

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Морозова Дарья Адиковна

**Анализ возмущений в джетах блазаров с
сильным гамма-излучением**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н.

В. М. Ларионов

Санкт-Петербург – 2014

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Аппаратура. Методика наблюдений и обработка	16
1.1. Методика наблюдений в гамма-диапазоне и их обработка	16
1.2. Методика наблюдений в оптическом диапазоне и их обработка	22
1.3. Наблюдения в радиодиапазоне с помощью РСДБ и их обработка	30
Глава 2. Определение кинематики джетов на основе РСДБ-карт	43
2.1. Модель джета	43
2.2. Сверхсветовые движения и релятивистское усиление	46
2.3. Измерение собственных движений в джетах	49
2.4. Определение угла раскрытия джета	52
Глава 3. Блазар S4 0954+65	54
3.1. Литературный обзор	54
3.2. Анализ поляризации оптического излучения	56
3.3. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн	62
3.4. Обсуждение и выводы	69
Глава 4. Блазар S5 0716+71	72
4.1. Литературный обзор	72
4.2. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн	74
4.3. Обсуждение и выводы	79
Глава 5. Квазар PKS 1510-089	81
5.1. Литературный обзор	81
5.2. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн	82

5.3. Обсуждение и выводы	89
Глава 6. Блазар PKS 1222+216	91
6.1. Литературный обзор	91
6.2. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн	92
6.3. Обсуждение и выводы	98
Заключение	100
Список сокращений	101
Список литературы	102
Приложение А. S4 0954+658	118
Приложение Б. S5 0716+71	130
Приложение В. PKS 1510-089	141
Приложение Г. PKS 1222+216	152

Введение

Во Вселенной миллиарды галактик. Обычные галактики, такие как Млечный Путь, светят за счет суммы излучения всех звезд галактики. Однако существуют и другие галактики, большая часть излучения которых имеет нетепловую природу, такие галактики называются активными или галактиками с активными ядрами (АЯГ). Центральные области этих объектов имеют настолько высокую светимость, что доминируют над излучением подстилающей галактики. АЯГ составляют лишь небольшую долю от всех галактик, но они интенсивно изучаются во всех доступных диапазонах длин волн уже на протяжении 50 лет, поскольку физические процессы, происходящие в них, уникальны.

АЯГ имеют огромные светимости (превосходящие светимости обычных галактик в $10^3 - 10^4$ раз) и излучают в очень широком диапазоне частот, от радио (10^9 Гц) до гамма (10^{25} Гц). Практически у всех галактик с активными ядрами наблюдается переменность блеска, а некоторые имеют джеты, представляющие собой фокусированный поток ультрарелятивистской плазмы. Предполагается, что огромная энергия, излучаемая АЯГ, рождается в результате аккреции на сверхмассивную черную дыру ($M_{bh} \sim 10^{8 \pm 2} M_{\odot}$), находящуюся в центре подстилающей галактики.

На сегодняшний день основной моделью АЯГ является унифицированная схема [1, 2]. Эта модель объясняет наблюдаемые различия в свойствах АЯГ (радиогалактики, сейфертовские галактики, блазары) разной ориентацией системы относительно наблюдателя (см. Рис. 1).

Согласно унифицированной схеме, в центре АЯГ находится массивная черная дыра, окруженная аккреционным диском, за пределами аккреционного диска имеется молекулярный тор, содержащий пыль и дающий значительный вклад в инфракрасное излучение многих АЯГ. Считается, что в самом аккреционном диске магнитное поле турбулентно. Силовые линии магнитно-

го поля закручиваются из-за вращения аккреционного диска, что приводит к выбрасыванию джетов ультррелятивистской плазмы перпендикулярно плоскости диска. Формирование джета происходит в непосредственной близости от черной дыры. Джет может быть зарегистрирован в миллиметровом диапазоне с помощью РСДБ-наблюдений на расстояниях ≥ 100 гравитационных радиусов ($R_g = GM_{bh}/c^2$) [3, 4]. Видимое основание джета, так называемое “ядро”, как правило является наиболее яркой и компактной областью на РСДБ-картах. На расстояниях ~ 1 пк от черной дыры располагаются достаточно плотные облака газа ($N_e \sim 10^{10}$, ШЭЛ), дающие широкие эмиссионные линии в спектрах АЯГ, в то время как узкие эмиссионные линии рождаются в более разреженных областях ($N_e \sim 10^4$, УЭЛ), находящихся на килопарсековых расстояниях от черной дыры.

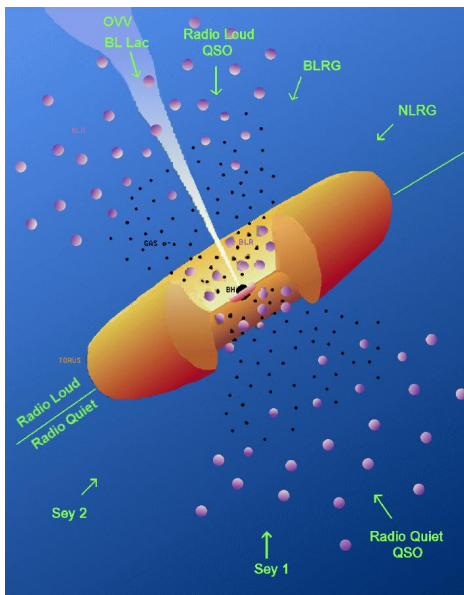


Рис. 1. Общая схема АЯГ [2]

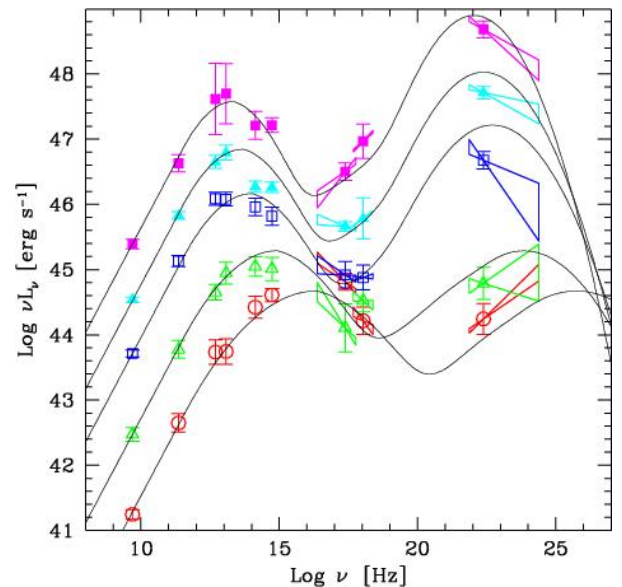


Рис. 2. Усредненные SED блазаров [5]

Блазары составляют особенно интересный подкласс галактик с активными ядрами, поскольку их джет направлен под малым углом к лучу зрения наблюдателя и его излучение доминирует в диапазоне от радио до гамма-энергий. Блазары обладают переменностью блеска во всем наблюдаемом диапазоне и на

различных временных масштабах от часов до десятков лет, кроме того наблюдается высокая и переменная поляризация излучения. Как правило, блазары имеют односторонние радиоджеты, в которых наблюдаются видимые сверхсветовые движения. Движение плазмы джета с околосветовыми скоростями приводит к релятивистскому усилению излучения джета, что делает блазары источниками с наиболее выраженной активностью среди всех типов АЯГ.

