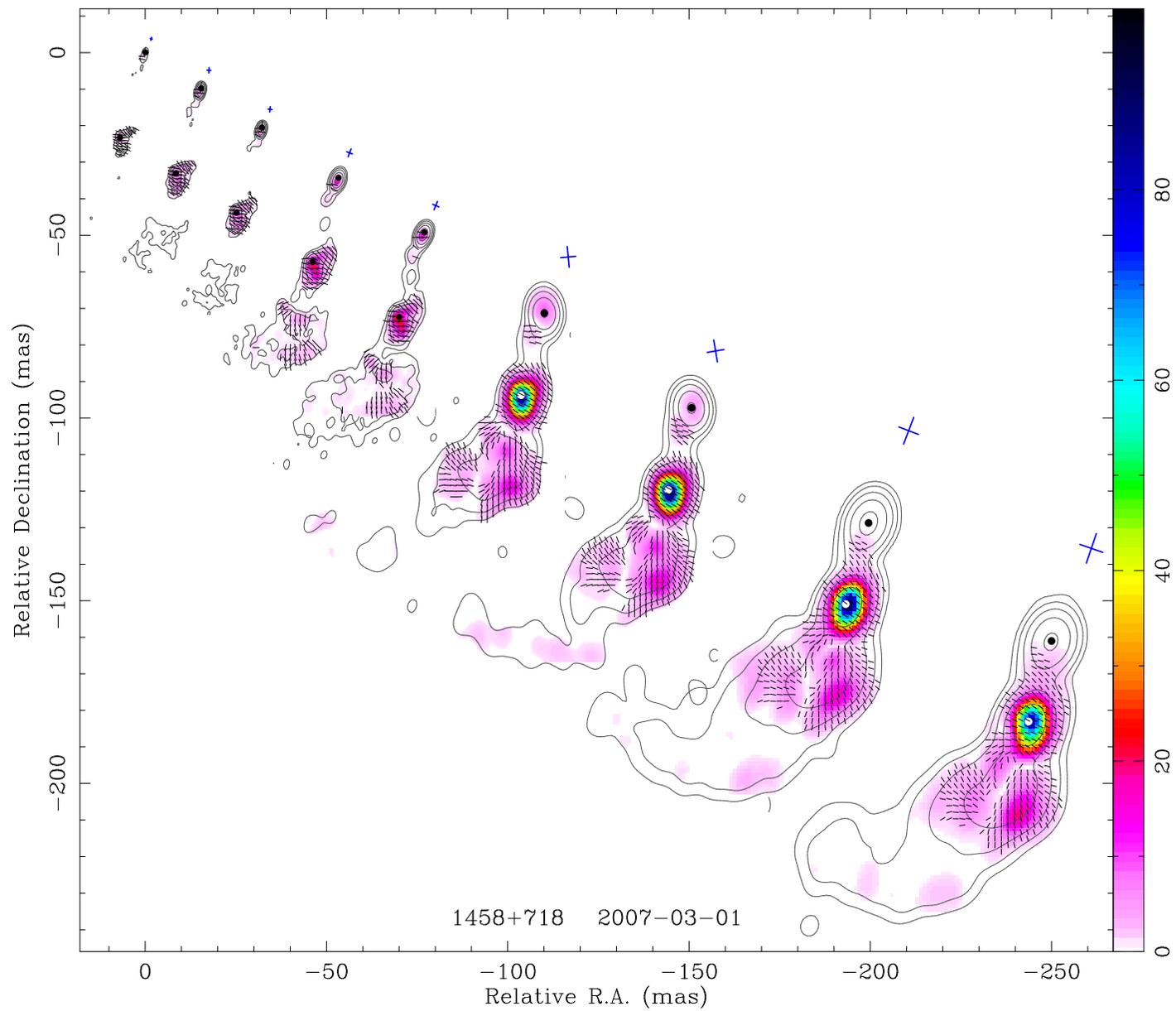


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квazar 1458+718.

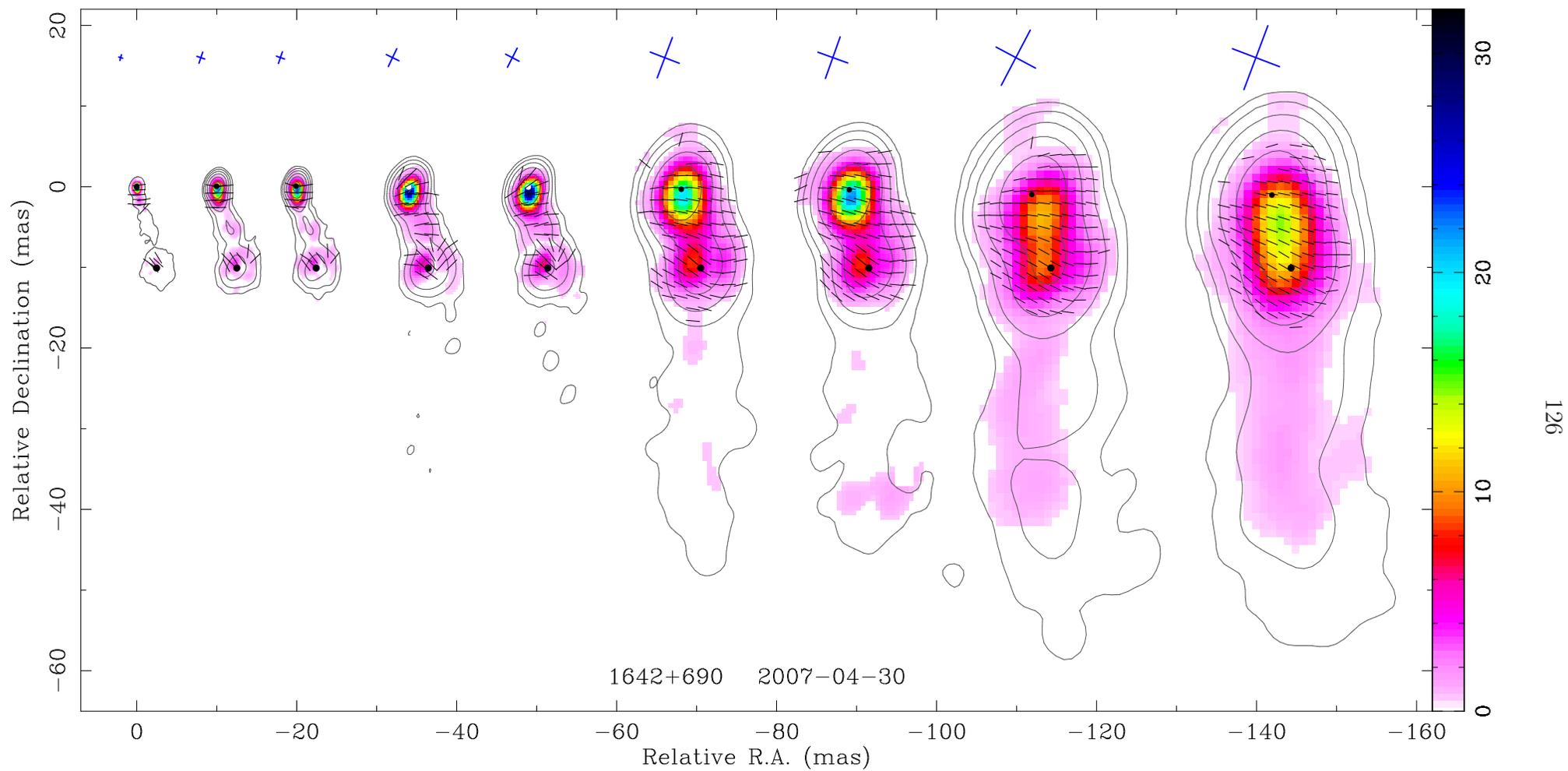


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 1642+690.

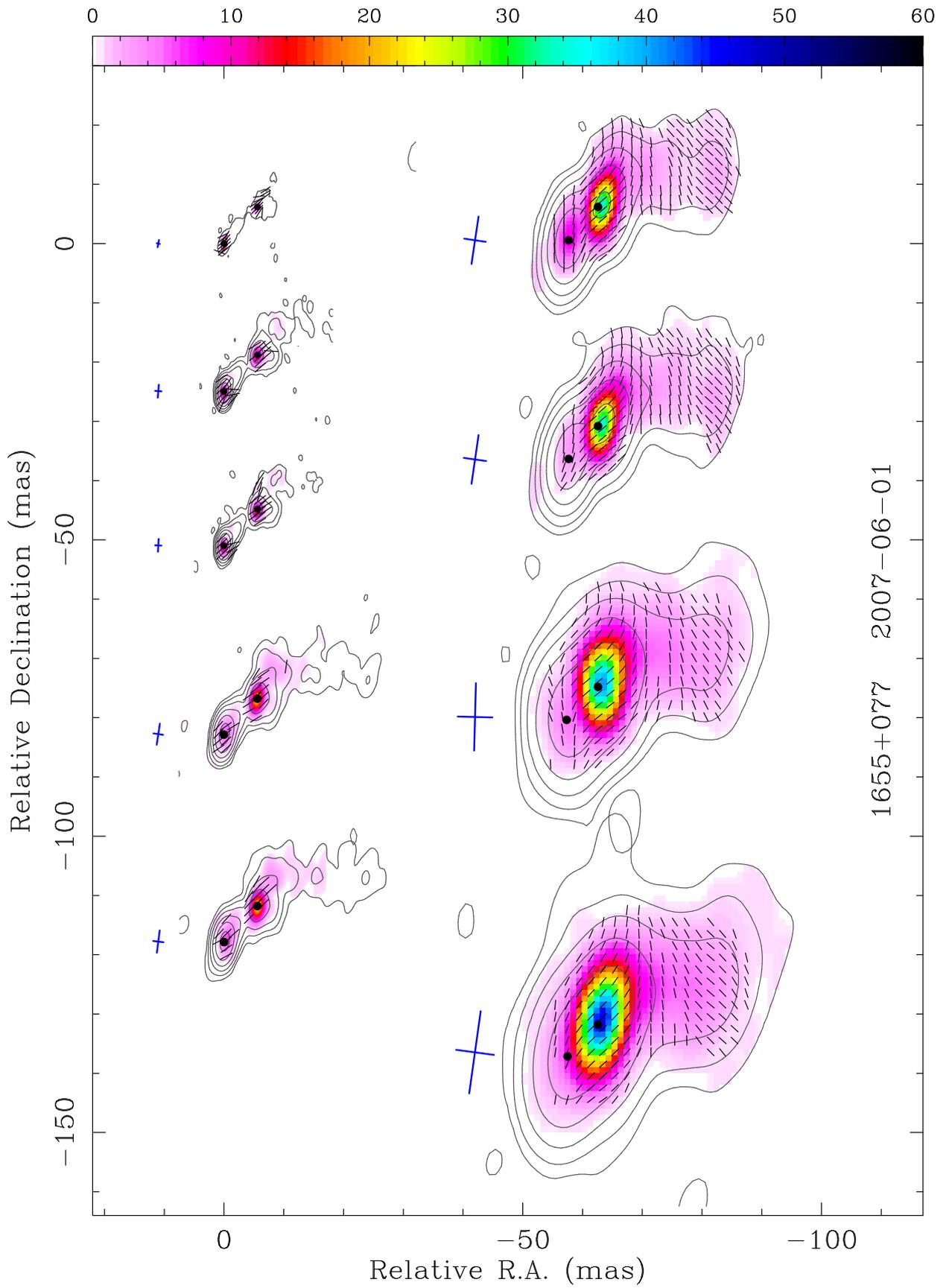


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 1655+077.

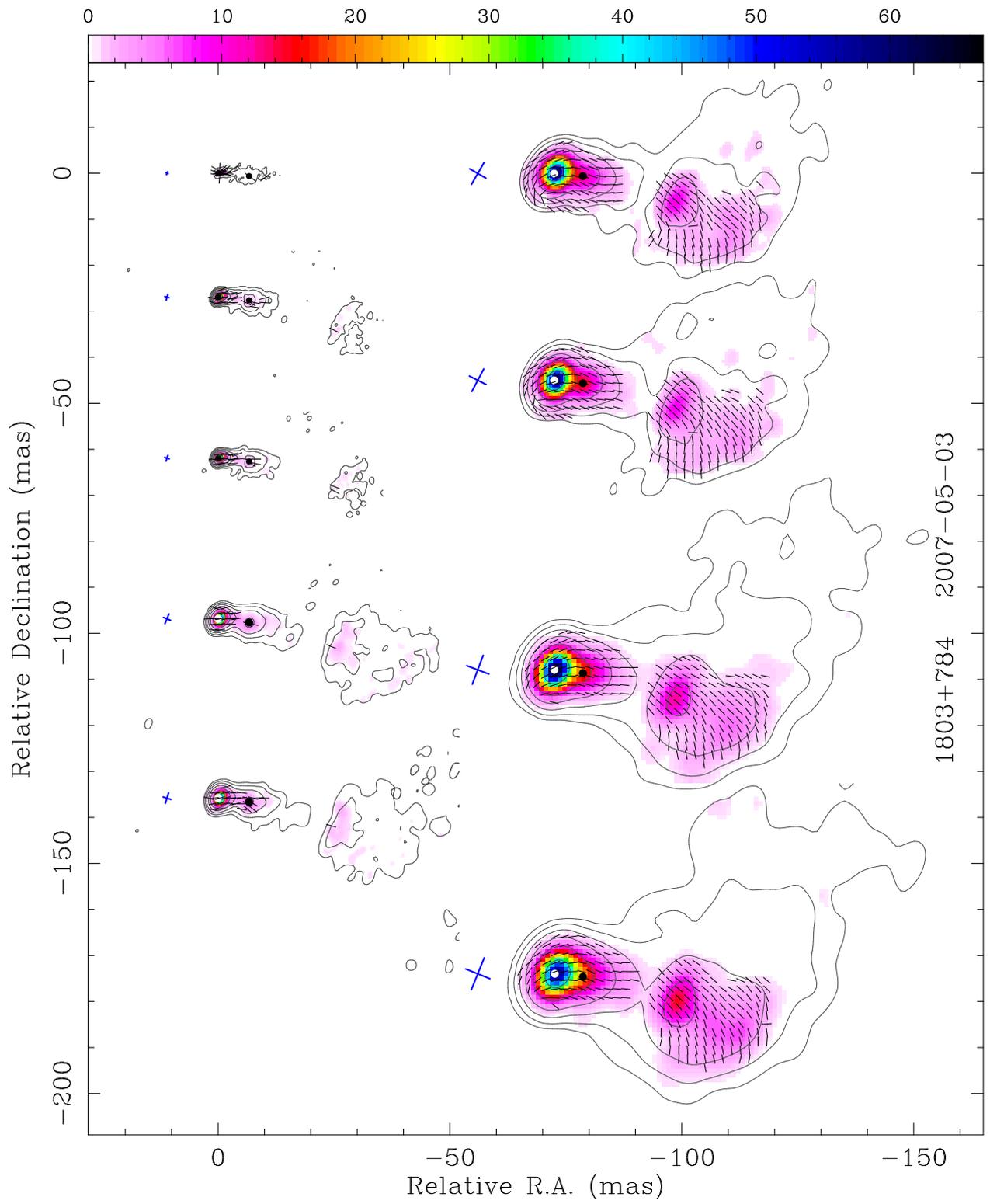


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 1803+784.

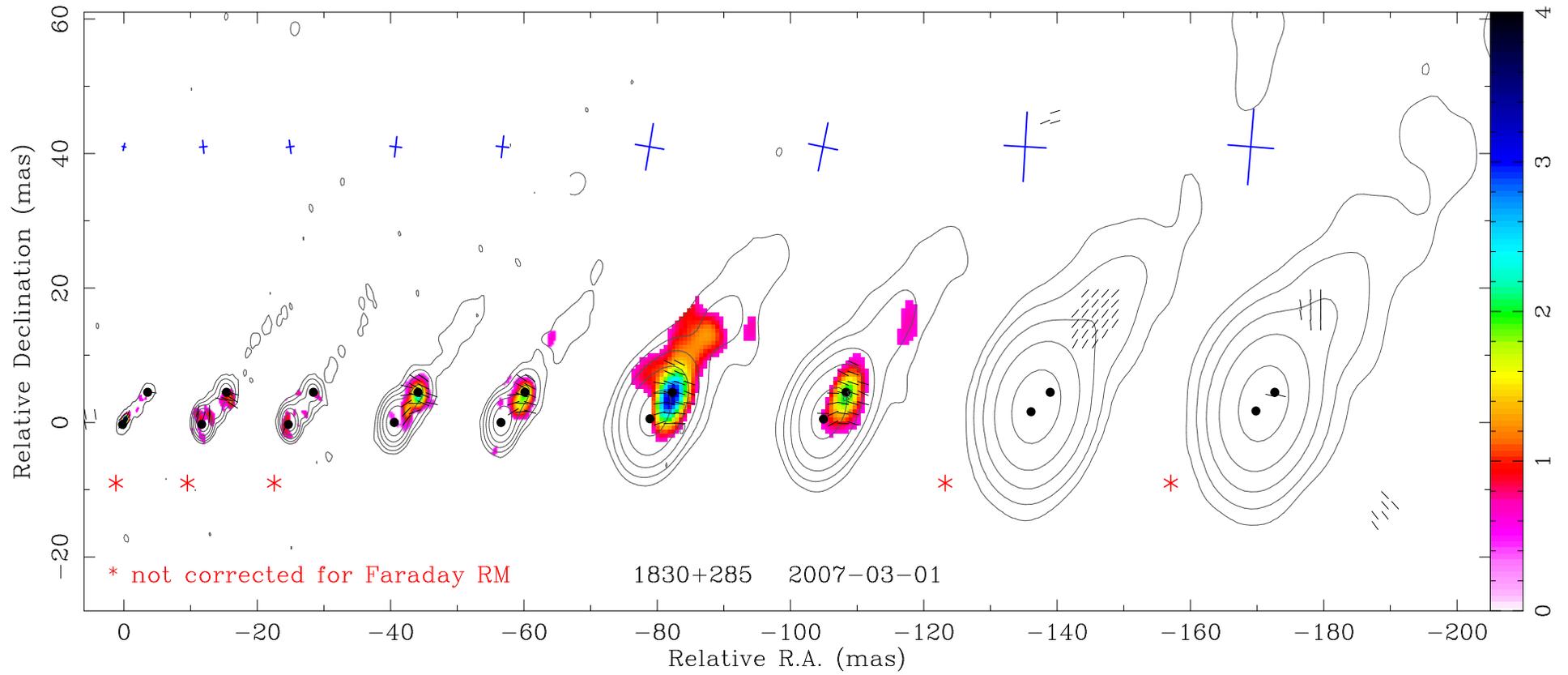


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квazar 1830+285.

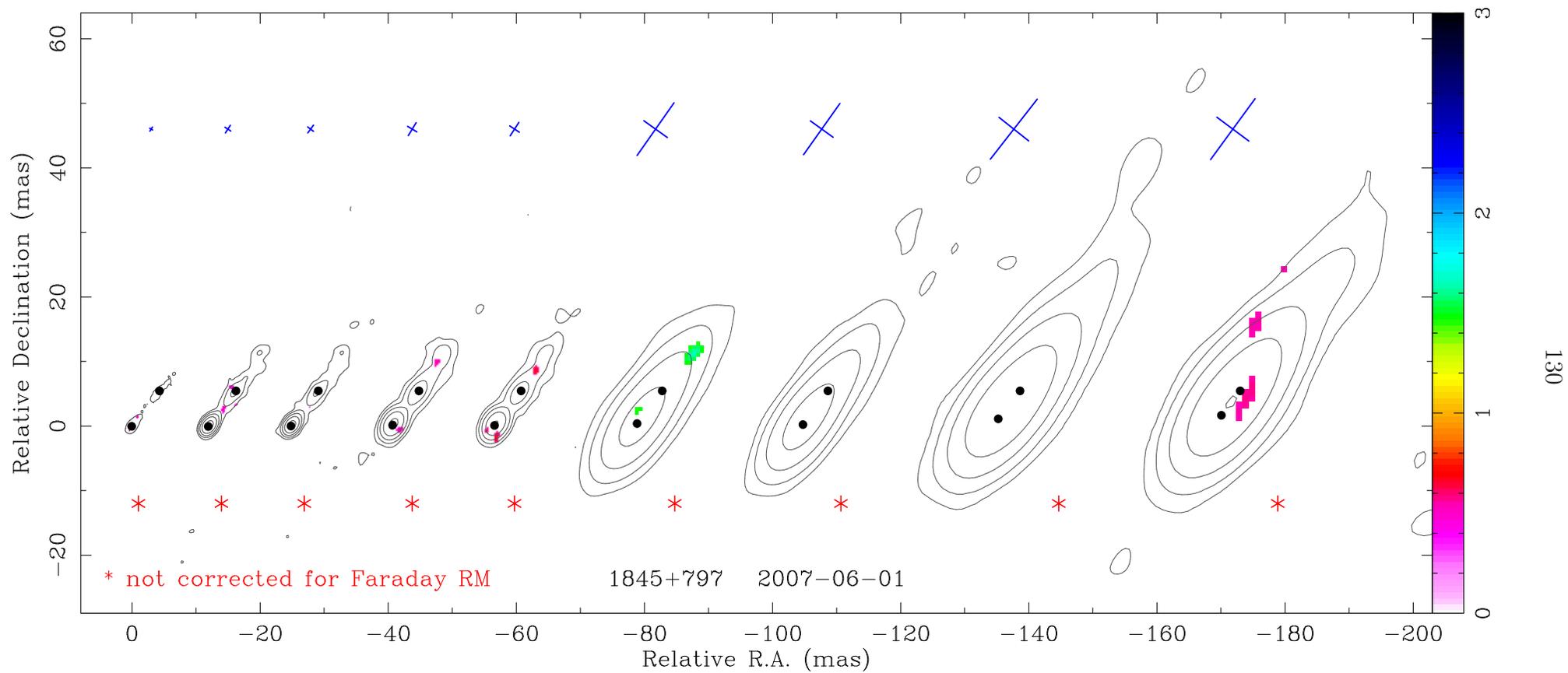


Рисунок 3.4 — Продолжение. Активное ядро галактики 1845+797.

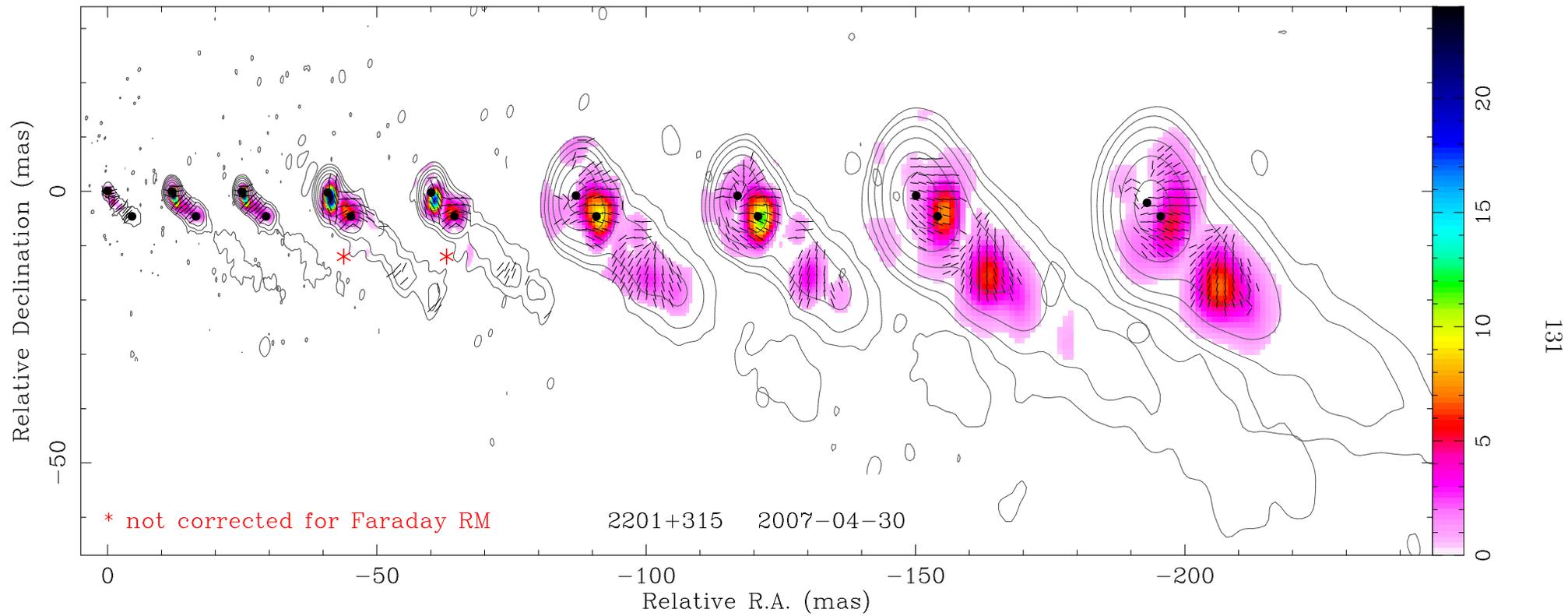


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 2201+315.

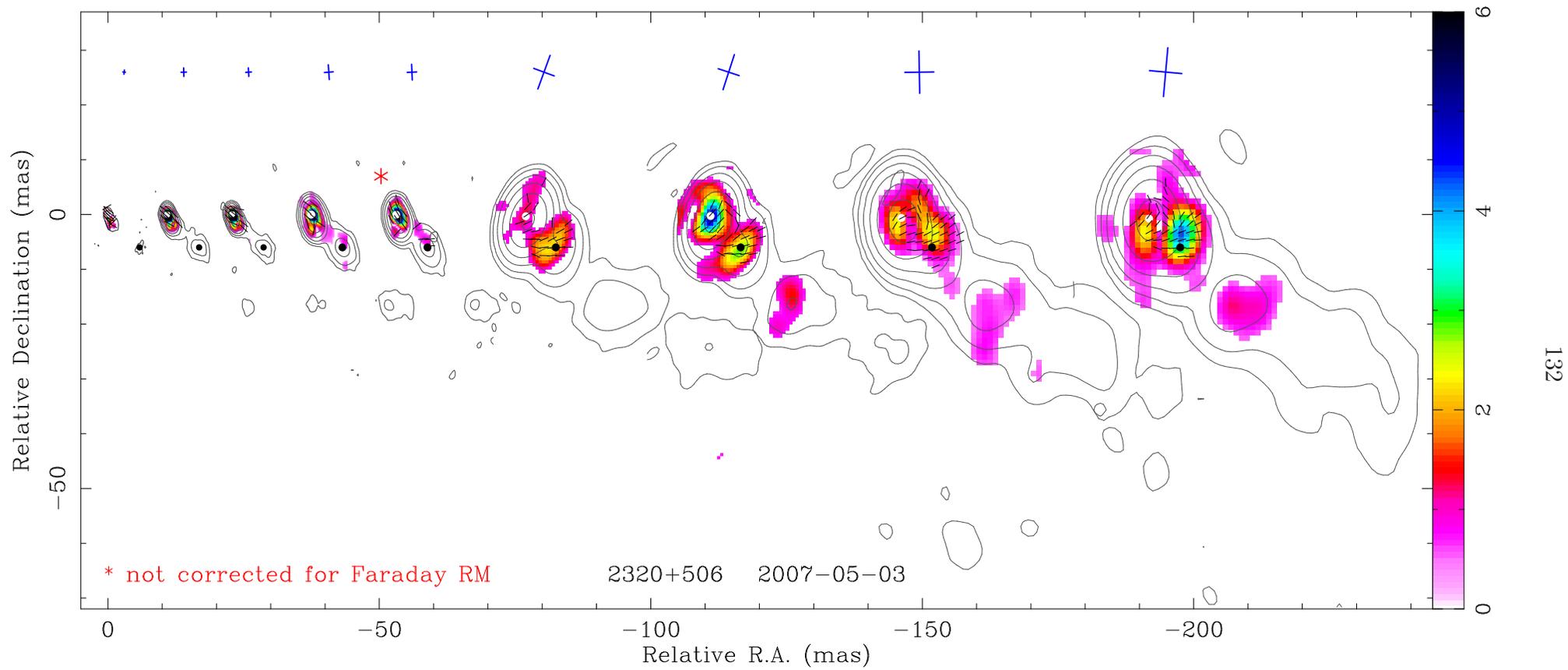


Рисунок 3.4 — Продолжение. Квазар 2320+506.

ну ориентации магнитного поля с полоидальной на поперечную на расстоянии 30 мсек дуги от ядра можно объяснить изменением направления струи. Увеличение степени поляризации в положении оптически тонкого компонента, видимое в струе 1458+718, является подтверждением этого предположения, поскольку, согласно этой модели, оболочка струи имеет более однородное магнитное поле, чем «сердцевина» джета [31].

1642+690. Поведение m и EVPA с квадратом длины волны в ядре источника характерно наличием нескольких компонентов струи или МВ, при этом поведение поляризационных характеристик в оптически тонкой области струи согласуется с моделью аномальной деполяризации при наличии спиралевидных магнитных полей. Значимые поперечные градиенты МВ, видимые в диапазоне 4.6–15.4 ГГц, подтверждают это предположение. Скорректированный EVPA имеет сложную структуру вдоль струи: его ориентация перпендикулярна направлению распространения струи на протяжении 7 мсек дуги от ядра, а в местоположении оптически тонкой детали джета напоминает структуру «сердцевина-оболочка», заметную на более коротких длинах волн. Величина степени поляризации в струе 1642+690 достигает до 30%, что говорит о наличии регулярного магнитного поля. В итоге, проявляемые наблюдаемые характеристики согласуются с существованием спиралевидного магнитного поля в струе АЯГ.

1655+077. Степень и угол линейной поляризации в ядре источника ведут сложным образом. Возможно, что синхротронное самопоглощение ответственно за проявляемое поведение, а фарадеевское вращение образуется на внешней замагниченной плазме. Поведение поляризационных характеристик в оптически тонком компоненте согласуется с этим предположением. Это АЯГ проявляет значимую переменность МВ во времени (см. §2.5.3), что говорит об очень близком расположении этого внешнего экрана к самой струе. Скорректированный за вращение EVPA сонаправлен с позиционным углом струи в положении ядра и оптически тонкого компонента. Джет 1655+077 может содержать тороидальное магнитное поле. В ядерной области источника может происходить вспышечная активность, сопровождаемая инъекцией нового компонента струи. Действительно, кинематический анализ Листера и др. [125] демонстрирует наличие нового компонента на расстоянии 1 мсек дуги от ядра в эту эпоху. Вычисления Лютикова и др. [31] показывают, что тороидальное магнитное поле может быть ориентировано в наблюдениях либо параллельно, либо перпендикулярно ориентации струи. Таким образом малые изменения направления распространения струи могут быть причиной наблюдаемой поляризационной структуры

струи источника.

1803+784. Слабая и постоянная с длиной волны степень поляризации в оптически тонкой детали струи может объясняться существенным вкладом хаотично ориентированным магнитным полем. При этом m существенно увеличивается с увеличением длины волны в ядерной области, что свойственно магнитному полю, систематически меняющего свою ориентацию. Поперечные срезы МВ разрешают струю и не показывают признаков наличия значимых градиентов. Каторн и др. [179] ассоциировал ядро 1803+784 со стоячей ударной волной, предполагая комбинацию полоидального и хаотического магнитных полей, и воспроизвел наблюдаемую поляризационную структуру, видимую в этой области на частоте 43 ГГц. Наличие неподвижных компонентов в области 1 мсек дуги от ядра [125] может являться указанием на действительное наличие этой структуры в ядерной области струи АЯГ. Тем не менее, скорректированный поляризационный угол сонаправлен ориентации струи на протяжении 30 мсек дуги, что говорит о присутствии тороидального магнитного поля в выбросе 1803+784. Габузда [180] и Габузда и Чернецкий [129] также указывают на возможное наличие тороидального магнитного поля в джете источника, как и на возможность существования ударной волны.

1830+285. Сильный поляризационный поток наблюдается только в протяженной струе АЯГ на более высоких частотах, который следует поведению деполяризации на внешнем экране. Позиционный угол линейной поляризации ориентирован поперек направлению распространения выброса, указывая на наличие полоидального магнитного поля в струе АЯГ.

1845+797 (3C 390.3). Этот источник имеет слабую линейную поляризацию в большинстве частотных диапазонов, в связи с чем не представляется возможным провести анализ его характеристик.

2201+315. Ядро и оптически прозрачная области струи АЯГ слабо поляризованы и следуют закону деполяризации на внешнем фарадеевском экране. Временная стабильность сложной структуры МВ в струе 2201+315 на протяжении лет (см. §2.5.3) подтверждает этот результат. В то время как EVPA ориентирован поперек направлению струи ниже 1.5 мсек дуги по струе, в околоядерной области поляризационный угол ориентирован под углом $\sim 45^\circ$ к джету. Вспышечная активность в источнике может быть причиной такого поведения. Результаты Листера и др. [125] показывают отделение нового компонента струи от ядра в этот момент времени. Сопутствующие изменения ориентации EVPA также видны в данных других авторов [82; 181]. Карты МВ в диапазоне 1.4–2.4 ГГц (наши данные, рисунок 2.10) и в диапазоне 8.1–15.2 ГГц [181] показы-

вают изменение знака фарадеевского вращения в ядре, а также наличие градиента вдоль поперечного к струе среза. Это является указанием на возможное присутствие спиралевидного магнитного поля в окружающей струю веществе.

2320+506. Слабая степень линейной поляризации в ядре и оптически тонкой детали струи следует закону деполяризации на внешнем экране. Направление вектора линейной поляризации ориентировано параллельно и перпендикулярно струе в ядре и в положении оптически тонкого компонента, соответственно. Однако в области 1–3 мсек дуги вниз по струе структура EVPA имеет сложную структуру: поляризационный угол сонаправлен с позиционным углом струи с одной стороны выброса, в то же время его ориентация сменяется на ортогональную на другой стороне джета. Это поведение сопровождается асимметрией в распределении степени поляризации. Такая структура может возникать в спиралевидных магнитных полях [31; 121]. В итоге, «сердцевина» струи 2320+506 может содержать полоидальное магнитное поле, а в оболочке выброса может преобладать тороидальное поле.

3.5 Обсуждение результатов

Совместный анализ поляризационных характеристик источников: распределение МВ вдоль (§2.5) и поперек струй (§2.6), распределение и ориентация линейной поляризации (§3.3) и скорректированных за фарадеевское вращение карт EVPA показывает, что, несмотря на сложную наблюдаемую картину, все источники могут быть описаны единой моделью «сердцевина - оболочка» (*англ.* «spine-sheath»). Ранее эта модель предлагалась для объяснения поляризационных и кинематических свойств отдельных источников, в которых наблюдается напрямую эта поляризационная структура (например, [141]), значимые поперечные градиенты меры вращения и продольное магнитное поле в струе (например, [161; 182]), а также поперечный градиент скоростей, когда наблюдается более медленная оболочка вокруг быстрой, синхротронно излучающей «сердцевины» (например, [14; 92]).

Возникновение такой поляризационной конфигурации возможно в рамках различных представлений. Например, Лэнг в 1996 г. [115] предложил модель «замедляющейся» струи: движение вещества в «сердцевине» выброса движется с релятивистской скоростью, а к краям движение становится более медленным из-за взаимодействия с окружающим веществом. При этом, тороидальное поле в центре струи «вытягивается» внешней средой на его краях, становясь продольным относительно направления джета. Существование такой структуры

показано в моделированиях струйных выбросов, например Алоем и др. [94].