Подкласс блазаров включает в себя два подтипа: радиоквезары с плоским спектром (FSRQ) и объекты типа BL Lac (BLLacs), или лацертиды. FSRQ - это квазары с сильными широкими эмиссионными линиями в оптическом спектре. У объектов типа BL Lac эмиссионные линии отсутствуют или крайне слабы. Сильная синхротронная компонента полностью забивает тепловое излучение, но иногда в состоянии минимума блеска можно обнаружить слабые линии излучения или поглощения. В остальном эти два подтипа имеют сходные характеристики: схожая морфология (компактность), сверхсветовые движения в джетах, сильная переменность блеска и высокая переменная поляризация излучения.

Несмотря на то, что блазары были открыты в радиодиапазоне, их переменность была впервые обнаружена в оптическом диапазоне [6]. Переменность в радиодиапазоне была впервые обнаружена у блазара 3C 273 Дентом [7] и у ряда источников на различных частотах [8]. Позднее была обнаружена переменность на всех наблюдаемых длинах волн. Вариации блеска на различных длинах волн часто скоррелированы, что говорит об общей природе переменности.

Как известно, излучение блазаров имеет бимодальное распределение энергии в спектре. Пример усредненного SED блазаров показан на Рис.2. Достоверно установлено, что низкочастотный пик обусловлен синхротронным излучением электронов, движущихся в магнитном поле джета. Низкочастотный пик чаще всего находится в области от инфракрасной до оптической части спектра, но у некоторых объектов типа BL Lac он находится в рентгеновской части. Вы-

сокочастотный пик простирается в область гамма-энергий вплоть до области ТэВ.

Блазары образуют самый многочисленный класс объектов, отождествленных с источниками гамма-излучения. Предполагается, что гамма-излучение рождается в релятивистском джете, однако до сих пор дискутируется вопрос о механизмах генерации этого высокоэнергетического излучения. В настоящее время существуют два основных типа моделей генерации гамма-излучения: лептонные и адронные. В лептонных моделях гамма-излучение генерируется при обратном комптоновском рассеянии фотонов на релятивистских электронах джета. В моделях другого типа (адронных) высокоэнергетическое излучение рождается в результате адронных и электромагнитных каскадов. Также открытым остается и вопрос об областях генерации гамма-излучения, которые могут находиться на расстоянии от 0.1 пк до 10 пк от центральной машины. Согласно одним моделям гамма-излучение рождается на субпарсековых расстояниях от черной дыры за счёт рассеяния фотонов ШЭЛ. Такая модель объясняет наличие завалов в высокоэнергетической области спектрального распределения энергии, наблюдаемых у некоторых блазаров, и отсутствие корреляции между кривыми блеска в различных диапазонах длин волн [9]. Другие модели, наоборот, хорошо объясняют присутствие корреляции между изменениями блеска в различных диапазонах и отсутствие завала в высокоэнергетической части спектра [10–12]. В случае моделей данного типа гамма-излучение рождается вблизи ядра джета на миллиметровых волнах.

Другим актуальным вопросом является вопрос о механизме формирования, коллимации и ускорения джетов. В некоторых моделях формирования и коллимации джета предполагается, что процесс коллимации и ускорения происходит в непосредственной близости от центральной машины, однако в других моделях этот процесс происходит на значительно больших масштабах. Таким образом, вопросы кинематики джета и его состава продолжают широко обсуж-

даться.

РСДБ-наблюдения являются единственным способом, который позволяет непосредственно исследовать структуру и кинематику джетов. Совместный анализ РСДБ-изображений и результатов наблюдений в других диапазонах играет основополагающую роль в установлении деталей структуры АЯГ, особенно блазаров, в спектре которых доминирует излучение джета. Впервые подобный сравнительный анализ проводился в работах [13, 14].

Данная работа посвящена исследованию возмущений в джетах блазаров с сильным гамма-излучением на основании наблюдений в гамма-, оптическом и радиодиапазонах.

Актуальность работы

В последние годы благодаря улучшению качества и увеличению количества наблюдательных данных во всех доступных диапазонах достигнут значительный прогресс в выяснении природы АЯГ. Однако ряд вопросов до сих пор остаются нерешенными.

В настоящее время одной из самых актуальных проблем остается вопрос о механизмах генерации гамма-излучения и определении областей, где оно производится. Предполагается, что гамма-излучение рождается в релятивистском джете, однако до сих пор дискутируется вопрос о механизмах генерации этого высокоэнергетического излучения (лептонный и адронный механизмы), а также открытым остается и вопрос об областях генерации гамма-излучения, которые могут находиться на расстояниях от 0.1 пк до 10 пк от центральной машины.

Анализ многоволновых наблюдений является мощнейшим инструментом для исследования процессов, происходящих в АЯГ. Исследование структуры источников с помощью РСДБ-карт в радиодиапазоне и сравнение изменений этой структуры с течением времени с поведением на других длинах волн позволяет установить важные детали, связанные со строением джетов блазаров и

механизмами, ответственными за происходящие в них процессы.

Цели диссертационной работы

Основной целью данной работы является исследование кинематики джетов парсекового масштаба в блазарах с интенсивным γ -излучением и сравнение поведения джетов с переменностью в оптическом и гамма-диапазонах, а также установление области генерации оптического и гамма-излучения во время вспышек. Для достижения поставленных целей решались следующие подзадачи: проведение многоцветных мониторинговых наблюдений блазаров на телескопах LX-200 и АЗТ-8; обработка результатов оптических наблюдений; обработка и моделирование наблюдательных данных в радиодиапазоне на частоте 43 ГГц; определение кинематических параметров джета источников.

Научная новизна

Для объектов S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1222+216 впервые проведено детальное изучение структуры и свойств джетов на частоте 43 ГГц за временной промежуток 2008-2012 гг. Для всех исследуемых объектов проведен сравнительный анализ поведения источников в гамма-, оптическом и радиодиапазоне.

Научная и практическая значимость

Научная ценность работы состоит в получении новых сведений о структуре АЯГ и механизме генерации гамма-излучения. Практическая ценность обусловлена тем, что в процессе работы были получены новые наблюдательные данные для ряда блазаров. Эти данные могут быть использованы для решения ряда задач, возникающих при исследовании АЯГ. Результаты данной работы могут использоваться во всех организациях, где занимаются изучением активных ядер галактик, исследованием фотометрической переменности и кинематики джетов.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Наблюдательные данные ряда активных блазаров в оптическом диапазоне, полученные на телескопах LX-200 и АЗТ-8. Радиокарты этих же объектов на частоте 43 ГГц и результаты их моделирования.
2. Результаты определения параметров джетов блазаров S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216 на частоте 43 ГГц.
3. Результаты анализа наблюдательных данных для блазаров S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216 в гамма-, оптическом и радиодиапазоне и интерпретация ряда вспышек в гамма- и оптическом диапазонах как распространение возмущения в джете.
4. Вывод о том, что зона генерации гамма-излучения для ряда вспышек 2008-2012 гг. у исследуемых объектов локализована в парсековом радиоджете, а не в непосредственной близости от центральной машины.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. “III Пулковская молодежная конференция”, ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 25—30 сентября 2010 г.
2. AAS 217th Meeting 2011 Сиэтл, США, 9—13 января 2011 г.
3. XXVIII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пушино, Россия, 19 — 21 апреля 2011 г.
4. The 21st Annual New England Quasar (AGN Meeting), Нью-Хейвен, США, Йельский университет, 19 мая 2011 г.