Лютиков и др. [31] рассматривают модель струй со спиралевидными магнитными полями и релятивистским движением плазмы. В таком подходе структура «сердцевина-оболочка» образуется из-за проекции преобладающей тороидальной компоненты поля на небесную сферу, которая рядом с «сердцевинной» джета будет перпендикулярна его направлению, а ближе к краям выброса будет иметь сонаправленную ориентацию.

Большая часть аналитических расчетов и Монте-Карло моделирований струй (например, [116; 139]) выбирают в качестве начальных условий полоидальное магнитное поле, образуемое в аккреционном диске или магнитосфере черной дыры АЯГ. В процессе формирования джета в его центре образуется канал с преимущественно тороидальным полем, в то время как в его внешних слоях формируется медленная оболочка с полоидальным полем.

В рамках наших предположений, такая модель может быть применима ко всем струям АЯГ. В результате наблюдаемое фарадеевское вращение и деполяризация возникают в замагниченном внешнем слое струи («оболочка»), окружающей «сердцевину» струи, в которой генерируется синхротронное излучение. Анализ спектров линейной поляризации (см. §3.3) показывает, что магнитное поле оболочки может быть как хаотично ориентированным, так и быть хорошо упорядоченным, при этом плазма в этом фарадеевском веществе может быть распределена неоднородно. В некоторых случаях оболочка может содержать спиралевидное магнитное поле, проявляемое наличием значимых градиентов M_V . В то же время, «сердцевина» или сама струя содержит хорошо упорядоченное магнитное поле, которое ориентировано в наблюдаемых источниках либо вдоль, либо поперек струй. Не исключено, что часть фарадеевского вращения образуется в области образования узких эмиссионных линий (см. обсуждение параграфа 2.4).

Поскольку тороидальная компонента магнитного поля спадает как r^{-1} , где r расстояние от центральной машины АЯГ, а продольная компонента как r^{-2} , то на больших расстояниях от центра АЯГ должны преобладать тороидальные магнитные поля [25]. Наблюдаемая нами ориентации магнитных полей существенно отличается от этого предсказания (рисунок 3.3). Такое поведение предполагает более сложную структуру релятивистских выбросов, как, например, существование ударных волн или плазменных неустойчивостей, турбулентное магнитное поле и несимметричность струйных выбросов.

Проводимые выше обсуждения основаны на предположении об однозначной связи ориентаций магнитного и электрических полей (совпадение их направ-

лений в оптически толстой среде и перпендикулярная ориентация в оптически тонких областях). Однако релятивистские эффекты и движение [31], видимость только некоторой области струи в определенный момент времени и другие эффекты приводят к тому, что ориентация электрического и магнитного полей будет отличаться от 0° и 90° . В связи с этим, для восстановления ориентации магнитного поля по наблюдаемой ориентации электрического поля необходима информация о скорости течения плазмы в каждом исследуемом источнике и геометрии его струи.

3.6 Выводы

В связи со сложной структурой релятивистских выбросов и особенностей конфигурации магнитных полей, полная информация о поляризационных свойствах джетов АЯГ может быть получена только при комплексном исследовании различных характеристик АЯГ, например, таких как кинематический анализ, временная вариация параметров, вспышечная активность источника и др. Более того многочастотные поляризметрические РСДБ наблюдения, результаты анализа которых представлены в настоящей главе, также являются важнейшим инструментом для таких исследований. По проведенным детальным исследованиям поляризационных свойств 20 АЯГ получены следующие результаты:

1. Впервые получены спектры линейной поляризации и направление вектора линейной поляризации в ядрах и в области оптически прозрачного излучения струй. Моделированием определен деполяризационный механизм, имеющий место в каждой струе, и свойства замагниченной плазмы, окружающей эти источники. Показано, что измеренное фарадеевское вращение в большинстве исследуемых АЯГ происходит на внешнем экране, расположенном очень близко к струе, и вероятнее всего, является ее внешним слоем или оболочкой. Этот экран может иметь клочковатую структуру и содержать как хаотично ориентированные, так и хорошо упорядоченные магнитные поля.
2. Впервые построены РСДБ карты ориентации электрического угла поляризации в исследуемых источниках, скорректированные за фарадеевское вращение, в широком интервале длин волн. Высокая чувствительность эксперимента позволила провести анализ конфигурации наблюдаемых электрических полей на протяжении сотен парсек. В результате выявлена сложная поляризационная структура в половине из рассматриваемых источников,

ожидаемая, например, при наличии ударных волн, релятивистского движения плазмы и спиралевидных магнитных полей в струях АЯГ. При этом магнитные поля струйных выбросов хорошо упорядочены и сохраняют свое направление на протяжении от единиц до сотен парсек.

3. Совместный анализ всех поляризационных характеристик источников показывает, что модель структуры струй АЯГ «сердцевина-оболочка», в которой синхротронное излучение генерируется во внутренних слоях джета («сердцевина»), окруженных тепловой замагниченной плазмой («оболочка»), может быть применима ко всем источникам и рассматриваться как общая модель строения релятивистских струй АЯГ.

Глава 4

Широкодиапазонное исследование квазара S4 1030+61

В этой главе представлены результаты обработки наблюдений и подробного анализа физических свойств квазара S4 1030+61 после произошедшей в нем яркой гамма-вспышки с целью проверки существующих моделей природы и физических условий релятивистских струй активных ядер галактик. Исследование основано на анализе многоволновых (гамма- и радиодиапазоны) долговременных наблюдений источника различными инструментами: одиночной 40-м антенной OVRO, радиоинтерферометром VLBA и космической обсерваторией *Fermi*. Содержание главы следует работам [A3; B5; B7–B9].

4.1 Введение: квазар S4 1030+61. Постановка задачи

В 1965 г. была впервые обнаружена временная радиопеременность квазаров СТА 102 [183] и 3С 273 [184]. С тех пор работы в этом направлении стали предметом активных исследований, а временная переменность АЯГ была зарегистрирована во всем электромагнитном спектре [185]. При этом были обнаружены как продолжительные изменения радиопотока на масштабах дней, месяцев и лет [10], так и мелкомасштабная, часовая переменность [9; 186; 187].

К настоящему моменту значительный успех достигнут в понимании этого явления, а современное состояние астрономической аппаратной базы позволяет наблюдать большое количество объектов несколькими инструментами одновременно. Короткопериодичная радиопеременность (≤ 10 дней) может объясняться случайными процессами в релятивистских струях, как, например, турбулентными магнитными полями [28] или вариациями направления распространения струйного выброса АЯГ [124; 188]. В то же время долгопериодичные изменения (≥ 10 дней) характеристик квазаров показывают, что конкретный физи-

ческий процесс ответственен за проявляемые свойства. Среди прочих эффектов, это может быть распространение релятивистских ударных волн вдоль по струе [189; 190] или в ее оболочке [162], систематическое изменение направления распространения джета [188], распространение различного рода плазменных неустойчивостей вдоль струи (например, [191]), перезамыкание магнитных линий [192; 193] и др. В связи с этим вопрос о природе переменности АЯГ остается открытым.

Многочисленные и многочастотные наблюдения позволяют не только локализовать области струй, в которых происходит определенный процесс, но и производить исследование эффектов распространения излучения по источнику. Возможности РСДБ по определению структуры и кинематики источника особенно эффективны в этом вопросе, позволяя проводить совместный анализ связи активности источника с изменением его структуры и свойств (например, [194; 195]). При этом наблюдения на более высоких частотах, где эффекты синхротронного самопоглощения не оказывают существенного влияния, позволяют исследовать области, расположенные ближе к центральной черной дыре, где происходит формирование и коллимация струй. А именно, это мм, субмм и оптический диапазоны длин волн, а также ГэВ диапазон энергий (γ -излучение). Работы, анализирующие связь наблюдений в радио- и ГэВ-диапазонах, сообщают о существенной корреляции излучения АЯГ на этих частотах [99; 196–202]. Это указывает на то, что одно и то же возмущение, распространяющееся вдоль выброса, ответственно за излучение в этих диапазонах, и указывает на существенную роль синхротронного самопоглощения в этом процессе [203].

Поляризационные свойства струй АЯГ также показывают сильную переменность во времени (например, [204; 205]). Поскольку поляризация (далее в главе обсуждается только линейная поляризация) характеризует магнитное поле ионизированного излучения, исследование ее поведения со временем позволяет намного эффективнее изучать физические условия в струях АЯГ, нежели просто изучение полного потока. В частности, такие наблюдения позволяют проследивать изменения ориентации магнитного поля в различных областях струй [206], изменение физических свойств во время активной фазы в источнике [207], взаимодействие струи с окружающим веществом [136], изучать структуру струи на масштабах парсек [208] и многое другое.

В данной главе анализируются широкодиапазонные (радио и γ), долговременные наблюдения квазара S4 1030+61 с целью исследования различных свойств релятивистских струй АЯГ для проверки существующих моделей и предположений об их природе и причине временной переменности.

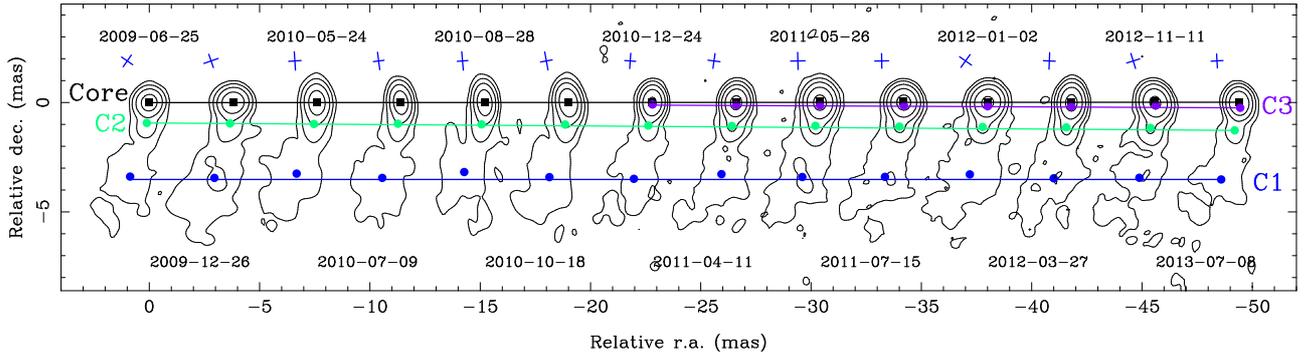


Рисунок 4.1 — РСДБ изображения квазара S4 1030+61 на 15 ГГц в период с 2009 г. (слева) по 2013 г. (справа) с использованием естественного взвешивания данных функции видности. Точки соответствуют положению моделированных компонентов струи («Core» – ядро, «C1», «C2» и «C3» – другие компоненты струи, см. §4.3.1). Прямые линии соединяют положение компонентов в первую и последнюю дату наблюдения. По горизонтальной оси отложено относительное прямое восхождение (мсек дуги), по вертикальной оси – относительное склонение (мсек дуги). Результат диссертанта из работы [A3].

4.2 Наблюдения

Первые радионаблюдения источника S4 1030+61 ($\alpha_{1950} = 10^h 30^m 32.7^s$, $\delta_{1950} = +61^d 06^m 36.7^s$) были выполнены Паулини-Тотом и др. в 1972 г. в рамках обзора S4 на 92-м телескопе NRAO на частоте 5 ГГц [209]. Стикель и Кюр [210] в 1993 г. отождествили этот компактный радиоисточник в оптике с квазаром. На настоящий момент, самое точное измерение красного смещения источника составляет $z = 1.4009$ [211; 212]. Радиоизображение S4 1030+61, полученное телескопом VLBA на 15 ГГц, представлено на рисунке 4.1. Как видно, струя квазара состоит из яркого ядра и вытянутой струи, направленной в сторону юга, протяженностью около 5 мсек дуги. Длина струи S4 1030+61 увеличивается до 15 мсек дуги на радиоизображении на 4–8 ГГц [A3].

Таблица 4.1 — Сводная информация об используемых наблюдениях квазара S4 1030+61. Неопубликованный пояснительный материал, таблица сделана диссертантом.

Инструмент	Частотный диапазон	Дата наблюдений (гггг-мм-дд)
Проект «S2087E» VLBA	4.6, 5.0, 8.1, 8.4	2010-05-24, 2010-07-09, 2010-08-28
	15.4, 22.3, 43.2 ГГц	2010-10-18
VLBA MOJAVE	15.4 ГГц	2009-06-25, 2009-12-26, 2010-12-24
		2011-04-11, 2011-05-26, 2011-07-15
		2012-01-02, 2012-03-27, 2012-11-11
		2013-07-08
OVRO	15 ГГц	2008-06-20–2014-01-21
<i>Fermi</i> /LAT	0.1–200 ГэВ	2008-08-04–2014-02-23

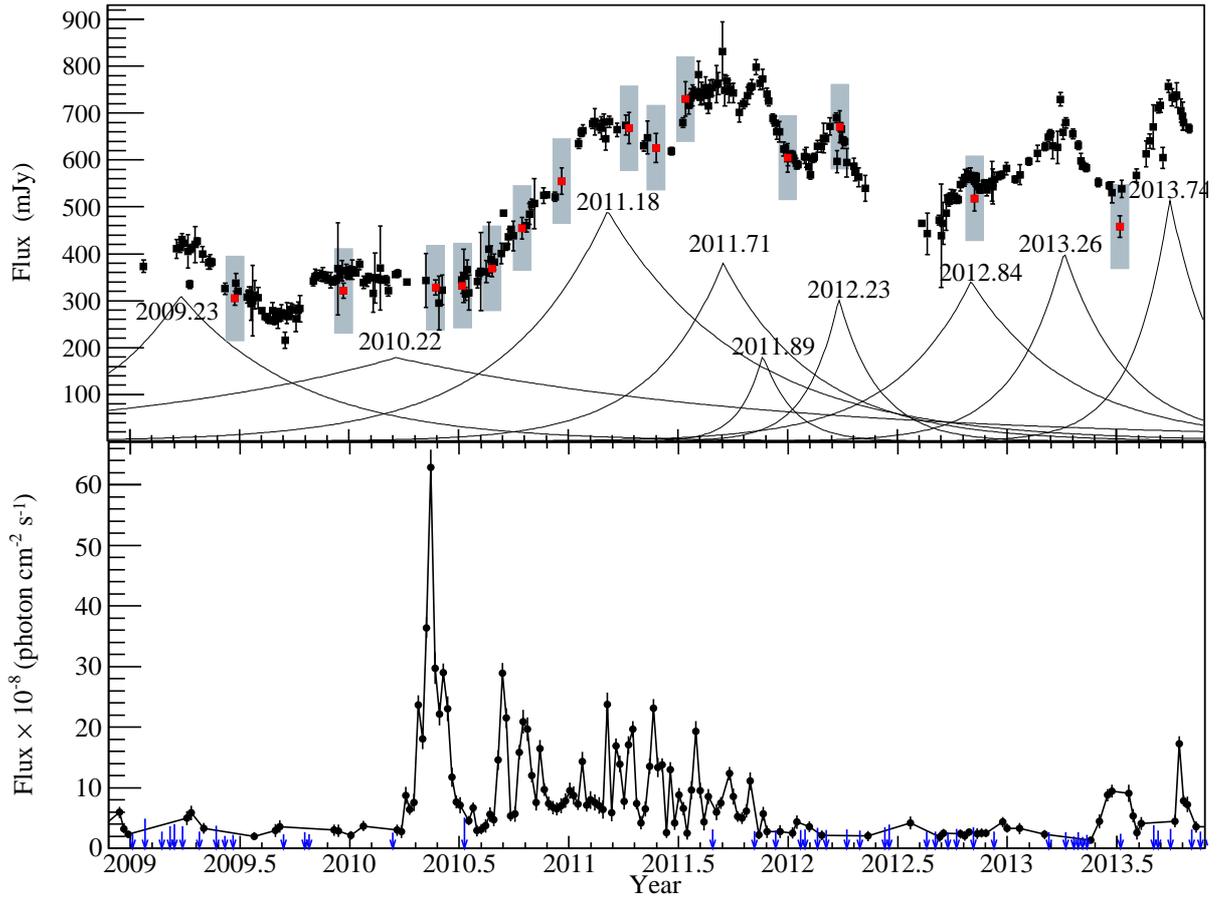


Рисунок 4.2 — Панель сверху: Кривая блеска от источника в рамках программ мониторинга OVRO (черные точки), VLBA и MOJAVE (красные квадраты и серые прямоугольники) на частоте 15 ГГц. Панель снизу: кривая блеска в диапазоне энергий 0.1–200 ГэВ с недельным усреднением потока. Измерения верхних пределов по уровню 3σ даны синими стрелками. По горизонтальной оси отложено время (годы), по вертикальной – плотность потока (панель сверху, мЯн) и полный поток (панель снизу, количество фотонов в секунду в cm^2). Совместный результат диссертанта из работы [A3].

Ранее квазар не исследовался детально, а его наблюдения выполнялись в рамках нескольких программ мониторинга. Однако в 2010 г., космическая обсерватория *Fermi*, ведущая наблюдения источника с 2008 г. [213], зарегистрировала мощную вспышку в γ -диапазоне (ГэВ диапазон энергий) в квазаре [214]. Это событие послужило триггером для интенсивного мониторинга источника другими наземными и космическими обсерваториями (например, [215; 216]). В том числе, была организована программа многократных многочастотных наблюдений квазара радиоинтерферометром VLBA. Совместный анализ данных, полученных в широком частотном диапазоне (см. таблицу 4.1 и рисунок 4.2), позволил провести детальное изучение свойств квазара. Результаты этих исследований приведены ниже.

Радио наблюдения VLBA на частотах 4–43 ГГц

Наблюдения квазара S4 1030+61 на радиointерферометре VLBA были выполнены в рамках проекта мониторинга блазаров, испытывающих очень яркие вспышки в ГэВ диапазоне (код «S2087E») в 2010 г. в течение четырех сессий: 24 мая, 9 июля, 28 августа и 18 октября. Все 10 антенн интерферометра были задействованы. Наблюдения произведены в следующих частотных диапазонах: С, Х, U, К и Q (см. также таблицу 1.2), которые соответствуют длинам волн 6, 4, 2, 1.3 и 0.7 см, соответственно. Обработка данных была произведена согласно процедурам, описанным в §1.2. При этом точность определения амплитуды составила приблизительно 5% на 5–8 ГГц и 10% на 15–43 ГГц.

Радио наблюдения в рамках программы MOJAVE VLBA

Мы дополнили наш анализ наблюдениями квазара, выполненными в рамках программы мониторинга радиоисточников MOJAVE. Эти наблюдения проведены на радиointерферометре VLBA на частоте 15 ГГц и находятся в открытом доступе для использования. Обработка и калибровка данных описана в работе [42]. При этом, точность амплитудной калибровки составляет 5% [11], а точность определения угла линейной поляризации – около 5° [11; 82]. Наблюдения квазара выполнены в течение 10 сеансов, перечисленных в таблице 4.1 и показанных на рисунке 4.2 (красными квадратами и серыми прямоугольниками совместно с четырьмя многочастотными VLBA эпохами).

Радио наблюдения 40-м телескопом OVRO

Источник S4 1030+61 включен в список мониторинга 40-метровым телескопом радиоастрономической обсерватории в Оуэнс Вэлли Калифорнийского технологического института ([217]; *англ.* Owens Valley Radio Astronomy Observatory of Caltech, OVRO). Наблюдения выполнены на частоте 15 ГГц в полосе 3 ГГц с 20 июня 2008 г. по 21 января 2014 г. Калиброванные данные готовы к использованию и находятся в открытом доступе¹⁵. Кривая блеска квазара показана на рисунке 4.2 черными точками.

Данные мониторинга *Fermi*/LAT в ГэВ диапазоне

Исследуемый квазар был внесен в каталог ярких источников космической обсерватории *Fermi* [213], наблюдения которых проводились в рамках программы

¹⁵<http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars/>

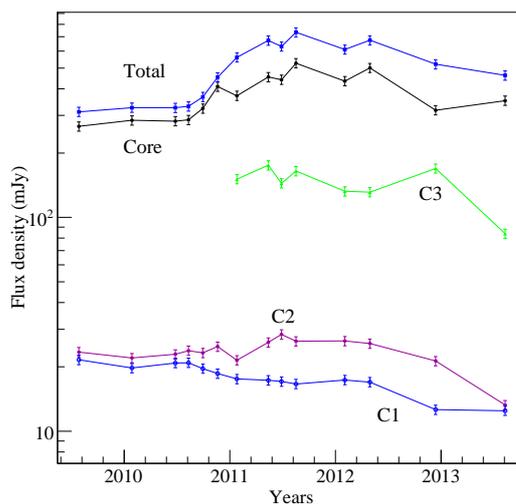


Рисунок 4.3 — Кривая блеска компонентов струи S4 1030+61 на 15 ГГц в 2009–2014 гг. по результатам анализа данных наблюдений на VLBA, в т.ч. в программе MOJAVE. По горизонтальной оси отложено время (годы), по вертикальной оси – плотность потока (мЯн). Результат диссертанта из работы [А3].

обзора [218]. Наблюдения квазара выполнены телескопом LAT (*англ.* Large Area Telescope) на борту *Fermi* в диапазоне энергий 0.1–200 ГэВ в период с 4 августа 2008 г. по 23 февраля 2014 г. Эти данные являются свободными для использования и доступны на сайте обсерватории¹⁶. Обработка этих данных выполнена в программном пакете Fermi Science Tools¹⁷ (версия v10r0p5, pass 8 data) согласно стандартной процедуре, описанной, например, в работе [219]. Усреднение данных во времени производилось с шагом одна неделя, что обусловлено слабой интенсивностью излучения от источника в этом диапазоне частот. Если величина интегральной интенсивности в этом интервале времени превосходила, по крайней мере, уровень 3σ , то результат считался достоверным. Иначе, только верхняя оценка интенсивности от источника доступна. На рисунке 4.2 приведена результирующая кривая блеска S4 1030+61.

4.3 Обсуждение и результаты

4.3.1 Структура струи и скорости компонентов

Из рисунка 4.1 следует, что наблюдения VLBA сделаны в моменты, когда источник проходит разные стадии активности: как в моменты сильных вспышек (например, эпохи 2011-07-15 и 2012-03-27), так и в «тихом» состоянии (например, эпоха 2010-05-24). Для проведения анализа и определения параметров

¹⁶<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/>

¹⁷<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/>

струи источника, было проведено моделирование его структуры согласно методике, описанной в §1.7. В анализе участвовали данные, выполненные на телескопе VLBA на всех длинах волн (четыре эпохи), а также 10 эпох MOJAVE. При этом все частотные диапазоны моделировались независимо друг от друга. В результате модель источника была представлена пятью компонентами на низких частотах (4–8 ГГц), четырьмя на средних частотах (15–24 ГГц) и тремя на 43 ГГц. Рисунок 4.1 показывает смоделированную структуру S4 1030+61 на 15 ГГц (результаты для остальных частот даны в работе [A3]). Все компоненты, за исключением ядра на 4.6–15.4 ГГц до эпохи 2010-12-24, описывались круговыми двумерными гауссианами. Ядро до момента отделения от него компонента С3 было представлено в виде эллиптической гауссианы, вытянутой в направлении распространения джета. Только три детали струи (ядро, С2 и С3) видны на радиоизображениях источника во всем частотном диапазоне.

Рисунок 4.3 показывает кривые блеска всех смоделированных компонентов струи источника на 15 ГГц. Видно, что ядерный компонент доминирует в излучении источника на 15 ГГц. Это указывает на то, что временная переменность потока, в том числе показанная на рисунке 4.1, происходит в компактном начале струи квазара.

Поскольку данные на 15 ГГц получены в течение продолжительного промежутка времени (почти четыре года), они были использованы для анализа кинематики струи. Эти данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, то есть соответствуют равномерному движению. Определение видимой скорости компонентов β_{app} (в единицах скорости света c) из наблюдаемой угловой скорости движения μ выполнялось согласно соотношению:

$$\beta_{app} = \mu \frac{D_L}{(1+z)}, \quad (4.1)$$

где D_L – расстояние по светимости ($D_L = \sqrt{L/4\pi F}$, где L – болометрическая светимость, F – болометрический поток). В результате, видимая скорость компонентов С2 и С3 составила $(6.4 \pm 0.4) c$ и $(2.7 \pm 0.7) c$, соответственно. Даты рождения деталей струи определялись моментом, когда их положение совпадало с положением ядра. Для компонентов С2 и С3 они составили 2000.0 ± 0.7 г. и 2007.4 ± 1.2 г., соответственно. При этом деталь джета С3 впервые отделяется от ядра в эпоху 2010-12-24. Компонент С1 не изменяет значимо свое положение в пространстве со временем.

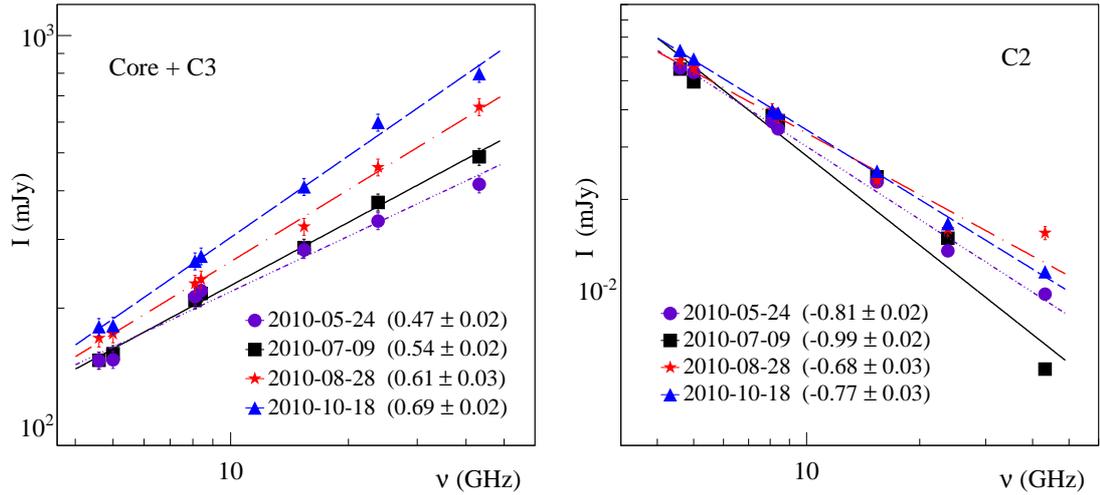


Рисунок 4.4 — Спектральное распределение плотности потока в ядерной области (панель слева) и компоненте C2 (панель справа) квазара S4 1030+61, полученное в четырех сеансах наблюдений 2010 г. Результаты подгонки данных степенным законом вида $I \propto \nu^\alpha$ приведены на панелях. По горизонтальной оси отложена частота наблюдений (ГГц), по вертикальной оси — плотность потока (мЯн). Результат диссертанта из работы [A3].

4.3.2 Поведение спектрального индекса и его связь с вбросом плазмы в начале струи

Компонента струи C2, которая видна на картах всех частот наблюдений с 4.6 по 43 ГГц, имеет спектральный индекс $\alpha = -(0.82 \pm 0.2)$ (см. рисунок 4.4), что обусловлено оптически тонким синхротронным излучением. Наклон ее спектра существенно не изменяется за четыре эпохи наблюдений. Тем временем, ядро квазара показывает инвертированный спектр, который приведен на рисунке 4.4. Наклон спектра увеличивается со временем с 0.47 ± 0.02 в 2010-05-24 на 0.69 ± 0.02 в 2010-10-18. Даты этих многочастотных наблюдений совпадают с началом радиовспышки в середине 2010 г. (см. рисунок 4.1). Это указывает на то, что изменение спектра в ядре квазара может быть обусловлено вбросом плотной горячей плазмы в основании струи [220] и потерями энергии [189], сопровождающие развитием радиовспышки.

4.3.3 Моделирование кривой блеска на 15 ГГц набором вспышек

Анализ кривых блеска струйных выбросов АЯГ в радиодиапазоне показывает, что поведение источников хорошо представляется суперпозицией двух фаз: активной и спокойной [221]. При этом активная фаза может быть представлена серией отдельных вспышек, время нарастания и спад которых происходит по

экспоненциальному закону [190]:

$$\Delta S(t) = \begin{cases} \Delta S_{\max} e^{(t-t_{\max})/\tau}, & t < t_{\max}, \\ \Delta S_{\max} e^{(t_{\max}-t)/1.3\tau}, & t > t_{\max}, \end{cases} \quad (4.2)$$

где ΔS_{\max} – максимальная амплитуда вспышки в Ян, происходящая в момент времени t_{\max} (дни), τ – время роста вспышки в днях.

Таким образом, моделируя кривую блеска индивидуальными вспышками, можно определить такие параметры источника как [222–224]: нижний предел на наблюдаемую яркостную температуру ($T_{b,\text{var}}$), Лоренц-фактор (Γ_{var}), Доплер-фактор (δ_{var}) и угол наблюдения к лучу зрения (ϑ_{var}).

Нижний предел на наблюдаемую яркостную температуру в системе, связанной с источником, определяется [224] как:

$$T_{b,\text{var}} = 1.548 \times 10^{-32} \frac{\Delta S_{\max} D_L^2}{\nu^2 \tau^2 (1+z)} \text{К}, \quad (4.3)$$

где расстояние D_L измеряется в метрах, частота наблюдения ν – в ГГц. Доплер-фактор, отвечающий за релятивистское усиление излучения, определяется из наблюдений как [222]:

$$\delta_{\text{var}} = \left(\frac{T_{b,\text{var}}}{T_{b,\text{eq}}} \right)^{1/3}, \quad (4.4)$$

где внутренняя яркостная температура $T_{b,\text{eq}}$ соответствует значению температуры в режиме равнораспределения между плотностями энергий магнитного поля и излучающих частиц [8]. Лоренц-фактор и угол наблюдения струи к лучу зрения определяются выражениями [223]:

$$\Gamma_{\text{var}} = \frac{\beta_{\text{app}}^2 + \delta_{\text{var}}^2 + 1}{2\delta_{\text{var}}}, \quad (4.5)$$

$$\vartheta_{\text{var}} = \arctan \frac{2\beta_{\text{app}}}{\beta_{\text{app}}^2 + \delta_{\text{var}}^2 - 1}. \quad (4.6)$$

Результаты моделирования кривой блеска источника S4 1030+61 набором отдельных вспышек представлены на рисунке 4.2 (панель сверху, тонкие линии). Для оценки параметров струи использовалась самая быстрая вспышка. Это объясняется тем, что скорее всего в такой вспышке высвечивается вся энергия в данном объеме, и вероятность возникновения другой вспышки в этот промежуток мала. Моделирование кривой блеска квазара S4 1030+61 показало наличие девяти отдельных вспышек. Самая быстрая вспышка в течение 2009–2014 гг. произошла 2011-11-18. Ее амплитуда составила (183 ± 10) мЯн, а время ее нарастания (39 ± 7) дней. Используя параметры этой вспышки, измерена

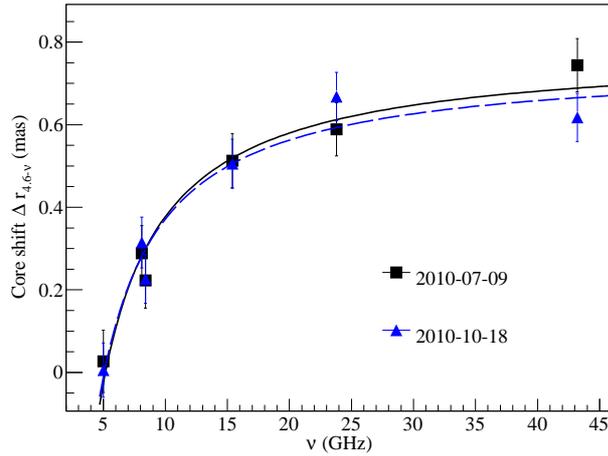


Рисунок 4.5 — Видимый сдвиг ядра с частотой в квазаре S4 1030+61. Подгонка данных функцией $a\nu^{-1} + b$ показана линиями. По горизонтальной оси отложена частота наблюдений (ГГц), по вертикальной оси – сдвиг ядра (мсек дуги). Результат диссертанта из работы [А3].

$T_{b,var} = (3.55 \pm 1.14) \times 10^{14}$ К и произведена оценка Доплер-фактора $\delta_{var} = 15$ в предположении постоянства этого значения вдоль струи. В сочетании со скоростями компонентов С2 (6.4 ± 0.4) с и С3 (2.7 ± 0.7) с, этот анализ дает следующие оценки параметров струи: $\Gamma_{var} = 9.0 \pm 1.1$ и $\vartheta_{var} = 2^\circ 7 \pm 0^\circ 6$ (деталь струи С2), и $\Gamma_{var} = 7.9 \pm 1.0$ и $\vartheta_{var} = 1^\circ 3 \pm 0^\circ 4$ (деталь струи С3). Величины этих параметров являются типичными для подобных АЯГ [225; 226].

Моделирование структуры источника (§4.3.1) показало, что самый последний компонент струи квазара образовался в (2007.4 ± 1.2) г. Это событие произошло раньше этих наблюдений, и мало вероятно, что компонент С3 является источником активности квазара в 2011–2012 гг. Этот результат подтверждает выводы параграфа 4.3.1 о том, что наблюдаемая активность источника в радиодиапазоне происходит в его РСДБ ядре. Отсутствие новых компонентов струи в течение вспышечной активности источника может объясняться тем, что возмущение, ответственное за излучение в гамма-диапазоне, рассеивается при прохождении поверхности $\tau \approx 1$, когда излучение становится видимым в радиодиапазоне.

4.3.4 Положение РСДБ ядра и оценка напряженности магнитного поля

Эффект синхротронного самопоглощения в начале релятивистских струй вызывает смещение положения видимого начала струи r_{core} с частотой (известен как сдвиг ядра, *англ.* «core shift»; [3; 95; 227]) в виде: $r_{core}(\nu) \propto \nu^{-1/k_r}$. Коэффициент k_r определяется в рамках данной модели физическими свойствами в

РСДБ ядре как:

$$k_r = \frac{(3 - 2\alpha)b + 2n - 2}{5 - 2\alpha}, \quad (4.7)$$

где коэффициенты l , n и b представляют собой степенные индексы зависимости ширины струи ($d \propto r^l$), плотности ($n_e \propto r^{-n}$) и напряженности магнитного поля ($B \propto r^{-b}$) с расстоянием вдоль струи r .

Таким образом более высокая частота позволяет наблюдать области, находящиеся ближе к центральной машине АЯГ. Измерения сдвига ядра в наблюдениях основаны на предположении о том, что оптически тонкое синхротронное излучение струи на разных частотах возникает в одних и тех же областях струй, находящихся на одинаковом расстоянии от ядра (например, [64; 228]). Таким образом, совмещая карты источника на разных частотах относительно положения оптически тонкого компонента, измеряется сдвиг ядра.

Активное состояние источника не позволило получить достоверных данных сдвигов ядра в эпохи 2010-05-24 и 2010-08-28. Подгонка данных наблюдений в эпохи 2010-07-09 и 2010-10-18 зависимостью $r_{\text{core}}(\nu) = a\nu^{-1/k_r} + b$ (параметры a , b и k_r определяются в процессе подгонки) дает большие ошибки измерений коэффициента k_r . Для дальнейшего анализа значение параметра было зафиксировано $k_r = 1$. Выбор этого значения сделан в рамках предположения о конечной форме струи, и наличии синхротронного самопоглощения в ядре и равномерном распределении энергии магнитного поля и излучающих частиц [3]. Измерения сдвига ядра в большом количестве АЯГ [20; 65; 151; 228] показывает, что значение параметра $k_r = 1$ хорошо согласуется с наблюдениями. В параграфе 4.3.5 будет показано, что яркостная температура деталей струи в эпохи 2010-05-24–2010-10-18 согласуется с этими предположениями.