5. “50 лет космической эры: реальные и виртуальные исследования неб”, Ереван, Армения, 25—30 сентября 2011 г.
6. Fermi Symposium, Рим, Италия, 9 — 12 мая 2011 г.
7. Fermi Symposium, Монтерей, США, 28 октября — 2 ноября 2012г.
8. The Innermost Regions of Relativistic jets and Their Magnetic Field, Гранада, Испания, 10—14 июня 2013
9. IAU S304: Multiwavelength AGN Surveys and Studies, Ереван, Армения, 7—11 октября 2013 г. Yerevan, Armenia, 2013,
10. Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная” (ВАК-2013), Санкт-Петербург, Россия, 23—27 сентября 2013 г.
11. XXXI конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 22—25 апреля 2014 г.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из них 7 статей — в рецензируемых журналах, 2 статьи — в сборниках трудов конференций.

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

1. **Morozova, D. A.**, Larionov, V. M., Troitsky, I. S., ... (22 авт.) The Outburst of the Blazar S4 0954+658 in 2011 March-April // The Astronomical Journal. 2014. Vol. 148. P. 142
2. **D.A. Morozova**, S.G. Jorstad, A.P. Marscher, V.M. Larionov, I.S. Troitskiy, D.A. Blinov, I. Agudo and P.S. Smith Multiwavelength Observations of 6 BL Lac Objects in 2008-2012 // EPJ Web of Conferences 2013 Vol. 61
3. Larionov V. M., Jorstad S. G.; Marscher A. P., **Morozova D. A.**, ... (11 авт.) The Outburst of the Blazar S5 0716+71 in 2011 October: Shock in a Helical Jet // The Astrophysical Journal. 2013. Vol. 768. P. L40
4. V.M.Larionov and **D.A. Morozova**, I.S. Troitsky, D.A. Blinov, E.N. Kopatskaya, E.G. Larionova, S.G. Jorstad, A.P. Marscher Optical Outburst of the Gamma-Ray Blazar S4 0954+658 in March-April 2011 // Proceedings of the 2011 Fermi Symposium, ArXiv e-prints. 2011. 1110.5861
5. Williamson, Karen E., Jorstad, Svetlana G., Marscher, Alan P., ..., **Morozova D.**, ... (20 авт.) Comprehensive Monitoring of Gamma-Ray Bright Blazars. I. Statistical Study of Optical, X-Ray, and Gamma-Ray Spectral Slopes // The Astrophysical Journal. 2014. Vol. 789. P. 135.
6. Marscher A. P., Jorstad S. G., Larionov V. M., ..., **Melnichuk D.**, ... (32 авт.) Probing the Inner Jet of the Quasar PKS 1510-089 with Multi-Waveband Monitoring During Strong Gamma-Ray Activity // The Astrophysical Journal Letters. 2010. Vol. 710. Pp. L126-L131.

7. Abdo A. A., Ackermann M., Agudo I., . . . , **Morozova D.**, . . . (217 авт.) Fermi Large Area Telescope and multi-wavelength observations of the flaring activity of PKS 1510-089 between 2008 September and 2009 June // The Astrophysical Journal. 2010. Vol. 721. Pp. 1425-1447.
8. D'Ammando F., Raiteri C. M., Villata M. . . . , **Morozova D.**, . . . (115 авт.) AGILE detection of extreme γ -ray activity from the blazar PKS 1510-089 during March 2009. Multifrequency analysis // A&A. 2011. Vol. 529. P A145.
9. D'Ammando F., Pucella, G., Raiteri, C. M., . . . , **Melnichuk D.**, . . . (101 авт.) AGILE detection of a rapid γ -ray flare from the blazar PKS 1510-089 during the GASP-WEBT monitoring // A&A. 2009. Vol. 508, Pp.181-189

Личный вклад автора

В статьях 1, 2 обработка и анализ данных многоволновых наблюдений в гамма-, оптическом и радиодиапазоне, получение кинематических параметров джета источника принадлежат автору. В статье 3 обработка, моделирование РСДБ-данных и получение кинематических параметров джетов источников принадлежат автору, вклад соавторов в постановку задачи и обсуждение равнозначен; статьи 4 — 9 содержат результаты наблюдений, выполненных автором, вклад соавторов в обсуждение равнозначен.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка цитируемой литературы (128 наименований) и 4 приложений. Общий объем диссертации — 161 страница, из них 44 страницы приложений. Работа содержит 53 рисунка и 24 таблицы.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, описываются основные цели и задачи диссертации, научная новизна, научная и практическая ценность исследования. Также в этой части сформулированы результаты, выноси-

мые на защиту, приводится список конференций и работ, где были представлены результаты данного исследования, указан личный вклад автора.

В **Главе 1** в §1.1 описывается методика наблюдений и процедура обработки данных в гамма-диапазоне, полученных с помощью космической гамма-обсерватории Ферми. В §1.2 описывается методика оптических наблюдений с использованием ПЗС-камер, приводится описание пакета программ, используемых при фотометрии, описывается процесс обработки данных. В §1.3 описываются общие принципы РСДБ-наблюдений. В §1.3.3 описывается процесс обработки радиоинтерферометрических наблюдений и получение конечных карт.

В **Главе 2** описывается методика вычислений собственных движений и параметров джетов блазаров.

Глава 3 посвящена изучению поведения блазара S4 0954+658 в радио, оптическом и гамма-диапазонах. Изучены свойства парсекового джета источника и найдена взаимосвязь между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах.

Глава 4 посвящена изучению поведения блазара S5 0716+071 в радио, оптическом и гамма-диапазонах. Изучены свойства парсекового джета источника и найдена взаимосвязь между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах.

Глава 5 посвящена изучению поведения блазара PKS 1510-089 в радио, оптическом и гамма-диапазонах. Изучены свойства парсекового джета источника и найдена взаимосвязь между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах.

Глава 6 посвящена изучению поведения блазара PKS 1222+216 в радио, оптическом и гамма-диапазонах. Изучены свойства парсекового джета источника и найдена взаимосвязь между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах.

В **Заключении** суммированы основные результаты работы.

В **Приложении А** приведены таблицы моделирования радиокарт источника S4 0954+658 за исследуемый период, карты с наложенным движением компонент, дополнительные кривые блеска и графики.

В **Приложении Б** приведены таблицы моделирования радиокарт источника S5 0716+071 за исследуемый период, карты с наложенным движением компонент, дополнительные кривые блеска и графики.

В **Приложении В** приведены таблицы моделирования радиокарт источника PKS 1510-089 за исследуемый период, карты с наложенным движением компонент, дополнительные кривые блеска и графики.

В **Приложении Г** приведены таблицы моделирования радиокарт источника PKS 1222+216 за исследуемый период, карты с наложенным движением компонент, дополнительные кривые блеска и графики.

Глава 1

Аппаратура. Методика наблюдений и обработка

1.1. Методика наблюдений в гамма-диапазоне и их обработка

Для получения информации в гамма-диапазоне были использованы данные, полученные телескопом LAT (Large Area Telescope). Данный телескоп является основным инструментом на борту Космической Гамма-обсерватории Ферми, которая начала свою работу с августа 2008 года.

Телескоп LAT состоит из трех основных частей: прецизионного преобразующего трекера, калориметра и детектора заряженных частиц (ACD) (см. Рис.1.1). Трекер (как и калориметр) представляет собой 16 модулей (расположенных массивом 4 x 4). Вся структура поддерживается легкой алюминиевой решеткой. Основные параметры телескопа LAT представлены в Таб.1.1. Более подробное описание всех систем LAT можно найти в работе [15].

Для обработки данных в гамма-диапазоне использовалось стандартное программное обеспечение (Fermi Science Tools) [16], доступное на сайте Космической гамма-обсерватории Ферми¹ и написанные нами программы, позволяющие ускорить обработку. Данные, получаемые Fermi, находятся в свободном доступе и обновляются каждые сутки. В данной работе были исследованы данные за промежуток около четырех лет (август 2008 — май 2012 гг.).

1.1.1. Обработка данных в пакете Fermi Science Tools

При обработке данных в гамма-диапазоне необходима работа с двумя типами fits-файлов (“photon” и “spacecraft”), которые содержат информацию об энер-

¹ <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/>

Таблица 1.1. Характеристики LAT

Диапазон энергий	~ 20 МэВ до 300 ГэВ
Поле зрения	2.4 ср (20% небесной сферы)
Угловое разрешение	
> 10 ГэВ	$\leq 0.15^\circ$
1 ГэВ	0.6°
100 МэВ	3.5°
Разрешение по энергии	15% для энергий >100 МэВ
Определение положения источника	<0.5 угловых минут для источников с высокой широтой

гии событий, координатах, качестве данных и положении Космической гамма-обсерватории в пространстве с временным шагом 30 секунд. Процедура обработки включает в себя несколько этапов.

- Фильтрация данных

Из-за ограниченной вычислительной мощности компьютера для анализа полезно выбрать только данные, которые соответствуют наблюдаемому объекту. Задания “gtselect”, “gtmktime” - выбирают данные с заданным временным интервалом, интервалом энергий (в нашем случае 0.1 — 200 ГэВ), положением (RA,DEC, радиус исследуемой области) и максимальным зенитным расстоянием и создают новый FITS-файл. Ограничение по максимальному зенитному расстоянию помогает минимизировать вклад

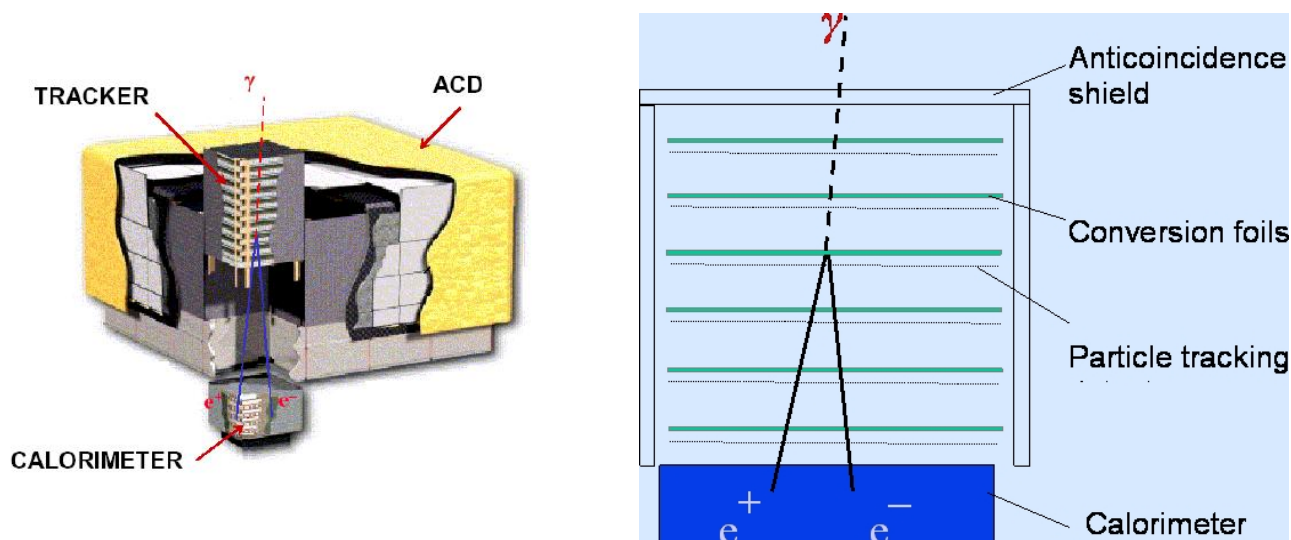


Рис. 1.1. Схематическое изображение конструкции LAT, показано образование пар e^-e^+ при прохождении гамма-фотонов. Размеры $1.8\text{м} \times 1.8\text{м} \times 0.72\text{м}$. [16]

фоновых фотонов, приходящих от лимба Земли. Под “хорошим временным интервалом” (good time interval, GTI) понимаются те промежутки времени, когда источник доступен для наблюдения и данные являются достоверными, например, исключение данных, когда LAT проходит над Южно-Атлантической аномалией.

- Получение экспозиционной карты

Регистрируемое инструментом LAT значение отсчетов является функцией угла наклона (угол между направлением на источник и нормалью LAT). Чтобы определить экспозицию для наблюдаемого источника, необходимо знать, сколько времени LAT наблюдал ту или иную область неба и с каким склонением. Задание “gtlcube” позволяет получать массив времен экспозиций для всего неба во временном интервале файла “spacescraft”.

Задание “gtxmap” вычисляет карту экспозиций. Вычисление экспозиции представляет собой интеграл полного отклика по всей области исследова-

ния (Region of interest, ROI):

$$\epsilon(E, \hat{p}) = \iint_{ROI} dE' d\hat{p}' dt R(E', \hat{p}'; E, \hat{p}, t), \quad (1.1)$$

где E', \hat{p}' - измеренные энергия и направление соответственно. Функция экспозиций далее может быть использована для вычисления ожидаемого числа отсчетов от каждого источника:

$$N_{pred} = \int dE' d\hat{p}' dt S_i(E, \hat{p}) \epsilon(E, \hat{p}), \quad (1.2)$$

где $S_i(E, \hat{p})$ - интенсивность фотонов от i -го источника. Экспозиционная карта — полная экспозиция для конкретной области неба, производящей отсчеты в исследуемом регионе. Поскольку отклик является функцией энергии фотона, карта экспозиций также является функцией энергии. Каждая из полученных карт относится к конкретному интервалу энергий и представляет собой экспозицию для средней точки интервала, а не интеграл по всему промежутку. Количество интервалов является входным параметром задания. Отсчеты, которые дает источник в конкретной области неба, представляют собой интеграл потока от источника и карты экспозиций в этой области.

- Моделирование данных

Моделирование данных производится с помощью метода максимального правдоподобия: в ходе анализа данных вычисляется функция правдоподобия, соответствующая данным LAT. Функцией правдоподобия называется вероятность получения наблюдаемых данных при заданной входной модели. В нашем случае модель - это распределение источников гамма-излучения по небу, включая их интенсивность и спектры. Программный пакет Fermi Science Tools предоставляет возможность выбора одиннадца-

ти различных вариантов модельного SED (спектрального распределения энергии). В качестве модельного спектрального распределения использовалось простое степенное распределение: $N(E) = N_0(E/E_0)^\gamma$, где N_0 - префактор, γ - спектральный индекс, E_0 - масштаб энергий.

Подразумевается, что ответный сигнал детекторов (LAT) на реальный поток известен с достаточной точностью, другими словами, есть начальная модель (распределение источников по небу), достаточно хорошо согласующаяся с данными (набором отсчетов, которые дает LAT). Функция правдоподобия L представляет собой произведение вероятностей наблюдения зарегистрированных отсчетов. Предполагается, что ожидаемое количество отсчетов в i -ом интервале равно m_i - это функция, зависящая от модели источника и она будет различной для разных моделей. Вероятность зарегистрировать n_i отсчетов в этом интервале $p_i = m_i^{n_i} \exp(-m_i)/n_i!$.

Если положить размер интервала бесконечно малым, то тогда n_i будет равно 0 или 1. В этом случае функция правдоподобия:

$$L = \exp(-N_{exp}) \prod_i m_i, \quad (1.3)$$

где N_{exp} - сумма всех отсчетов, которые должны быть зарегистрированы согласно модели.