Результаты подгонки наших данных зависимостью $r_{\text{core}}(\nu) = a\nu^{-1} + b$ представлены на рисунке 4.5. Мера смещения положения ядра между всеми парами частот наблюдений $\Omega_{r\nu}$ была определена, используя выражение [95]:

$$\Omega_{r\nu} = 4.85 \cdot 10^{-9} \frac{\Delta r D_L}{(1+z)^2} \cdot \frac{\nu_1 \nu_2}{\nu_2 - \nu_1} \text{ пс} \cdot \text{ГГц}, \quad (4.8)$$

где Δr – измеряемый сдвиг ядра (в мсек дуги) между парой частот ν_1 и ν_2 ($\nu_1 < \nu_2$, ГГц), а расстояние D_L дано в парсеках. Средняя величина $\Omega_{r\nu}$ между всеми парами частот наблюдений составила $\Omega_{r\nu} = (32 \pm 8)$ пс·ГГц [20].

Используя результаты секции 4.3.3, можно оценить абсолютное расстояние от видимого начала струи квазара r_{core} до истинного начала релятивистской

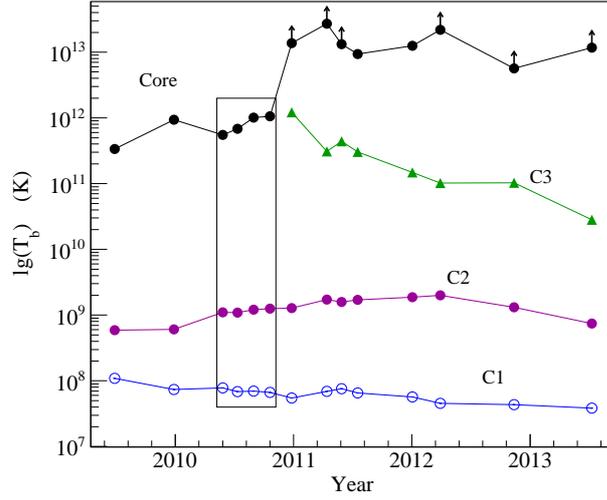


Рисунок 4.6 — Эволюция во времени яркостной температуры компонентов струи квазара S4 1030+61 на 15 ГГц. Прямоугольником показаны даты многочастотного мониторинга на VLBA. Измерения нижних пределов даны стрелками. По горизонтальной оси отложена дата наблюдений (г.), по вертикальной оси – яркостная температура (К). Результат диссертанта из работы [A3].

струи [95]:

$$r_{\text{core}} = \frac{\Omega_{r\nu}}{\nu \sin \vartheta} \approx \frac{\Omega_{r\nu} \sqrt{1 + \beta_{\text{app}}^2}}{\nu}. \quad (4.9)$$

Согласно современным представлениям (например, [13]), релятивистская струя образуется уже на расстоянии нескольких гравитационных радиусов от ЧД АЯГ. Это величина меньше наших оценок r_{core} . В то же время абсолютное расстояние РСДБ ядра от ЧД в радиодиапазоне составляет примерно $10^3 - 10^4 R_g$ [62]. Из-за разницы между этими двумя величинами в три-четыре порядка, выражение (4.9) дает оценку расстояния от видимого начала струи АЯГ до ее центральной машины. Подставляя ранее определенные параметры, следует, что видимое РСДБ ядро квазара на 15 ГГц находится на расстоянии (14 ± 2) пк от ЧД, что является типичным расстоянием для подобных объектов [20].

Оценка напряженности магнитного поля на расстоянии 1 пк от ЧД АЯГ может быть произведена с использованием [151; 228; 229]:

$$B_1 \simeq 0.025 \left(\frac{\Omega_{r\nu}^3 (1+z)^3}{\delta^2 \phi \sin^2 \vartheta} \right)^{1/4} G, \quad (4.10)$$

где ϕ – половинный угол раскрытия джета. Для оценки можно предположить $2\phi \simeq 0.26 \Gamma^{-1}$ [230]. Подстановка параметров дает оценку напряженности магнитного поля в струе S4 1030+61 на расстоянии 1 пк от ЧД приблизительно (2.2 ± 0.3) Гс. При условии уменьшения напряженности магнитного поля с расстоянием вдоль струи в виде $B_{\text{core}} = B_1 r^{-1}$, ее величина составит (0.16 ± 0.02) Гс в местоположении ядра, видимого на 15 ГГц.

4.3.5 Яркостьная температура и оценка физических параметров

Одной из характеристик нетеплового излучения является яркостьная температура, и для компонента струи с распределением интенсивности в виде эллиптического Гаусса определяется как [118]:

$$T_{b,obs} = 1.22 \times 10^{12} \frac{S(1+z)}{\psi_{maj}\psi_{min}\nu^2} \text{К}. \quad (4.11)$$

В уравнении S – плотность потока радиокомпонента (Ян), ν – частота наблюдений (ГГц), ψ_{maj} и ψ_{min} – полные ширины на половине максимума (*англ.* Full Width Half Maximum, FWHM) эллиптического Гаусс-компонента вдоль большой и малой осей, соответственно (мсек дуги), z – красное смещение источника.

Поведение яркостьной температуры для компонентов струи квазара на 15 ГГц показано на рисунке 4.6. Учитывая Доплеровское усиление, внутренняя яркостьная температура T_b может быть определена из наблюдаемой величины как $T_{b,int} = T_{b,obs}/\delta$ [8]. Используя оценку $\delta \sim 15$, полученную в параграфе 4.3.3, значение средней яркостьной температуры в видимом начале струи квазара близко к величине равномерного распределения $T_{b,eq}$ в первые шесть VLBA эпох (2009-06-25–2010-10-18). После отделения компонента СЗ от ядерного компонента (начиная с эпохи 2010-12-24), яркостьная температура ядра составила примерно 3.3×10^{11} К, что выше величины равномерного распределения. Это говорит о том, что плотность энергии излучающих частиц существенно превышает плотность энергии магнитного поля в ядре в течение сильной активности в 2011-2014 гг., что может являться результатом инъекции плотной плазмы в видимое начало струи во вспышечной фазе источника.

Поскольку яркостьная температура определяется физическими параметрами области излучения, то наблюдения могут быть использованы для оценки параметров этой среды. Если предположить, что струя АЯГ является стабильным течением релятивистской плазмы (то есть отсутствуют плазменные неустойчивости и ударные волны) с постоянным Лоренц-фактором и имеет коническую форму, а зависимость электронной плотности, напряженности магнитного поля и поперечного размера струи являются степенными функциями удаления от РСДБ ядра (см. выражение (4.7)), то яркостьная температура оптически тонкого синхротронного излучения является степенной функцией расстояния вдоль струи и ее поперечного размера [150]:

$$T_{b,jet} \propto r^{-f}, T_{b,jet} \propto d^{-\xi}, f = -l + n + b(1 - \alpha). \quad (4.12)$$

Степенные индексы в выражении такие же, что и в выражении (4.7).

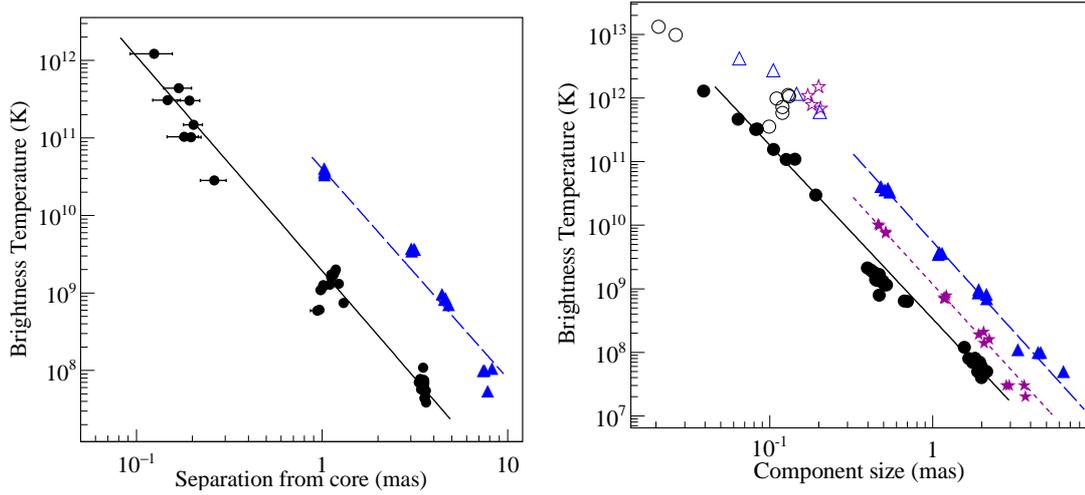


Рисунок 4.7 — Зависимость яркостной температуры компонентов струи квазара S4 1030+61 от расстояния вдоль струи (панель слева) и размера оптически прозрачной компоненты струи (панель справа). Результаты подгонки данных степенным законом приведены на панелях. Черные кружки соответствуют 15 ГГц, фиолетовые звездочки – 8.1 ГГц и синие треугольники – 4.6 ГГц. По горизонтальной логарифмической оси отложено расстояние вдоль струи и размер компонента (мсек дуги), по вертикальной логарифмической оси – яркостная температура (К). Результат диссертанта из работы [А3].

Изменение яркостной температуры с расстоянием от ядра и размером смоделированных компонентов струи S4 1030+61 показана на рисунке 4.7 на частотах 4.6–15.4 ГГц в четырех эпохах наблюдений. На рисунке явно видно, что T_b хорошо следует степенному закону. Результаты подгонки данных зависимостями, представленными зависимостью (4.12), дает $f = 2.74 \pm 0.05$ и $\xi \approx 2.78$.

Наблюдения показывают [231], что увеличение ширины струи l с удалением от ядра можно оценить как $l \approx f/\xi$. Используя полученные ранее оценки кинематических параметров струи квазара S4 1030+61, индекс равен $l \approx 1$. Комбинируя вырезания (4.7) и (4.12), а также используя спектральный индекс компонента C2 $\alpha = -(0.82 \pm 0.2)$, мы получаем следующие значения индексов: $n = 1.7$ и $b = 1.1$. Эти результаты указывают на наличие равномерного распределения между плотностью энергии магнитного поля и релятивистских частиц в оптически прозрачных областях струи S4 1030+61.

4.3.6 Гамма-излучение и его связь с радиодиапазоном

Кривая блеска источника в диапазоне энергий 0.1–200 ГэВ представлена на рисунке 4.2. На рисунке ярко выделяется период сильной активности квазара между эпохами 2010-04-01 и 2011-11-25. Исследование связи этой активности со вспышечной активностью в радиодиапазоне было проведено с помощью дискретного кросс-корреляционного анализа данных [232; 233]. Анализ не показы-

вает значимой корреляции между этими диапазонами, что может объясняться различными масштабами переменности: изменение потока в гамма-диапазоне должно происходить на более коротких временных интервалах из-за меньшего размера области излучения на этих длинах волн. Другая возможная причина: изменение направления распространения струи [124; 234]. В этом случае возникающее гамма-излучение из-за релятивистских эффектов может быть видно под бóльшими углами к лучу зрения, нежели радиоизлучение. И вследствие этого, иметь поток ниже предела регистрации *Fermi*. Изображения источника на высоких частотах показывают, что струя квазара действительно меняет свое направление распространения: с -170° на расстоянии 0.2 мсек дуги от ядра на 166° на расстоянии 5 мсек дуги.

Очевидно, что визуально кривые блеска в гамма- и радиодиапазонах показывают выраженную активность в близкие периоды времени. Ковалев и др. [99] и Пушкарев и др. [198] показали, что ядро релятивистских струй является наиболее вероятным местом, в котором происходит активность в этих двух диапазонах. В связи с этим можно предположить, что пик активности квазара в ГэВ диапазоне (2010-04-15) связан с радиовспышкой 2011-03-07. В этом предположении, расстояние между областями струи, где образуется гамма- и радиоизлучение (см. [198]), составляет (0.80 ± 0.11) лет или (12 ± 2) пк. В §4.3.4 была произведена оценка абсолютного положения 15 ГГц РСДБ ядра от центральной машины АЯГ источника, которое составило (14 ± 2) пк. В результате получается, что гамма-излучение возникает на расстоянии (2 ± 2) пк от черной дыры S4 1030+61.

Масштаб временной переменности, Δt , γ -кривой блеска также может быть использован для оценки области, в котором рождается это излучение [85]. Согласно этому подходу, размер излучающей области R не должен превышать размеров $R \leq \Delta t \delta c$. Для оценки был использован средний масштаб переменности γ -излучения S4 1030+61, соответствующий двум неделям (см. рисунок 4.1). Маловероятно, что существует значимая переменность γ -излучения источника на масштабах дней¹⁸. Подстановка этого значения дает размер R меньше 0.18 пк. Моделирование компонентов струи показывает, что размер ядра источника на 43 ГГц составляет 0.014 мсек дуги или (0.12 ± 0.07) пк. В то же время, абсолютное положение 43 ГГц ядра от черной дыры оценивается нами примерно в (1.3 ± 1.2) пк. В результате, областью возникновения гамма-излучения может быть видимое начало струи на 43 ГГц.

¹⁸https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc/

Таблица 4.2 — Величина и направление линейной поляризации в ядре квазара S4 1030+61, видимого на 15 ГГц, в 2009–2014 гг. Результат диссертанта из работы [А3].

Дата	m (%)	p (мЯн/луч)	σ_p (мЯн/луч)	χ (град.)
2009-06-25	0.97	2.35	0.21	20.91
2009-12-26	1.27	3.35	0.16	41.89
2010-05-24	1.11	2.84	0.17	48.51
2010-07-09	2.95	7.47	0.17	67.52
2010-08-28	2.35	6.73	0.17	68.88
2010-10-18	1.28	4.71	0.16	96.46
2010-12-24	3.64	16.91	0.15	80.44
2011-04-11	3.34	18.68	0.17	59.05
2011-05-26	4.02	21.63	0.17	53.79
2011-07-15	0.78	4.86	0.15	105.02
2012-01-02	0.75	3.81	0.16	62.88
2012-03-27	2.09	11.67	0.14	73.48
2012-11-11	4.63	19.90	0.15	83.68
2013-07-08	2.95	10.97	0.16	80.02

4.3.7 Поляризационные свойства и связь с активностью источника

Струя источника показывает значимый поляризационный поток только в ядре. В таблице 4.2 и на рисунке 4.8 показана величина и направление поляризации ядра квазара на 15 ГГц в 2009–2014 гг. Из этих данных видно, что обе величины не показывают корреляции с полной интенсивностью радиоизлучения.

Степень поляризации имеет сложную зависимость от длины волны наблюдений (см. рисунок 4.9). В то же время поляризационный угол увеличивает свое

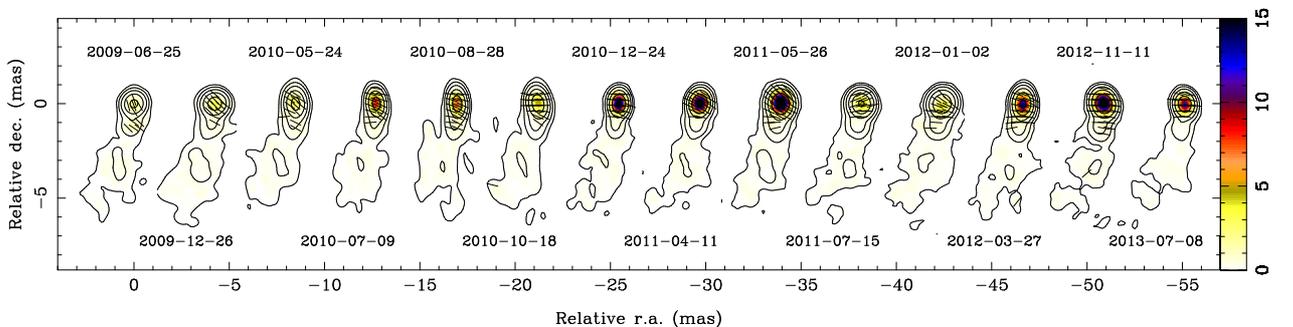


Рисунок 4.8 — Величина интенсивности (цвет) и наблюдаемое направление (линии) линейной поляризации ядра квазара S4 1030+61, совмещенные с контурами полной интенсивности на 15 ГГц. По горизонтальной оси отложено относительное прямое восхождение (мсек дуги), по вертикальной оси – относительное склонение (мсек дуги). Цветовая схема линейно поляризованной интенсивности дана в мЯн/луч. Результат диссертанта из работы [А3].

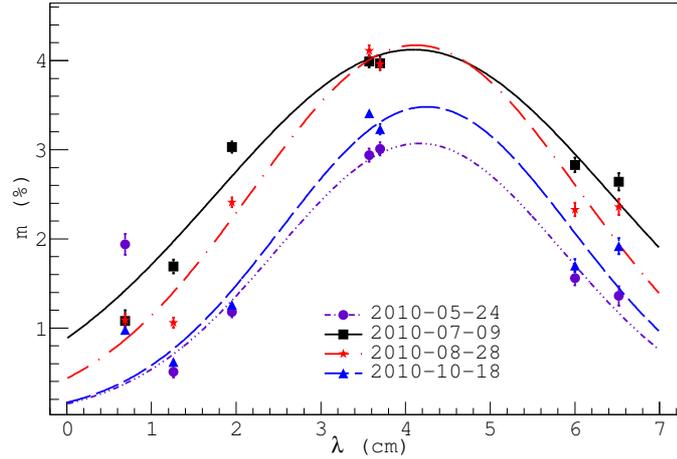


Рисунок 4.9 — Зависимость степени линейной поляризации от длиной волны в ядре квазара S4 1030+61. Подгонка данных функцией Гаусса показана линиями. По горизонтальной оси отложена длина волны (см), по вертикальной оси — степень линейной поляризации (проценты). Результат диссертанта из работы [A3].