Используя функцию правдоподобия, вычисляются параметры наиболее подходящей модели, в предположении, что наилучшая модель имеет самое высокое правдоподобие (L). В параметры модели входит описание спектра источника, его положение и даже информация о том, присутствует ли он. Поскольку функция правдоподобия L не линейна, используются алгоритмы для нахождения максимума нелинейной функции. Максимум находится с помощью итеративного вычисления функции для различного набора начальных параметров. С помощью оценки производных алгоритм

выбирает новый набор параметров, более близкий к тому набору, который максимизирует функцию. Функция вычисляется для каждого нового набора параметров до тех пор, пока изменение функции в зависимости от набора параметров не становится достаточно малым (или количество итераций достигает предела). В пакете Fermi Science Tools есть 5 алгоритмов, с помощью которых можно производить моделирование методом максимального правдоподобия.

Для определения максимума и нахождения конечных параметров использовался алгоритм оптимизации `gtlike` NEWMINUIT, поскольку этот алгоритм наиболее корректно вычисляет ошибки конечных параметров. В качестве входной модели для каждого объекта использовалось распределение источников гамма-излучения в исследуемой области. При моделировании учитывался вклад как самого источника, так и вклад других ярких источников в радиусе 15° от источника. Параметрами модели являются интенсивность излучения и спектральное распределение. Помимо этого, учитывалось влияние диффузного излучения Галактики (`gal_2yearp7v6_v0.fits`) и изотропной компоненты излучения (`iso_p7v6source`) посредством добавления моделей предоставляемых FSSC. Выходные параметры включают в себя спектр источника и интенсивность излучения.

Предполагалось, что источник обнаружен, если значение статистического критерия TS превосходило 10, что соответствует обнаружению сигнала, по крайней мере, на уровне 3σ [17]. Статистический критерий TS определяется следующим образом: $TS = -2Ln(L_{max,0}/L_{max,1})$, где $L_{max,1}$ - функция правдоподобия при наличии источника в задаваемой модели, $L_{max,0}$ - при его отсутствии. Более подробно критерий TS обсуждается в работе [18].

1.2. Методика наблюдений в оптическом диапазоне и их обработка

В настоящее время программа СПбГУ по долговременному фотополариметрическому мониторингу АЯГ проводится на телескопах LX-200 (СПбГУ), АЗТ-8 (КрАО). Основные характеристики данных телескопов приведены в табл. 1.2. Наблюдательные данные как правило обрабатываются на следующий день после каждой наблюдательной ночи, кривые блеска и информация о наблюдаемых источниках находятся на сайте программы².

Для наблюдений на обоих телескопах используются ПЗС-камеры ST7 XME, оснащенные блоком широкополосных фильтров UBV (Джонсона) и R_c, I_c (Казинса). Кроме набора широкополосных фильтров на каждом телескопе имеется дополнительный блок с поляризационными анализаторами - две пластины Савара, ориентированные под углами 0° и 45° к экваториальной плоскости (для наблюдения относительных параметров Стокса q и u). Благодаря такой системе расположения фильтров можно получать поляриметрические данные в любом фильтре, меняя анализаторы и широкополосные фильтры одновременно. Поскольку зависимость степени и позиционного угла поляризации от длины волны достаточно мала в случае блазаров, поляриметрические наблюдения на АЗТ-8, как правило, проводятся только в фильтре R_c , который имеет наилучшее отношение сигнал-шум. Поскольку апертура телескопа LX-200 невелика, пришлось отказаться от поляриметрических измерений в комбинации с фильтром, однако собственная полоса пропускания поляриметра близка к полосе R_c и, как обсуждалось выше, можно пренебречь зависимостью поляризации от длины волны.

Наблюдения с помощью ПЗС-камеры являются панорамными, то есть объект и звезды сравнения находятся на одном кадре. С помощью звезд-стандартов

² <http://lacerta.astro.spbu.ru/?q=program>

Таблица 1.2. Характеристики телескопов.

Телескоп	Meade LX-200R 16"	АЗТ-8
Начало работы	2005 г.	2001 г.
Расположение	Обсерватория НИАИ СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, 50 м н.у.м.	КрАО, Научный, Украина, 600 м н.у.м.
Оптическая схема	Шмидт-Кассегрен	Главный фокус параболического зеркала
Диаметр главного зеркала	406мм	700 мм
Фокусное расстояние	4060 мм	2780 мм
ПЗС-камера	ST-7 XME	ST-7 XME
Поле зрения	14.3' × 9.5'	8.1' × 5.4'

в поле производится учет инструментальной поляризации, в предположении о том, что излучение звезд - неполяризовано.

В процессе наблюдений управление камерой и получение изображений осуществлялось с помощью программы CCDOPS³. Результирующие файлы имеют формат FITS [19].

При оптических наблюдениях использовалась стандартная методика для

³ <http://www.sbig.com/sbwhtmls/ccdopsv5.html>

ПЗС-наблюдений. Съемка объекта проводится сериями в 5-10 кадров (в зависимости от объекта и телескопа), которые затем суммируются в один кадр. Суммирование N кадров повышает сигнал-шум в \sqrt{N} раз. Помимо этого такая процедура позволяет накопить сигнал для слабых объектов, точность определения блеска которых на одном кадре невелика, и таким образом повысить предел регистрации ПЗС-камеры по звездной величине.

ПЗС-изображение состоит из полезного (приходящего от наблюдаемых объектов) и фонового сигналов, на которые накладываются неоднородности чувствительности пикселей ПЗС-матрицы. Обработка ПЗС-изображений включает в себя две процедуры: учет фонового сигнала и учет неоднородности чувствительности по кадру. Величина заряда, накопленного в каждом пикселе, определяется, кроме его освещенности, зарядом смещения (небольшой заряд, который возникает при нулевой экспозиции и освещенности), темновым током (заряд, возникающий из-за теплового движения электронов) и чувствительностью пикселя. Заряд смещения оценивается с помощью "bias", кадров с нулевой (или самой короткой) экспозицией при закрытом затворе. Обычно снимается 5 таких кадров, по которым находится медианное значение для каждого пикселя матрицы, после чего это значение вычитается из всех кадров, полученных за ночь. Для того, чтобы учесть влияние темнового тока, достаточно каждые 1.5 – 2 часа снимать темновые кадры (или "dark") при закрытом затворе. Как правило, снималась серия из 3 кадров с максимальной экспозицией 60 сек. Затем каждая серия усреднялась с медианным фильтром, что позволяет избавиться от следов космических частиц и увеличивает точность измерения темнового сигнала. Для каждого рабочего кадра подсчитывалось среднее из двух ближайших к нему темновых кадров, нормированных на величину экспозиции каждого кадра. В случае ПЗС-приемников флуктуации регистрируемого сигнала по полю связаны с несовершенством оптической системы и неоднородностью чувствительности пикселей по кадру. Данные флуктуации вносят наибольший вклад

в ошибки измерений. Учет этих флуктуаций проводился с помощью стандартной процедуры деления каждого отдельного несуммированного изображения на плоское поле (“flat field”) - изображение, снятое в сумерках при равномерной и достаточно яркой (на уровне 50-70% от порога насыщения) засветки и индивидуальное для каждого фильтра. Процесс получения плоских полей аналогичен получению изображения исследуемых источников: делалась серия из 5 кадров (со смещением в несколько пикселей, чтобы нивелировать последствия случайного попадания в кадр звезд). Затем проводилось усреднение кадров с применением медианного фильтра. Более подробное описание методики приведено в учебном пособии [20].

Для обработки оптических данных, получаемых на телескопах АЗТ-8 и LX-200, В. М. Ларионовым был разработан пакет программ **PHOT** [20], использующих в своей основе пакет **SExtractor** [21]. Пакет **PHOT** позволяет проводить апертурную фотометрию в автоматическом и ручном режиме, даёт возможность производить как фотометрию с фиксированной апертурой (в случае объектов с протяжённой подложкой), так и апертурой, зависящей от качества изображений. Преимуществами пакета **PHOT** являются высокая скорость обработки без потери точности результатов по сравнению с PSF-фотометрией; высокая точность определения координат объектов; пользовательский контроль процесса обработки на каждом шаге.

Процедура обработки состоит из нескольких этапов:

- первичная обработка - вычитание темновых кадров (“bias” и “dark”)
- учет плоского поля и суммирование кадров
- фотометрия
- определение параметров поляризации

1.2.1. Фотометрия и поляриметрия

Фотометрирование представляет собой измерение плотности потока излучения от объекта в определённом диапазоне длин волн. Для всех объектов, исследуемых в данной работе, использовалась апертурная фотометрия. В случае апертурной фотометрии сигнал от объектов представляет собой суммированные отсчёты внутри некоторой апертуры (круглой, эллиптической или прямоугольной), центрированной на изображении объекта. Эмпирически было установлено, что оптимальное соотношение сигнал-шум достигается при использовании радиуса апертуры $\sim 1.55 \text{ FWHM} + 1$ [20].

Для оценки вклада фона, который содержится в используемой апертуре помимо потока от объекта, используют кольцевую область, центрированную на объекте. Внутренний радиус такой зоны должен быть достаточно большим (несколько FWHM), чтобы в неё не попадало излучение звезды.

После того, как измерен суммарный поток от объекта и фона I_{S+F} по N_{S+F} пикселям и потока от фона I_F по N_F пикселям, инструментальная звёздная величина объекта вычисляется по соотношению:

$$m_{instr} = -2.5 \lg \left(I_{S+F} - \frac{N_{S+F}}{N_F} I_F \right) + ZP, \quad (1.4)$$

где ZP — константа, определяющая переход от инструментальных величин к стандартным.

Поскольку при использовании апертуры оптимального радиуса часть профиля звезды остаётся за её пределами, нужно вводить поправку за апертуру, которая вычисляется для каждого кадра по ярким отдельным звёздам.

В поляриметрической моде изображения всех объектов на кадре расщепляются на обыкновенный и необыкновенный компоненты, плоскость поляризации которых отличается на 90 градусов. Отсчёты компонент, соответствующих объекту и стандартам, измерялись так же, как и в фотометрической моде, с помощью апертурной фотометрии. Измеряя интенсивности обыкновенного и

необыкновенного лучей, можно рассчитать наблюдаемые относительные параметры Стокса по следующим соотношениям:

$$\begin{cases} q_{obs} = p \cos 2\theta_0 = \frac{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} \\ u_{obs} = p \sin 2\theta_0 = \frac{I_{45^\circ} - I_{135^\circ}}{I_{45^\circ} + I_{135^\circ}}, \end{cases} \quad (1.5)$$

где I_{0° , I_{90° и I_{45° , I_{135° — интенсивности компонент для пластин Савара, расположенных под углом 0° и 45° к небесному экватору, соответственно.

Затем можно перейти от параметров Стокса к степени линейной поляризации и направлению преимущественных колебаний электрического вектора в экваториальной системе координат:

$$\begin{cases} p = \sqrt{q_{obs}^2 + u_{obs}^2} \\ \theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{u_{obs}}{q_{obs}} \end{cases} \quad (1.6)$$

Поскольку позиционный угол поляризации определяется с точностью до $\pm k180^\circ$, мы прибавляли/вычитали 180° из каждого последующего полученного значения θ , если оно на $> 90^\circ$ меньше/больше предыдущего.

Наблюдаемые параметры Стокса, вычисляемые по формулам (1.5), содержат в себе вклад межзвёздной и инструментальной поляризации. Не существует методов, которые позволяют определить точное значение межзвёздной поляризации для внегалактических объектов, но её можно оценить по звёздам поля. Для объектов, изучаемых в диссертации, межзвёздная поляризация составляет порядка нескольких десятых процента, что существенно меньше инструментальной и средней истинной поляризации данных объектов.

Вклад инструментальной и, частично, межзвёздной поляризации компенсируется вычитанием средних для звёзд стандартов параметров Стокса, в пред-

положении, что сами звезды сравнения не имеют поляризации:

$$\begin{cases} q = q_{obs} - \overline{q_{st}} \\ u = u_{obs} - \overline{u_{st}}. \end{cases} \quad (1.7)$$

1.2.2. Переход в стандартную фотометрическую систему

Вывод уравнения перехода от инструментальных звёздных величин к стандартной системе представлен в работе [22] по результатам наблюдений звёзд в поле рентгеновской двойной звезды 4U 0115+63, а также нескольких шаровых скоплений. Коэффициенты перехода для фильтров ST-7 ХМЕ приведены в Таб.1.3.

Таблица 1.3. Коэффициенты перехода ε от инструментальных величин (b, v, r, i) в стандартную систему Джонсона-Казинса (B, V, R, I) для камер ST-7.

Полоса	Коэффициенты перехода ε
B-b/b-r	+0.028
V-v/v-r	-0.128
R-r/r-i	-0.131
I-i/r-i	-0.087

Для перевода инструментальных величин в стандартную систему Джонсона-Казинса использовалась стандартная процедура. Для каждого наблюдения в инструментальной системе находились средний инструментальный показатель цвета звёзд-стандартов $C_{instr,st}$ и инструментальный показатель цвета объекта C_{instr} . Поправка для данной полосы вычислялась как $\Delta m = \varepsilon(C_{instr} - \overline{C_{instr,st}})$.

Переход от звездных величин к плотностям потоков осуществлялся с использованием калибровки Мида [23].

1.2.3. Оценка ошибок наблюдений

Ошибки фотометрии вычислялись как среднеквадратическая величина из формальной ошибки, которая вычисляется исходя из отношения сигнал-шум, и стандартного отклонения величин звёзд сравнения от их среднего значения:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{SNR}^2 + \sigma_{st}^2}. \quad (1.8)$$

Отношение сигнал-шум переводилось в ошибку звёздной величины с помощью соотношения [24]:

$$\sigma_{SNR}^2 = \frac{1.0857}{\sigma_{N/S}^2}, \quad (1.9)$$

где $\sigma_{N/S}^2$ — отношение дисперсии значений фона по кадру к квадрату величины сигнала объекта:

$$\sigma_{N/S}^2 \equiv (N/S)^2 = \left(\frac{\sigma_{bg}}{S}\right)^2. \quad (1.10)$$

Дисперсия для звёзд сравнения σ_{st}^2 вычислялась как:

$$\sigma_{st}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (m_{st,j} - \bar{m}_{st,j})^2, \quad (1.11)$$

где $\bar{m}_{st,j} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (m_{st,j})_i$ — среднее значение блеска j-той звезды сравнения по k наблюдениям.

Предполагалось, что вариации блеска стандартов происходят только под влиянием источников шумов. Как правило, звезды сравнения в полях ярких блазаров хорошо изучены, и это предположение в большой степени точно.

Более подробно процесс обработки, перевод инструментальных звездных величин и вычисление ошибок фотометрии рассмотрены в работах [25] и [22].