Таблица 4.3 — Фарадеевское вращение в ядре квазара S4 1030+61 в рад/м². Результат диссертанта из работы [A3].

Дата	Диапазон частот (ГГц)		
	4.6–8.4	8.1–15.4	15.4–43.2
2010-05-24	203 ± 36	40 ± 50	−4874 ± 152
2010-07-09	100 ± 49	−250 ± 73	1004 ± 46
2010-08-28	71 ± 54	−181 ± 73	12 ± 69
2010-10-18	33 ± 70	−430 ± 104	1093 ± 74

вращение в сторону коротких длин волн (см. рисунок 4.10), т.е. проявляется тенденция увеличения величины фарадеевского вращения на коротких длинах волн (см. таблицу 4.3). Такое поведение поляризационных характеристик может объясняться в рамках нескольких моделей: (1) аномальной деполаризации ([34], см. также §3.1), (2) спектральной деполаризации [96] или (3) несколькими компонентами фарадеевских мер вращения [97]. Установить, какой эффект в действительности имеет место в ядре квазара, сложно. Близкое расположение нового компонента С3 к ядру может объяснять эффект (2), в то же время существование неразрешенного компонента в ядре, имеющей отличное фарадеевское вращение, ответственно за эффект (3). Наличие аномальной деполаризации (1), вызванной спиралевидным полем в этой области, также вероятно.

Мера вращения испытывает вариации во времени (см. рисунок 4.10 и таблицу 4.3). При этом степень поляризации в интервале 4.6–23.4 ГГц увеличивается в первые три VLBA эпохи наблюдений. Такое поведение может являться указанием на компрессию (сжатие) магнитного поля во время развития вспышки

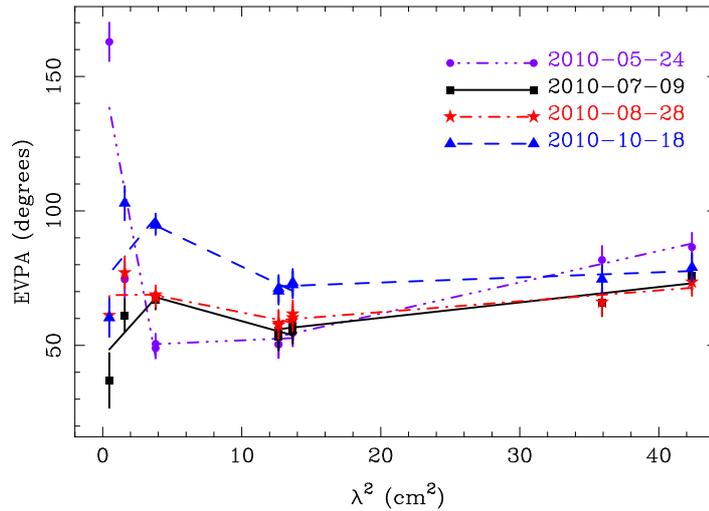


Рисунок 4.10 — Зависимость угла линейной поляризации от квадрата длины волны в ядре квазара S4 1030+61 в четырех эпохах наблюдений. Линиями показана линейная аппроксимация данных наблюдений, которая определяет фарадеевское вращение. По горизонтальной оси отложен квадрат длины волны наблюдений (см^2), по вертикальной оси — направление вектора линейной поляризации (град.). Результат диссертанта из работы [A3].

(см., например, модель взаимодействия возмущения с ударной волной [235]), в результате чего степень поляризации и фарадеевская мера вращения ядра увеличиваются.

Временная переменность поляризационных характеристик ядра квазара с 2009 по 2013 гг. показана на рисунке 4.8. В связи с отсутствием наблюдений источника на другой длине волны нежели 15 ГГц в эти эпохи, мера вращения не может быть определена. Таким образом, вариации направления EVPA могут быть вызваны как изменением меры вращения во времени, так и направлением магнитного поля. Оценка фарадеевского вращения на 15 ГГц составляет приблизительно несколько сотен рад/ м^2 . Это вызывает вращение EVPA не больше 7° на этой частоте. Таким образом, представленное направление поляризационного угла на рисунке скорее соответствует вариациям магнитного поля в струе, а доминирующей в поле является тороидальная компонента.

К настоящему моменту, автору работы известно несколько источников, в которых зафиксирована связь временной переменности фарадеевской меры вращения с активностью источника. Это 3C 273 и 3C 279 [78; 236], Markarian 421 [237], VL Lacertae [207] и 3C 120 [136].

Помимо этого есть источники, чья вспышечная активность также объясняется изменением плотности частиц и напряженности магнитного поля, например, [220; 238]. Результаты параграфа 4.3.2, высокая яркостная температура ядра квазара ($\geq 3.3 \cdot 10^{11}$ К), и временная переменность фарадеевского вращения подтверждают это предположение.

Недавно, Смит и др. [239] сообщил о необычном поведении оптического поляризованного потока в источнике S4 1030+61 в 2016 г. Авторы работы заключают, что необычное частотно-зависимое поведение поляризации объясняется вариацией магнитного поля в области струи, по мере движения вещества вдоль струи. Эти выводы подтверждают результаты нашей работы о том, что активность квазара в гамма- и радиодиапазоне происходит в его релятивистской струе, сопровождаемая изменениями плотности частиц, ориентацией и, возможно, напряженностью магнитного поля.

4.4 Выводы

Данные многократного, многочастотного мониторинга позволили впервые провести подробный анализ квазара S4 1030+61 на парсековых масштабах во время мощной гамма-вспышки. Были исследованы и определены физические параметры объекта в радио- и гамма-диапазонах в рамках модельных предположений [3; 8], а также исследован вопрос о месте генерации высокоэнергичного излучения и его распространении вдоль струйного выброса квазара. В том числе, получены следующие результаты:

1. Исследована структура и кинематика струи источника, в том числе идентифицировано три компонента струи, два из которых движутся с видимой сверхсветовой скоростью ((2.7 ± 0.7) с и (6.4 ± 0.4) с).
2. Проведено моделирование кривой блеска источника за пять лет наблюдений, которое выявило наличие девяти вспышек. Самая быстрая вспышка в источнике (2011-11-18) позволила произвести оценку параметров струи: Лоренц-фактор $\Gamma_{\text{var}} = 9.02 \pm 1.10$, Доплер-фактор $\delta_{\text{var}} \approx 15$ и угол наблюдения струи $\vartheta_{\text{var}} = 2.7 \pm 0.6$.
3. Произведена модельная оценка напряженности магнитного поля струи, которая на расстоянии 1 пк от ядра составляет (2.2 ± 0.3) Гс, и убывает с расстоянием от ядра по закону $B \propto r^{-1.1}$. При этом плотность частиц следует зависимости $n_e \propto r^{-1.7}$, а ширина струи увеличивается пропорционально расстоянию от начала струи.
4. Самая мощная гамма-вспышка в источнике может быть ассоциирована с одной из сильнейших радио-вспышек. При этом области, где рождается гамма- и радио-излучение, видимое на 15 ГГц, разнесены в пространстве на (12 ± 2) пк. Измерения сдвига ядра показывают, что ядро, видимое на

15 ГГц, расположено на расстоянии ~ 14 пк от центральной черной дыры АЯГ. Совместно с анализом размеров ядра, видимого на 43 ГГц (≤ 0.12 пк), и масштаба временной переменности кривой блеска в γ -диапазоне (≤ 0.18 пк). Этот анализ показывает, что гамма-излучение может возникать в ядре релятивистской струи S4 1030+61, видимого на 43 ГГц.

5. Обнаружена временная переменность направления и величины линейной поляризации ядра струи, в том числе изменение фарадеевской меры вращения, сопутствующие активному состоянию квазара.
6. Увеличение наклона спектра ядерной области струи в течение развития одной из сильнейших радиовспышек, относительно высокая внутренняя яркостная температура ядра ($\geq 3.3 \cdot 10^{11}$ К) и изменение поляризационных свойств струи говорят о том, что вспышечная активность источника сопровождается вбросом плотного вещества в начало струи и компрессией магнитного поля, и может быть связана с изменением направления распространения струи.

Заключение

В процессе проведения научных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Получены новые РСДБ карты фарадеевской меры вращения для 21 квазара 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 спиралевидного магнитного поля во внешних областях струй, наличие которого предсказывается большинством теоретических и аналитических моделей активных ядер галактик.

2. Определены действующие деполяризационные механизмы и физические свойства вещества, окружающего релятивистские струи 20 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. Фарадеевский экран может содержать упорядоченные магнитные поля, однако вклад хаотично ориентированных магнитных полей существенен. Построены новые РСДБ карты ориентации истинного позиционного угла электрического вектора 20 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 на протяжении 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 предложено рассматривать структуру струйных выбросов активных ядер галактик 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.

По итогам исследования нами показано наличие степенного увеличения фарадеевской меры вращения по мере приближения к центральной машине активного ядра галактики. Это указывает на возможное существование плотных областей с сильными магнитными полями, образующих фарадеевское вращение 10^5 - 10^9 рад/м², в окрестности сверхмассивной черной дыры. В данной работе показана эффективность метода синтеза фарадеевских мер вращения [88] для выделения и исследования таких вращений. Его использование в перспективе для поиска экстремально больших мер вращения в широкополосных высокочастотных наблюдениях АЯГ позволит существенно продвинуться в вопросе состава и свойств этих объектов. Например, регистрация экстремально больших вращений позволит подтвердить модели АЯГ с протонными струями или когерентным механизмом излучения [17], привлекающиеся для объяснения отдельных наблюдательных характеристик АЯГ (например, высокие яркостные температуры в проекте РадиоАстрон [12]), однако пока не нашедшие широкого применения и активного развития. В рамках этого подхода нами уже поставлены и проведены в 2015 г. уникальные наблюдения на телескопе VLA (руководитель заявки Кравченко Е.В.), аппаратура которого позволяет регистрировать космический сигнал в очень широкой полосе (полоса 24 ГГц на частотах 15–48 ГГц) и с очень высоким разрешением (2 МГц). Подобные наблюдения еще ни разу не проводились, и их анализ существенно дополнит исследования в данной области.

Я выражаю глубокую благодарность:

- *Научному руководителю Юрию Юрьевичу Ковалеву за возможность проведения научной работы, создание комфортной обстановки в рабочей группе, терпение и индивидуальный подход, ценные наставления, указания и руководство исследованиями;*
- *Всем сотрудникам отдела космической радиоастрономии АКЦ ФИАН за полезные научные обсуждения;*
- *Сотрудникам Пуцунской радиоастрономической обсерватории, а особенно Рустам Давудовичу Дагжесаманскому и Чайной компании, за ценные научные дискуссии и помощь в подготовке диссертации.*

Список иллюстраций

2.1	Схематическое представление областей возникновения фарадеевского вращения.	33
2.2	Зависимость угла линейной поляризации от квадрата длины волны в максимуме потока интенсивности на изображении радиогалактики 0710+438.	38
2.3	Гистограмма распределения фарадеевских мер вращения в семи АЯГ в течении трех сеансах наблюдений в восьми частотных диапазонах.	39
2.4	Мера вращения в радиогалактике 0710+439 и квазаре 1308+326 в течении трех эпох VLA наблюдений.	40
2.5	Степень и угол линейной поляризации в квазаре 3C 138.	42
2.6	Карты фарадеевской меры вращения в квазарах 3C 138 и 3C 147 на 44 ГГц.	44
2.7	VLBA карты фарадеевского вращения в 20 АЯГ в диапазоне 4.6–15.4 ГГц.	54
2.8	Распределение фарадеевского вращения в РСДБ ядрах и оптически тонких деталях струй 18 АЯГ по наблюдениям на VLBA.	73
2.9	Поперечные профили меры вращения в струях АЯГ по наблюдениям на VLBA	79
2.10	Карты фарадеевского вращения и поперечные срезы мер вращения в квазарах 0952+179, 1458+718 и 2201+315 на VLBA	81
2.11	Частотная зависимость параметров Стокса Q и U и результат синтеза фарадеевских мер вращения для магнетара J1745–2900 на частотах 4.85 и 8.35 ГГц на телескопе Эффельсберг.	85
2.12	Величина и позиционный угол линейной поляризации магнетара J1745–2900 на 44 ГГц на VLA.	88
2.13	Передаточная функция меры вращения и спектр фарадеевского вращения магнетара J1745–2900 на 44 ГГц на VLA.	89
3.1	Распределение степени линейной поляризации в струях 20 АЯГ на частотах 4.6–15.4 ГГц	100

3.2	Зависимость степени линейной поляризации от квадрата длины волны в струях исследуемых 20 АЯГ в диапазоне 4.6–15.4 ГГц . . .	102
3.3	Распределение разницы между направлением распространения струи и направлением угла линейной поляризации в струх 20 АЯГ	106
3.4	Карты ориентации и величины линейной поляризации, скорректированные за фарадеевское вращение, в 20 АЯГ в диапазоне 1.4–15.4 ГГц	113
4.1	РСДБ изображение квазара S4 1030+61 на 15 ГГц в период с 2009 по 2013 гг.	141
4.2	Радио- и гамма-кривые блеска квазара S4 1030+61 в период с 2009 по 2014 гг.	142
4.3	Кривая блеска компонентов струи S4 1030+61 на 15 ГГц в 2009–2014 гг.	144
4.4	Спектральный индекс компонентов струи S4 1030+61 во время вспышки	146
4.5	Видимый сдвиг начала струи с частотой квазара S4 1030+61 . . .	148
4.6	Эволюция во времени яркостной температуры компонентов струи квазара S4 1030+61 на 15 ГГц.	150
4.7	Зависимость яркостной температуры струи S4 1030+61 от расстояния вдоль струи и размера компонентов	152
4.8	Величина интенсивности и направление линейной поляризации в ядре квазара S4 1030+61 на 15 ГГц	154
4.9	Зависимость степени линейной поляризации от длины волны наблюдений в ядре квазара S4 1030+61	155
4.10	Зависимость угла линейной поляризации от квадрата длины волны в ядре квазара S4 1030+61	156

Список таблиц

1.1	Список антенн радионтерферометра VLBA и их местоположение.	21
1.2	Частотные диапазоны радионтерферометра VLBA, используемые в работе	23
1.3	Частотные настройки наблюдений, выполненных на VLA.	24
2.1	Поляризационные калибраторы, наблюдаемые в программе мониторинга на VLA.	36
2.2	Исследуемые 20 АЯГ телескопом VLBA на частотах 1.4–15.4 ГГц в проекте «BK134»	49
2.3	Измеренные величины фарадеевского вращения в 20 АЯГ в проекте «BK134»	50
2.4	Величина Галактической меры вращения для 20 АЯГ проекта VLBA «BK134».	52
2.5	Измерения МВ в ядре лацертиды 1803+784	75
2.6	Значимые поперечные градиенты мер вращения в проекте VLBA «BK134»	82
3.1	Результаты моделирования наблюдаемых зависимостей $m - \lambda^2$ параметрическими функциями и физическими моделями в проекте VLBA «BK134»	99
3.2	Разница ориентации EVPA и направления распространения струи в 20 АЯГ проекта VLBA «BK134»	107
4.1	Сводная информация об используемых наблюдениях S4 1030+61.	141
4.2	Поляризационные свойства ядра квазара S4 1030+61, видимого на 15 ГГц, в 2009–2014 гг.	154
4.3	Фарадеевское вращение в ядре квазара S4 1030+61	155

Используемые единицы измерений и аббревиатуры

Даты представлены в формате ISO 8601¹⁹: ГГГГ-ММ-ДД, где «Г» - год, «М» - месяц, «Д» - день.

Наименование источников выполнено согласно рекомендациям Международного астрономического союза [240]. Экваториальные координаты без буквенного обозначения в имени объекта приведены для эпохи 1950.0, в то время как символ «J» в наименовании источника соответствует координатам эпохи 2000.0.

Единицы измерения

Гс – Гаусс

Гц – герц

К – градусы Кельвина

эВ – электронвольт

мсек – миллисекунда

пк – парсек

рад/м² – радиан на квадратный метр

с – секунда

Ян – Янский

Аббревиатуры

АЯГ – активное ядро галактики

МВ – мера вращения

РСДБ – радионтерферометрия со сверхдлинными базами

ЧД – черная дыра

BLR – Broad Line Region

EVPA – Electric Vector Position Angle

¹⁹<http://www.iso.org/iso/ru/home/standards/iso8601.htm>

HPBW – Half Power Beam Width

LAT – Large Area Telescope

MOJAVE – Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments

NLR – Narrow Line Region

NRAO – National Radio Astronomy Observatory

OVRO – Owens Valley Radio Astronomy observatory

RM – Rotation Measure

VLA – Very Large Array

VLBA – Very Long Baseline Array

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. Rees M. J. Black Hole Models for Active Galactic Nuclei // Annu. Rev. Astron Astrophys. — 1984. — Vol. 22. — P. 471–506.
5. Meier D. L. Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm. — Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2012.
6. 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.
7. Rees M. J. Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources // Nature. — 1966. — Vol. 211. — P. 468–470.
8. Readhead A. C. S. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 426. — P. 51–59.
9. Wagner S. J., Witzel A. Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects // Annu. Rev. Astron Astrophys. — 1995. — Vol. 33. — P. 163–198.
10. 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.
11. 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.