1.3. Наблюдения в радиодиапазоне с помощью РСДБ и их обработка

Пространственное разрешение телескопа зависит от его диаметра D_{ant} и наблюдаемой длины волны λ как λ/D_{ant} . В связи с этим радиотелескопы даже очень больших размеров имеют скромное разрешение по сравнению с оптическими телескопами. Почти одновременно с развитием радиоастрономических наблюдений на отдельных телескопах, астрономы стали исследовать возможности радиоинтерферометрии для увеличения разрешающей способности [26]. Угловое разрешение интерферометра зависит не от апертуры отдельной антенны, а от расстояния между двумя элементами, называемого базой. Таким образом, увеличивая базу, можно увеличить угловое разрешение системы. Позднее для интерферометрических наблюдений стала применяться более сложная технология, которая получила название “апертурный синтез” (см. §1.3.2). Интерферометр, использующий эту технологию, представляет собой набор наблюдающих одновременно телескопов, соединенных попарно для получения отдельных баз. Каждая отдельная база с фиксированным расстоянием между антеннами может измерять яркость источника только на одном пространственном масштабе, так называемой пространственной частоте. У такого интерферометра должны быть базы различных длин для измерения множества пространственных частот одновременно, чтобы получать изображение, которое будет состоять из деталей различных пространственных масштабов (элементов с различными угловыми размерами, соответствующими каждой доступной пространственной частоте). Использование вращения Земли позволяет увеличить количество баз.

1.3.1. Получение изображений протяженных источников

Согласно теореме Ван Циттера-Цернике для пространственно некогерентного удаленного источника:

$$\frac{V_s(\mathbf{r})}{V_s(\mathbf{0})} = \frac{\int_{\Omega} I(\mathbf{s}) e^{-i\omega \mathbf{s} \mathbf{r} / c}}{\int_{\Omega} I(\mathbf{s}) d\mathbf{s}}, \quad (1.12)$$

где $V_s(\mathbf{r})$ - пространственная функция когерентности источника, $V_s(\mathbf{0})$ - значение пространственной функции когерентности источника при нулевом расстоянии, \mathbf{s} - единичный вектор в направлении источника, \mathbf{r} - вектор расстояния между двумя точками P_1 и P_2 , Ω - телесный угол источника и $I(\mathbf{s})$ - распределения яркости по источнику. Подробное обсуждение этой теоремы можно найти в работе [27]. Для компактного источника соотношение 1.12 в координатной форме имеет вид:

$$\frac{V_s(u, v)}{V_s(0, 0)} = \frac{\iint I(l, m) e^{-i\omega(ul+vm)/c} dl dm}{\iint I(l, m) dl dm}, \quad (1.13)$$

где (l, m) - угловые координаты источника на небесной плоскости по отношению к главному лепестку и (u, v) - координаты базы, которая перпендикулярна единичному вектору $\mathbf{s}_0 = (0, 0, 1)$, направленному на главный лепесток.

Диаграмма направленности каждой антенны интерферометра равна нулю почти всюду, кроме близкой окрестности центра, направленного на источник, ограничивая тем самым поле зрения интерферометра. Если источник имеет протяженную структуру, превосходящую размер поля зрения, то все сделанные ранее предположения остаются верными. Поскольку Фурье-преобразование обратимо, распределение яркости по источнику может быть восстановлено из уравнения 1.13:

$$I(l, m) = \iint V(u, v) e^{i\omega(ul+vm)/c} du dv \quad (1.14)$$

Это главное уравнение интерферометрии, которое показывает возможность получения изображений.

1.3.2. Апертурный синтез и источники ошибок при РСДБ-наблюдениях

Апертурный синтез - общее название технологии интерферометрических наблюдений и обработки данных, которая позволяет получить карту распределения интенсивности источника. Идея этой технологии заключается в обращении функции видности на (u, v) -плоскости для получения распределения интенсивности источника в небесной плоскости.

Функцию видности можно представить в экспоненциальном виде:

$$V_{mn} = A_{mn}e^{i\Phi_{mn}}, \quad (1.15)$$

где m и n - числа, определяющие конкретную антенну, A_{mn} - амплитуда, Φ_{mn} - фаза функции видности. Фаза является наиболее важной при воссоздании изображения, поскольку она ответственна за положение источника на небесной плоскости. Ошибки в амплитуде приводят к ошибкам в определении яркости источника, в то время как ошибки в фазе приводят к потере информации о структуре источника.

Ошибки в амплитуде

Ошибки в амплитуде появляются в основном из-за ошибок в калибровке системной температуры T_{sys} отдельных антенн и ошибок в определении эффективной площади A_{eff} антенны. Значение амплитуды на выходе коррелятора является комбинацией этих факторов и имеет вид:

$$S_{ij}^c = \rho_{ij}2k10^26\sqrt{\frac{T_{sys,i}T_{sys,j}}{A_{sys,i}A_{sys,j}}}[Jy], \quad (1.16)$$

где ρ_{ij} - коэффициент коррелятора, k - постоянная Больцмана.

Другим фактором, который играет важную роль в радиоастрономических наблюдениях, является ослабление сигнала из-за атмосферной непрозрачности.

Атмосферное поглощение является функцией склонения и частоты наблюдений и особенно важно на высоких частотах (≥ 22 ГГц). Помимо поглощения, атмосфера вносит вклад в антенную температуру из-за своего теплового излучения. Если температура атмосферы T_0 , то системная температура:

$$T_{sys} = T_{rec} + T_0(1 - e^{-\tau_0 \sec z}) \approx T_{rec} + T_0 \tau_0 \sec z, \quad (1.17)$$

где T_{rec} - температура приемника, z - зенитное расстояние, τ_0 - непрозрачность в зените. Системная температура зависит от $\sec z$ почти линейно, поэтому линейная аппроксимация может быть использована, чтобы определить температуру приемника и τ_0 .

Ошибки в фазе

Ошибки в фазе связаны с ошибками времени и частоты гетеродина, с разницей в скорости движения антенн в направлении на источник и случайными ошибками, связанными с характеристиками окружающей среды, например турбулентности атмосферы [28]. Полную фазовую задержку можно представить в виде суммы четырех членов:

$$\Phi = 2\pi\nu(\tau_g + \tau_n) + \Phi_d + \Phi_V, \quad (1.18)$$

ν - частота наблюдений, τ_g - геометрическая задержка, τ_n учитывает задержку сигнала в тропосфере Земли и поправку из-за рассинхронизации часов, Φ_d появляется во-первых, из-за нелинейной зависимости задержки от частоты (задержка в ионосфере) и, во-вторых, из-за задержек сигнала в приемной аппаратуре, не зависящих от частоты. Наконец, последний член Φ_V определяется функцией видности источника.

Все указанные источники ошибок в фазе в той или иной степени могут быть учтены при корреляции сигналов. Ошибки в фазе имеют члены, зависящие от времени и частоты, таким образом, нам необходимо знать, как изменяется

фаза функции видности в зависимости от времени и частоты. Производная фазы измеряемой функции видности по времени ($f_f = \partial\Phi/\partial t$) называется частотой интерференции, а производная по частоте ($\tau_{gr} = \partial\Phi/\partial f$) называется групповой задержкой.

Номинальная калибровка амплитуды и фазы

При измерениях реальный сигнал от источника модулируется передаточной функцией антенны. Таким образом, измеренная функция видности $V'_{mn}(u, v, t, \nu)$ может быть представлена в виде произведения реальной функции видности $V_{mn}(u, v, t, \nu)$ и комплексных коэффициентов, связанных с характеристиками отдельной антенны, называемых коэффициентами усиления.

$$V'_{mn}(u, v, t, \nu) = G_m(t, \nu)G_n^*(t, \nu)V_{mn}(u, v, t, \nu) \quad (1.19)$$

Для того, чтобы откалибровать коррелированную плотность потока (1.16), необходимо использовать кривые системных температур и кривые откликов антенн в зависимости от склонения источника.