12. 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.* — 2016. — Vol. 820. — P. L9.
13. Meier D. L., Koide S., Uchida Y. Magnetohydrodynamic Production of Relativistic Jets // *Science.* — 2001. — Vol. 291. — P. 84–92.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Кардашев Н. С. Синхротронное радиоизлучение от протонов и электронов в пульсарах и квазарах. // *Астрон. журн.* — 2000. — Vol. 77. — P. 813.
18. Böttcher M., Reimer A., Sweeney K., Prakash A. Leptonic and Hadronic Modeling of Fermi-detected Blazars // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 768. — P. 54.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

23. 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.
24. Field G. B., Rogers R. D. Radiation from magnetized accretion disks in active galactic nuclei // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 403. — P. 94–109.
25. Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J. Theory of extragalactic radio sources // *Reviews of Modern Physics*. — 1984. — Vol. 56. — P. 255–351.
26. 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.
27. 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.
28. Marscher A. P. Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. 87.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Zakamska N. L., Begelman M. C., Blandford R. D. Hot Self-Similar Relativistic Magnetohydrodynamic Flows // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 679. — P. 990–999.
33. 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.
34. 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.

35. Farnes J. S., Gaensler B. M., Carretti E. A Broadband Polarization Catalog of Extragalactic Radio Sources // *Astrophys. J. Suppl.* — 2014. — Vol. 212. — P. 15.
36. 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.
37. Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой // *Известия вузов «Радиофизика».* — 1965. — Vol. 8. — P. 651.
38. Cotton W. D. Obit: A Development Environment for Astronomical Algorithms // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2008. — Vol. 120. — P. 439–448.
39. Cotton W. D., Kravchenko E. V. Differential Instrumental Polarization Calibration // *Obit Development Memo Series.* — 2014. — Vol. 39. — P. 1–4.
40. Beckmann V., Shrader C. R. *Active Galactic Nuclei.* — Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2012.
41. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson Jr. G. W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, 2nd Edition. — New York : Wiley, 2001.
42. Lister M. L., Aller H. D., Aller M. F. et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. V. Multi-Epoch VLBA Images // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 137. — P. 3718–3729.
43. Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D. et al. MOJAVE. X. Parsec-scale Jet Orientation Variations and Superluminal Motion in Active Galactic Nuclei // *Astron. J.* — 2013. — Vol. 146. — P. 120.
44. Deller A. T., Tingay S. J., Bailes M., West C. DiFX: A Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2007. — Vol. 119. — P. 318–336.
45. Greisen E. W. AIPS, the VLA, and the VLBA // *Astrophysics and Space Science Library 285, Information Handling in Astronomy – Historical Vistas /* Ed. by A. Heck. — Dordrecht: Kluwer, 2003. — P. 109.
46. Shepherd M. C., Pearson T. J., Taylor G. B. DIFMAP: an interactive program for synthesis imaging. // *Bulletin of the American Astronomical Society.* —

- Vol. 26 of *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 1994. — P. 987–989.
47. Shepherd M. C. *Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging // Astronomical Data Analysis Software and Systems VI / Ed. by G. Hunt, H. Payne.* — Vol. 125 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1997. — P. 77.
 48. Ginzburg V. L., Syrovatskii S. I. *Cosmic Magnetobremstrahlung (synchrotron Radiation) // Annu. Rev. Astron Astrophys.* — 1965. — Vol. 3. — P. 297.
 49. Rybicki G. B., Lightman A. P. *Radiative Processes in Astrophysics.* — Hoboken, New Jersey : Wiley-VCH, 1986. — P. 400.
 50. Leppänen K. J. *22 GHz polarimetric imaging with the Very Long Baseline Array : Ph. D. thesis ; , Helsinki Univ. of Technology, (1995).* — 1995.
 51. Roberts D. H., Wardle J. F. C., Brown L. F. *Linear polarization radio imaging at milliarcsecond resolution // Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 427. — P. 718–744.
 52. Perley R. A., Butler B. J. *Integrated Polarization Properties of 3C48, 3C138, 3C147, and 3C286 // Astrophys. J. Suppl.* — 2013. — Vol. 206. — P. 16.
 53. Conway R. G., Kronberg P. P. *Interferometric measurement of polarization distribution in radio sources // Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1969. — Vol. 142. — P. 11.
 54. Fomalont E. B., Wright M. C. H. *Interferometry and Aperture Synthesis // Galactic and Extra-Galactic Radio Astronomy / Ed. by G. L. Verschuur, K. I. Kellermann, V. van Brunt.* — New York : Springer-Verlag, 1974. — P. 127.
 55. Cotton W. D. *Calibration and imaging of polarization sensitive Very Long Baseline Interferometer observations // Astron. J.* — 1993. — Vol. 106. — P. 1241–1248.
 56. Gómez J. L., Marscher A. P., Alberdi A. et al. *Polarization Calibration of the VLBA Using the D-terms. // VLBA Scientific Memo.* — 2002. — Vol. 30.
 57. Taylor G. B., Myers S. T. *Polarization Angle Calibration Using the VLA Monitoring Program. // VLBA Scientific Memo.* — 2000. — Vol. 26.
 58. Högbom J. A. *Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // Astron. Astrophys. Rev.* — 1974. — Vol. 15. — P. 417.

59. Cotton W. D. High dynamic range wideband imaging // *Orbit Development Memo Series*. — 2010. — Vol. 19. — P. 1–9.
60. Marscher A. P. Probes of the Inner Jets of Blazars // *Proceedings of the National Academy of Science*. — 1995. — Vol. 92. — P. 11439–11441.
61. Marscher A. P. The Core of a Blazar Jet // *Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma Ray* / Ed. by T. A. Rector, D. S. De Young. — Vol. 386 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2008. — P. 437.
62. Lobanov A. P., Zensus J. A. Extragalactic Relativistic Jets and Nuclear Regions in Galaxies // *Relativistic Astrophysics Legacy and Cosmology - Einstein's Legacy* / Ed. by B. Aschenbach, V. Burwitz, G. Hasinger, B. Leibundgut. — 2007. — P. 449.
63. Shen Y., Richards G. T., Strauss M. A. et al. A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Vol. 194. — P. 45.
64. Walker R. C., Dhawan V., Romney J. D. et al. VLBA Absorption Imaging of Ionized Gas Associated with the Accretion Disk in NGC 1275 // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 530. — P. 233–244.
65. Sokolovsky K. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Lobanov A. P. A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. I. Evidence of dominating synchrotron opacity // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A38.
66. Faraday M. // *Faraday's Diary* / Ed. by T. Martin. — Vol. 4. — London: Bell & Sons, 1933. — P. 264.
67. Burn B. J. On the depolarization of discrete radio sources by Faraday dispersion // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1966. — Vol. 133. — P. 67.
68. Cooper B. F. C., Price R. M. Faraday Rotation Effects associated with the Radio Source Centaurus A // *Nature*. — 1962. — Vol. 195. — P. 1084–1085.
69. Gardner F. F., Whiteoak J. B. Polarization of Radio Sources and Faraday Rotation Effects in the Galaxy // *Nature*. — 1963. — Vol. 197. — P. 1162–1164.
70. Taylor A. R., Stil J. M., Sunstrum C. A Rotation Measure Image of the Sky // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 702. — P. 1230–1236.

71. Mao S. A., Gaensler B. M., Haverkorn M. et al. A Survey of Extragalactic Faraday Rotation at High Galactic Latitude: The Vertical Magnetic Field of the Milky Way Toward the Galactic Poles // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 714. — P. 1170–1186.
72. Van Eck C. L., Brown J. C., Stil J. M. et al. Modeling the Magnetic Field in the Galactic Disk Using New Rotation Measure Observations from the Very Large Array // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 728. — P. 97.
73. Jansson R., Farrar G. R. A New Model of the Galactic Magnetic Field // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 757. — P. 14.
74. Oppermann N., Junklewitz H., Robbers G. et al. An improved map of the Galactic Faraday sky // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 542. — P. A93.
75. Han J. Pulsars as excellent probes for the magnetic structure in our Milky Way // *IAU Symposium* / Ed. by J. van Leeuwen. — Vol. 291 of IAU Symposium. — 2013. — P. 223–228.
76. Akahori T., Ryu D. Faraday Rotation Measure Due to the Intergalactic Magnetic Field // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 723. — P. 476–481.
77. Akahori T., Ryu D. Faraday Rotation Measure due to the Intergalactic Magnetic Field. II. The Cosmological Contribution // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 738. — P. 134.
78. Taylor G. B. Magnetic Fields in Quasar Cores. II. // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 533. — P. 95–105.
79. Pasetto A., Kraus A., Mack K.-H. et al. A study of a sample of high rotation-measure AGNs through multifrequency single-dish observations // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A117.
80. Anderson C. S., Gaensler B. M., Feain I. J. A Study of Broadband Faraday Rotation and Polarization Behavior over 1.3–10 GHz in 36 Discrete Radio Sources // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 825. — P. 59.
81. Zavala R. T., Taylor G. B. A View through Faraday's Fog: Parsec-Scale Rotation Measures in Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 589. — P. 126–146.

82. Hovatta T., Lister M. L., Aller M. F. et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VIII. Faraday Rotation in Parsec-scale AGN Jets // *Astron. J.* — 2012. — Vol. 144. — P. 105.
83. 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.
84. Algaba J. C. High-frequency very long baseline interferometry rotation measure of eight active galactic nuclei // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 429. — P. 3551–3563.
85. Jorstad S. G., Marscher A. P., Lister M. L. et al. Polarimetric Observations of 15 Active Galactic Nuclei at High Frequencies: Jet Kinematics from Bimonthly Monitoring with the Very Long Baseline Array // *Astron. J.* — 2005. — Vol. 130. — P. 1418–1465.
86. Plambeck R. L., Bower G. C., Rao R. et al. Probing the Parsec-scale Accretion Flow of 3C 84 with Millimeter Wavelength Polarimetry // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 797. — P. 66.
87. de Bruyn A. G. RM-synthesis via Wide-Band Low Frequency Polarimetry // *Tech. Rep. NFRA Note.* — 1996. — Vol. 655.
88. Brentjens M. A., de Bruyn A. G. Faraday rotation measure synthesis // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 441. — P. 1217–1228.
89. Bell M. R., Enßlin T. A. Faraday synthesis. The synergy of aperture and rotation measure synthesis // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 540. — P. A80.
90. Bower G. C., Wright M. C. H., Falcke H., Backer D. C. Interferometric Detection of Linear Polarization from Sagittarius A* at 230 GHz // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 588. — P. 331–337.
91. 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.* — 1999. — Vol. 518. — P. L87–L90.
92. Mertens F., Lobanov A. P., Walker R. C., Hardee P. E. Kinematics of the jet in M 87 on scales of 100-1000 Schwarzschild radii // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A54.

93. Laing R. A., Bridle A. H. Relativistic models and the jet velocity field in the radio galaxy 3C 31 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 336. — P. 328–352.
94. Aloy M. A., Ibáñez J. M., Martí J. M. et al. High-Resolution Three-dimensional Simulations of Relativistic Jets // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 523. — P. L125–L128.
95. Lobanov A. P. Ultracompact jets in active galactic nuclei // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 330. — P. 79–89.
96. Conway R. G., Haves P., Kronberg P. P. et al. The radio polarisation of quasars. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1974. — Vol. 168. — P. 137–162.
97. Goldstein Jr. S. J., Reed J. A. Double Faraday rotation toward 3C 27 // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 283. — P. 540–545.
98. Larionov V., Jorstad S., Marscher A., Smith P. Polarization Vector Rotations: Real, Spurious, Hidden and Imaginary // *Galaxies.* — 2016. — Vol. 4. — P. 43.
99. Kovalev Y. Y., Aller H. D., Aller M. F. et al. The Relation Between AGN Gamma-Ray Emission and Parsec-Scale Radio Jets // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 696. — P. L17–L21.
100. Perley R. A., Butler B. J. An Accurate Flux Density Scale from 1 to 50 GHz // *Astrophys. J. Suppl.* — 2013. — Vol. 204. — P. 19.
101. Mantovani F., Mack K.-H., Montenegro-Montes F. M. et al. Effelsberg 100-m polarimetric observations of a sample of compact steep-spectrum sources // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 502. — P. 61–65.
102. Rossetti A., Dallacasa D., Fanti C. et al. The B3-VLA CSS sample. VII. WSRT polarisation observations and the ambient Faraday medium properties revisited // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 487. — P. 865–883.
103. An T., Hong X. Y., Hardcastle M. J. et al. Kinematics of the parsec-scale radio jet in 3C 48 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 402. — P. 87–104.
104. Spinrad H., Marr J., Aguilar L., Djorgovski S. A third update of the status of the 3CR sources - Further new redshifts and new identifications of distant galaxies // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1985. — Vol. 97. — P. 932–961.

105. Cotton W. D., Dallacasa D., Fanti C. et al. Dual frequency VLBI polarimetric observations of 3C 138. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 325. — P. 493–501.
106. Cotton W. D., Dallacasa D., Fanti C. et al. Polarimetry of GPS and CSS Sources // *Publ. Astron. Soc. Aust.* — 2003. — Vol. 20. — P. 12–15.
107. Cotton W. D., Dallacasa D., Fanti C. et al. The Faraday screen near the nucleus of the CSS quasar 3C 138 // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 406. — P. 43–50.
108. Junor W., Salter C. J., Saikia D. J. et al. Large differential Faraday rotation in the compact steep-spectrum quasar 3C 147 and jet-medium interactions // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1999. — Vol. 308. — P. 955–960.
109. Rossetti A., Mantovani F., Dallacasa D. et al. VLBA polarimetric observations of the CSS quasar 3C 147 // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 504. — P. 741–749.
110. Inoue M., Tabara H., Kato T., Aizu K. Search for High Rotation Measures in Extragalactic Radio Sources I. Multi-Channel Observations at 10 GHz // *Publ. Astron. Soc. Japan.* — 1995. — Vol. 47. — P. 725–737.
111. Udomprasert P. S., Taylor G. B., Pearson T. J., Roberts D. H. Evidence for Ordered Magnetic Fields in the Quasar Environment // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 483. — P. L9–L12.
112. Peterson B. M. Reverberation mapping of active galactic nuclei // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1993. — Vol. 105. — P. 247–268.
113. Osterbrock D. E. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei.* — Mill Valley, CA : University Science Books, 1989.
114. Spitzer L. *Physical processes in the interstellar medium.* — New York : Wiley, 1978.
115. Laing R. A. Brightness and Polarization Structure of Decelerating Relativistic Jets // *Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars* / Ed. by P. E. Hardee, A. H. Bridle, J. A. Zensus. — Vol. 100 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 1996. — P. 241.
116. McKinney J. C. General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 368. — P. 1561–1582.

117. Broderick A. E., McKinney J. C. Parsec-scale Faraday Rotation Measures from General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Active Galactic Nucleus Jets // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 725. — P. 750–773.
118. Kovalev Y. Y., Lobanov A. P., Pushkarev A. B., Zensus J. A. Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 483. — P. 759–768.
119. Fey A. L., Clegg A. W., Fomalont E. B. VLBA Observations of Radio Reference Frame Sources. I. // *Astrophys. J. Suppl.* — 1996. — Vol. 105. — P. 299.
120. Véron-Cetty M.-P., Véron P. A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. A10.
121. Porth O., Fendt C., Meliani Z., Vaidya B. Synchrotron Radiation of Self-collimating Relativistic Magnetohydrodynamic Jets // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 737. — P. 42.
122. Tsinganos K., Bogovalov S. Magnetic collimation of relativistic outflows in jets with a high mass flux // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 337. — P. 553–558.
123. Trippe S., Neri R., Krips M. et al. The first IRAM/PdBI polarimetric millimeter survey of active galactic nuclei. II. Activity and properties of individual sources // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 540. — P. A74.
124. Rani B., Krichbaum T. P., Marscher A. P. et al. Jet outflow and gamma-ray emission correlations in S5 0716+714 // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 571. — P. L2.
125. Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D. et al. MOJAVE: XIII. Parsec-scale AGN Jet Kinematics Analysis Based on 19 years of VLBA Observations at 15 GHz // *Astron. J.* — 2016. — Vol. 152. — P. 12.
126. Gabuzda D. C., Knuettel S., Reardon B. Transverse Faraday-rotation gradients across the jets of 15 active galactic nuclei // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 450. — P. 2441–2450.
127. Ветухновская Ю. Н., Габузда Д. Л., Якимов В. Е. Поляризационная структура цести гамма-кварзаров на 5 и 15 ГГц // *Астрон. журн.* — 2011. — Vol. 88. — P. 437–445.

128. Aaron S. E., Wardle J. F. C., Roberts D. H. A multi-frequency VLBA polarization study of 3C 309.1 // *Vistas in Astronomy*. — 1997. — Vol. 41. — P. 225–229.
129. Gabuzda D. C., Chernetskii V. A. Parsec-scale Faraday rotation distribution in the BL Lac object 1803+784 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 339. — P. 669–679.
130. Jorstad S. G., Marscher A. P., Stevens J. A. et al. Multiwaveband Polarimetric Observations of 15 Active Galactic Nuclei at High Frequencies: Correlated Polarization Behavior // *Astron. J.* — 2007. — Vol. 134. — P. 799–824.
131. Mahmud M., Gabuzda D. C., Bezrukovs V. Surprising evolution of the parsec-scale Faraday Rotation gradients in the jet of the BL Lac object B1803+784 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 400. — P. 2–12.
132. Agudo I., Thum C., Gómez J. L., Wiesemeyer H. A simultaneous 3.5 and 1.3 mm polarimetric survey of active galactic nuclei in the northern sky // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 566. — P. A59.
133. Kigure H., Uchida Y., Nakamura M. et al. Distribution of Faraday Rotation Measure in Jets from Active Galactic Nuclei. II. Prediction from Our Sweeping Magnetic Twist Model for the Wiggled Parts of Active Galactic Nucleus Jets and Tails // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 608. — P. 119–135.
134. Feretti L., Perley R., Giovannini G., Andernach H. VLA observations of the giant radio galaxy 3C 449 // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 341. — P. 29–43.
135. Asada K., Inoue M., Uchida Y. et al. A Helical Magnetic Field in the Jet of 3C 273 // *Publ. Astron. Soc. Japan.* — 2002. — Vol. 54. — P. L39–L43.
136. Gómez J. L., Roca-Sogorb M., Agudo I. et al. On the Source of Faraday Rotation in the Jet of the Radio Galaxy 3C 120 // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 733. — P. 11.
137. Nakamura M., Uchida Y., Hirose S. Production of wiggled structure of AGN radio jets in the sweeping magnetic twist mechanism // *New Astron.* — 2001. — Vol. 6. — P. 61–78.
138. Uchida Y., Kigure H., Hirose S. et al. Distribution of Faraday Rotation Measure in Jets from Active Galactic Nuclei. I. Predictions from our Sweeping Magnetic Twist Model // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 600. — P. 88–95.

139. Mizuno Y., Hardee P., Nishikawa K.-I. Three-dimensional Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Magnetized Spine-Sheath Relativistic Jets // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 662. — P. 835–850.
140. Gabuzda D. C., Mullan C. M., Cawthorne T. V. et al. Evolution of the milliarcsecond total intensity and polarization structures of BL Lacertae objects // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 435. — P. 140–161.
141. Pushkarev A. B., Gabuzda D. C., Vetukhnovskaya Y. N., Yakimov V. E. Spine-sheath polarization structures in four active galactic nuclei jets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 356. — P. 859–871.
142. Aaron S. VLBI Studies of MRK 501 and 0814+425 // *BL Lac Phenomenon* / Ed. by L. O. Takalo, A. Sillanpää. — Vol. 159 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1999. — P. 427.
143. Gabuzda D. C., Reichstein A. R., O’Neill E. L. Are spine-sheath polarization structures in the jets of active galactic nuclei associated with helical magnetic fields? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 444. — P. 172–184.
144. Zamaninasab M., Savolainen T., Clausen-Brown E. et al. Evidence for a large-scale helical magnetic field in the quasar 3C 454.3 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 436. — P. 3341–3356.
145. Gabuzda D. C., Knuettel S., Bonafede A. Evidence for a toroidal magnetic-field component in 5C 4.114 on kiloparsec scales // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 583. — P. A96.
146. Motter J., Gabuzda D. 18-22 cm VLBA Observational Evidence for Toroidal B-Field Components in Six AGN Jets // *Galaxies*. — 2016. — Vol. 4. — P. 18.
147. Taylor G. B., Zavala R. Are There Rotation Measure Gradients Across Active Galactic Nuclei Jets? // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 722. — P. L183–L187.
148. Taylor G. B., Inoue M., Tabara H. Anomalous rotation measures of the compact steep spectrum source 3C 318 // *Astron. Astrophys.* — 1992. — Vol. 264. — P. 421–427.
149. Taylor G. B. Magnetic Fields in Quasar Cores // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 506. — P. 637–646.

150. Kadler M., Ros E., Lobanov A. P. et al. The twin-jet system in NGC 1052: VLBI-scrutiny of the obscuring torus // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 426. — P. 481–493.
151. Zdziarski A. A., Sikora M., Pjanka P., Tchekhovskoy A. Core shifts, magnetic fields and magnetization of extragalactic jets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 451. — P. 927–935.
152. Blandford R. D., Znajek R. L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1977. — Vol. 179. — P. 433–456.
153. Tchekhovskoy A., Narayan R., McKinney J. C. Efficient generation of jets from magnetically arrested accretion on a rapidly spinning black hole // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 418. — P. L79–L83.
154. Urry C. M., Padovani P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1995. — Vol. 107. — P. 803.
155. Kennea J. A., Burrows D. N., Kouveliotou C. et al. Swift Discovery of a New Soft Gamma Repeater, SGR J1745-29, near Sagittarius A* // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 770. — P. L24.
156. Mori K., Gotthelf E. V., Zhang S. et al. NuSTAR Discovery of a 3.76 s Transient Magnetar Near Sagittarius A* // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 770. — P. L23.
157. Bower G. C., Deller A., Demorest P. et al. The Angular Broadening of the Galactic Center Pulsar SGR J1745-29: A New Constraint on the Scattering Medium // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. L2.
158. Spitler L. G., Lee K. J., Eatough R. P. et al. Pulse Broadening Measurements from the Galactic Center Pulsar J1745-2900 // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. L3.
159. Macquart J.-P., Bower G. C., Wright M. C. H. et al. The Rotation Measure and 3.5 Millimeter Polarization of Sagittarius A* // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 646. — P. L111–L114.
160. Marrone D. P., Moran J. M., Zhao J.-H., Rao R. The Submillimeter Polarization of Sgr A* // *Journal of Physics Conference Series.* — 2006. — Vol. 54. — P. 354–362.

161. Asada K., Nakamura M., Inoue M. et al. Multi-frequency Polarimetry toward S5 0836+710: A Possible Spine-Sheath Structure for the Jet // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 720. — P. 41–45.
162. MacDonald N. R., Marscher A. P., Jorstad S. G., Joshi M. Through the Ring of Fire: Gamma-Ray Variability in Blazars by a Moving Plasmoid Passing a Local Source of Seed Photons // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 804. — P. 111.
163. Gardner F. F., Whiteoak J. B. The Polarization of Cosmic Radio Waves // *Annu. Rev. Astron Astrophys.* — 1966. — Vol. 4. — P. 245.
164. Tribble P. C. Depolarization of extended radio sources by a foreground Faraday screen // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1991. — Vol. 250. — P. 726–736.
165. Homan D. C. Inverse Depolarization: A Potential Probe of Internal Faraday Rotation and Helical Magnetic Fields in Extragalactic Radio Jets // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 747. — P. L24.
166. Pacholczyk A. G., Swihart T. L. Polarization of Radio Sources. I. Homogeneous Source of Arbitrary Optical Thickness // *Astrophys. J.* — 1967. — Vol. 150. — P. 647.
167. Fukui M. Effects of Faraday Rotation on the Degree of Polarization in QSOs and Seyfert Galaxies // *Publ. Astron. Soc. Japan.* — 1973. — Vol. 25. — P. 181.
168. Jones T. W., Odell S. L. Transfer of polarized radiation in self-absorbed synchrotron sources. II. Treatment of inhomogeneous media and calculation of emergent polarization // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 215. — P. 236–246.
169. O’Sullivan S. P., Brown S., Robishaw T. et al. Complex Faraday depth structure of active galactic nuclei as revealed by broad-band radio polarimetry // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 421. — P. 3300–3315.
170. Kiehlmann S., Savolainen T., Jorstad S. G. et al. Polarization angle swings in blazars: The case of <ASTROBJ>3C 279</ASTROBJ> // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 590. — P. A10.
171. Schwarz Gideon. Estimating the dimension of a model // *The annals of statistics.* — 1978. — Vol. 6, no. 2. — P. 461–464.
172. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably

- supposed to have arisen from random sampling // *Philosophical Magazine Series*. — 1900. — Vol. (5)50. — P. 157–175.
173. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. Дополнительные главы. — Москва : Наука, 1975.
174. Laing R. A. Magnetic fields in extragalactic radio sources // *Astrophys. J.* — 1981. — Vol. 248. — P. 87–104.
175. Cawthorne T. V. Polarization of synchrotron radiation from conical shock waves // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 367. — P. 851–859.
176. Nalewajko K. Polarization of synchrotron emission from relativistic reconfinement shocks // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 395. — P. 524–530.
177. Pollack L. K., Taylor G. B., Zavala R. T. VLBI Polarimetry of 177 Sources from the Caltech-Jodrell Bank Flat-Spectrum Survey // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 589. — P. 733–751.
178. Gómez J. L., Marscher A. P., Jorstad S. G. et al. Faraday Rotation and Polarization Gradients in the Jet of 3C 120: Interaction with the External Medium and a Helical Magnetic Field? // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. L69.
179. Cawthorne T. V., Jorstad S. G., Marscher A. P. Polarization Structure in the Core of 1803+784: A Signature of Recollimation Shocks? // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 772. — P. 14.
180. Gabuzda D. C. VSOP observations of the compact BL Lacertae object 1803+784 // *New Astron. Rev.* — 1999. — Vol. 43. — P. 691–694.
181. Zavala R. T., Taylor G. B. A View through Faraday's Fog. II. Parsec-Scale Rotation Measures in 40 Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 612. — P. 749–779.
182. Asada K., Inoue M., Nakamura M. et al. Multifrequency Polarimetry of the NRAO 140 Jet: Possible Detection of a Helical Magnetic Field and Constraints on Its Pitch Angle // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 682. — P. 798–802.
183. Шоломицкий Г. Б. Флюктуации потока СТА 102 на волне 32,5 см // *Астрон. журн.* — 1965. — Vol. 42. — P. 673.

184. Dent W. A. Quasi-Stellar Sources: Variation in the Radio Emission of 3C 273 // *Science*. — 1965. — Vol. 148. — P. 1458–1460.
185. Ulrich M.-H., Maraschi L., Urry C. M. Variability of Active Galactic Nuclei // *Annu. Rev. Astron Astrophys.* — 1997. — Vol. 35. — P. 445–502.
186. Oke J. B. Spectrophotometric Observations of Rapid Variability in 3c 279 and 3c 446 // *Astrophys. J.* — 1967. — Vol. 147. — P. 901.
187. Quirrenbach A., Witzel A., Krichbaum T. et al. Rapid variability of extragalactic radio sources // *Nature*. — 1989. — Vol. 337. — P. 442–444.
188. Lyutikov M., Kravchenko E. V. Emission Knots and Polarization Swings of Swinging Jets // *Galaxies*. — 2016. — Vol. 4. — P. 75.
189. Marscher A. P., Gear W. K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273 // *Astrophys. J.* — 1985. — Vol. 298. — P. 114–127.
190. Valtaoja E., Lähteenmäki A., Teräsranta 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.
191. Mizuno Y., Lyubarsky Y., Nishikawa K.-I., Hardee P. E. Three-dimensional Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Current-driven Instability. III. Rotating Relativistic Jets // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 757. — P. 16.
192. Hoshino M., Lyubarsky Y. Relativistic Reconnection and Particle Acceleration // *Space Sci. Rev.* — 2012. — Vol. 173. — P. 521–533.
193. Nalewajko K. Applying Relativistic Reconnection to Blazar Jets // *Galaxies*. — 2016. — Vol. 4. — P. 28.
194. Marscher A. P., Jorstad S. G., D’Arcangelo F. D. et al. The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to- γ -ray outburst // *Nature*. — 2008. — Vol. 452. — P. 966–969.
195. Jorstad S. G., Marscher A. P., Mattox J. R. et al. Multiepoch Very Long Baseline Array Observations of EGRET-detected Quasars and BL Lacertae Objects: Connection between Superluminal Ejections and Gamma-Ray Flares in Blazars // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 556. — P. 738–748.
196. Valtaoja E., Teräsranta H. The relationship between gamma emission and radio flares in AGN. // *Astron. Astrophys. Rev.* — 1996. — Vol. 120. — P. C491.

197. Lähteenmäki A., Valtaoja E. Testing of Inverse Compton Models for Active Galactic Nuclei with Gamma-Ray and Radio Observations // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 590. — P. 95–108.
198. Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L. Radio/Gamma-ray Time Delay in the Parsec-scale Cores of Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 722. — P. L7–L11.
199. León-Tavares J., Valtaoja E., Tornikoski M. et al. The connection between gamma-ray emission and millimeter flares in Fermi/LAT blazars // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A146.
200. Fuhrmann L., Larsson S., Chiang J. et al. Detection of significant cm to sub-mm band radio and γ -ray correlated variability in Fermi bright blazars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 441. — P. 1899–1909.
201. Ramakrishnan V., León-Tavares J., Rastorgueva-Foi E. A. et al. The connection between the parsec-scale radio jet and γ -ray flares in the blazar 1156+295 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 445. — P. 1636–1646.
202. Karamanavis V., Fuhrmann L., Krichbaum T. P. et al. PKS 1502+106: A high-redshift Fermi blazar at extreme angular resolution. Structural dynamics with VLBI imaging up to 86 GHz // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A60.
203. Kutkin A. M., Sokolovsky K. V., Lisakov M. M. et al. The core shift effect in the blazar 3C 454.3 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 437. — P. 3396–3404.
204. Kinman T. D., Lamla E., Wirtanen C. A. The Optical Brightness Variations and Polarization of the Quasi-Stellar Radio Source 3c 446 // *Astrophys. J.* — 1966. — Vol. 146. — P. 964.
205. Aller H. D. The Polarization of Variable Radio Sources at 8 GHz. I. The Observations // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 161. — P. 1.
206. Marscher A. P., Jorstad S. G., Larionov V. M. et al. Probing the Inner Jet of the Quasar PKS 1510-089 with Multi-Waveband Monitoring During Strong Gamma-Ray Activity // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 710. — P. L126–L131.
207. Reynolds C., Cawthorne T. V., Gabuzda D. C. Faraday rotation in the VLBI core of BL Lacertae // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2001. — Vol. 327. — P. 1071–1080.

208. Asada K., Inoue M., Kameno S., Nagai H. Time Variation of the Rotation Measure Gradient in the 3C 273 Jet // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 675. — P. 79–82.
209. Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A., Preuss E. et al. The 5 GHz strong source surveys. IV - Survey of the area between declination 35 and 70 degrees and summary of source counts, spectra and optical identifications // *Astron. J.* — 1978. — Vol. 83. — P. 451–474.
210. Stickel M., Kuehr H. An update of the optical identification status of the S4 radio source catalogue // *Astron. Astrophys. Rev.* — 1994. — Vol. 103.
211. Schneider D. P., Richards G. T., Hall P. B. et al. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 139. — P. 2360.
212. Inada N., Oguri M., Shin M.-S. et al. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. V. Final Catalog from the Seventh Data Release // *Astron. J.* — 2012. — Vol. 143. — P. 119.
213. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. Spectral Properties of Bright Fermi-Detected Blazars in the Gamma-Ray Band // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 710. — P. 1271–1285.
214. Ciprini S. Fermi LAT detection of a GeV flare from the source 1FGL J1033.8+6048 // *The Astronomer's Telegram.* — 2010. — Vol. 2622.
215. Smith P. S., Bechetti G. J. Detection of an optical outburst from blazar S4 1030+61 // *The Astronomer's Telegram.* — 2010. — Vol. 2623.
216. Carrasco L., Carramiñana A., Recillas E. et al. NIR Flaring of S4 1030+61. // *The Astronomer's Telegram.* — 2010. — Vol. 2625.
217. Richards J. L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V. et al. Blazars in the Fermi Era: The OVRO 40 m Telescope Monitoring Program // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Vol. 194. — P. 29.
218. Atwood W. B., Abdo A. A., Ackermann M. et al. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 697. — P. 1071–1102.

219. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. The First Fermi Multifrequency Campaign on BL Lacertae: Characterizing the Low-activity State of the Eponymous Blazar // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 730. — P. 101.
220. Fromm C. M., Ros E., Perucho M. et al. Catching the radio flare in CTA 102. III. Core-shift and spectral analysis // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 557. — P. A105.
221. Savolainen T., Wiik K., Valtaoja E. et al. Connections between millimetre continuum variations and VLBI structure in 27 AGN // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 394. — P. 851–861.
222. Lähteenmäki A., Valtaoja E. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. III. Doppler Boosting Factors, Lorentz Factors, and Viewing Angles for Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 521. — P. 493–501.
223. Lähteenmäki A., Valtaoja E., Wiik K. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. II. Determining the Limiting Brightness Temperature for Synchrotron Sources // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 511. — P. 112–117.
224. Hovatta T., Valtaoja E., Tornikoski M., Lähteenmäki A. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 494. — P. 527–537.
225. Savolainen T., Homan D. C., Hovatta T. et al. Relativistic beaming and gamma-ray brightness of blazars // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 512. — P. A24.
226. Lister M. L., Aller M., Aller H. et al. γ -Ray and Parsec-scale Jet Properties of a Complete Sample of Blazars From the MOJAVE Program // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 742. — P. 27.
227. Marcaide J. M., Shapiro I. I. VLBI study of 1038 + 528 A and B - Discovery of wavelength dependence of peak brightness location // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 276. — P. 56–59.
228. O’Sullivan S. P., Gabuzda D. C. Magnetic field strength and spectral distribution of six parsec-scale active galactic nuclei jets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 400. — P. 26–42.

229. Hirotani K. Kinetic Luminosity and Composition of Active Galactic Nuclei Jets // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 619. — P. 73–85.
230. Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Savolainen T. Jet opening angles and gamma-ray brightness of AGN // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 507. — P. L33–L36.
231. Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y. Single-epoch VLBI imaging study of bright active galactic nuclei at 2 GHz and 8 GHz // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 544. — P. A34.
232. Edelson R. A., Krolik J. H. The discrete correlation function - A new method for analyzing unevenly sampled variability data // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 333. — P. 646–659.
233. Ramakrishnan V., Hovatta T., Nieppola E. et al. Locating the γ -ray emission site in Fermi/LAT blazars from correlation analysis between 37 GHz radio and γ -ray light curves // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 452. — P. 1280–1294.
234. Stirling A. M., Cawthorne T. V., Stevens J. A. et al. Discovery of a precessing jet nozzle in BL Lacertae // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 341. — P. 405–422.
235. Zhang H., Chen X., Böttcher M. et al. Polarization Swings Reveal Magnetic Energy Dissipation in Blazars // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 804. — P. 58.
236. Zavala R. T., Taylor G. B. Time-Variable Faraday Rotation Measures of 3C 273 and 3C 279 // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 550. — P. L147–L150.
237. Lico R., Giroletti M., Orienti M. et al. Very Long Baseline polarimetry and the γ -ray connection in Markarian 421 during the broadband campaign in 2011 // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 571. — P. A54.
238. D’Ammando F., Antolini E., Tosti G. et al. Long-term monitoring of PKS 0537-441 with Fermi-LAT and multiwavelength observations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 431. — P. 2481–2492.
239. Smith P. Sharp Polarimetric Eyes: More Trees than Forest? // *Galaxies.* — 2016. — Vol. 4. — P. 27.

240. Dubois P., Warren W. H., Mead J. M. et al. I.A.U. Astronomical Radiation Source Designation System // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1990. — Vol. 102. — P. 1231.