Все причины возникновения ошибок в фазе, которые были перечислены выше, в некоторой степени могут быть учтены в корреляторе. Ошибка фазы в соотношении 1.18 имеет члены, которые зависят от времени и частоты. Для получения корректной модели необходимо знать изменения фазы функции видности в зависимости от частоты и времени. Задержки, возникающие из-за смещения отсчетов часов и различиями в пути, который проходят сигналы, могут быть прокалиброваны с помощью метода импульсов (специальная система вводит в приемник короткие импульсные сигналы) или с помощью наблюдения яркого калибровочного источника. Эта процедура называется первичной калибровкой задержки для отдельной полосы.

После первичной калибровки в данных все равно присутствуют остаточные

ошибки, зависящие от времени и частоты. Для учета этих ошибок используется обобщенный поиск интерференционных лепестков, основанный на одновременном использовании полного набора данных наблюдений с большим количеством антенн. Этот метод был разработан Швабом и Коттоном [29]. Подробно данный метод обсуждается в работе [30].

1.3.3. Обработка данных, получаемых на интерферометре VLBA

Таблица 1.4. Расположение телескопов VLBA.

Расположение	Широта ° ' "	Долгота ° ' "	Высота н.у.м. м	Название
Saint Croix, VI	17:45:23.68	64:35:01.07	16	SC
Hancock, NH	42:56:00.99	71:59:11.69	296	HN
North Liberty, IA	41:46:17.13	91:34:26.88	222	NL
Fort Davis, TX	30:38:06.11	103:56:41.34	1606	FD
Los Alamos, NM	35:46:30.45	106:14:44.15	1962	LA
Pie Town, NM	34:18:03.61	108:07:09.06	2365	PT
Kitt Peak, AZ	31:57:22.70	111:36:44.72	1902	KP
Owens Valley, CA	37:13:53.95	118:16:37.37	1196	OV
Brewster, WA	48:07:52.42	119:40:59.80	250	BR
Mauna Kea, HI	19:48:04.97	155:27:19.81	763	MK

В данной работе были использованы данные, полученные на радиоинтерферометре VLBA (Very Long Baseline Array) в рамках программы мониторинга, проводимого группой Бостонского университета⁴ в сотрудничестве с нашей

⁴ <http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>

группой Санкт-Петербургского государственного университета. VLBA — американская РСДБ система, состоящая из 10 радиотелескопов диаметром 25 м (см. Таб.1.4). Радиотелескопы расположены по всей территории США, включая Гавайи. Максимальная база, расстояние между отдельными радиотелескопами, сети VLBA составляет 8611 км. Радиотелескопы могут вести приём в десяти частотных диапазонах от 300 МГц до 86 ГГц. Угловое разрешение положения радиоисточников на небе достигает величины 50 - 100 микросекунд (мкс) дуги.

В рамках программы мониторинга, начиная с 2007 г., проводятся постоянные (ежемесячные) РСДБ-наблюдения 36 источников (33 блазара и 3 радиогалактики) на частоте 43 ГГц. Одна наблюдательная сессия длится 24 часа, каждый отдельный источник наблюдается сканами в течении 0.5—1 часа.

Начальная обработка (корреляция) “сырых” данных VLBA выполняется в Национальной Радио Обсерватории США (NRAO, Socorro, New Mexico). Последующая калибровка производилась с помощью пакета AIPS (Astronomical Image Processing System [31]). Калибровка РСДБ данных включает определение поведения амплитуды и фазы сигнала на каждой базе как функции частоты и времени и внесения поправок, учитывающих это поведение (см. §1.3.2). При обработке данных в AIPS выполняются следующие шаги:

- (1) первичное редактирование;
- (2) номинальная калибровка амплитуды с использованием кривых системных температур и кривых откликов антенн в зависимости от параллактического угла положения антенны;
- (3) внесение поправок за прозрачность атмосферы;
- (4) определение первичной поправки для фазы сигналов на каждой базе в зависимости от частоты на основе короткого интервала наблюдения яркого источника (использовался 3C 279);

- (5) определение остаточных поправок для фазы сигналов в зависимости от времени и изменения состояния атмосферы и ионосферы Земли, с последующим сглаживанием решений;
- (6) усреднение данных по каналам и ведущим частотам;

После калибровки в AIPS данные разбивают на файлы по источникам и импортируют в программный пакет для обработки радиоизображений, Difmap, который был разработан Мартином Шефердом [32]. Difmap используется для заключительного редактирования и получения окончательных карт.

1.3.4. РСДБ-наблюдения: получение изображений

Основными проблемами при получении изображений с помощью РСДБ являются: ограниченный набор пространственных частот (u, v) (плохое покрытие (u, v) -плоскости) и остаточные ошибки в амплитуде и фазе измеренной функции видности. Эти факторы приводят к появлению артефактов на изображении источника. В настоящее время эта проблема решается с помощью самокалибровки [33], [34] в комбинации с методом CLEAN [35]. Для восстановления изображения используется модель структуры источника, затем проводится самокалибровка, которая исправляет наблюдаемую функцию видности на основании модельной функции видности. Описанный метод применяется в программном пакете Difmap для получения конечных карт источников. Рассмотрим процедуру получения изображений подробнее.

Чистка изображения методом CLEAN

Для полного восстановления распределения интенсивности по небу необходим полный набор пространственных частот, то есть функция видности должна быть измерена во всех точках (u, v) . В интерферометрии можно получить толь-

ко ограниченный набор пространственных частот, который соответствует количеству возможных пар антенн интерферометра, с учетом их проекции, которые меняются по мере движения источника по небу. Таким образом формируется функция $S(u, v)$ заполнения (u, v) -плоскости, которая равна 0 во всех точках, где нет информации о функции видности и 1 в точках, где есть эта информация. Главное уравнение 1.14 интерферометрии имеет в этом случае следующий вид:

$$I^D(l, m) = \int \int V(u, v) S(u, v) e^{i\omega(ul+vm)} dudv, \quad (1.20)$$

где $I^D(l, m)$ называется “грязным” изображением. Оно отличается от истинного распределения яркости $I(l, m)$ из-за неполного покрытия (u, v) -плоскости. Заполнение (u, v) -плоскости характеризуется “грязной” диаграммой направленности интерферометра.

$$B^D(l, m) = \int \int S(u, v) e^{i\omega(ul+vm)} dudv. \quad (1.21)$$

“Грязное” изображение (1.20) может быть представлено как свертка истинного распределения яркости I с диаграммой направленности (1.21):

$$I^D(l, m) = B^D \otimes I. \quad (1.22)$$

Для восстановления свертки двух функций используется преобразование Фурье 1.23.

$$\mathcal{F}[I^D] = \mathcal{F}[B^D(l, m) \otimes I(l, m)] = V(u, v) \cdot W(u, v), \quad (1.23)$$

где $\mathcal{F}[f]$ - обозначает преобразование Фурье функции f , V - истинная функция видности, W - передаточная функция, включающая взвешивание. Так как передаточная функция содержит области нулевых значений, необходимо найти метод, позволяющий придать функции видности в неизмеренных точках

наиболее разумные значения, соответствующие правдоподобным распределениям интенсивности, и, в то же время, минимизировать добавление артефактов в изображение.

Наиболее часто для обращения свертки используется алгоритм CLEAN. В своей основе он представляет собой численное обращение свертки в области (l, m) . Процесс заключается в разбиении распределения яркости на отклики от точечных источников, а затем замену каждого из них на отклик “чистой” диаграммы направленности. Как правило, в качестве чистой диаграммы направленности выбирается гауссиана с шириной, равной ширине на уровне половинной амплитуды главного лепестка “грязной” диаграммы направленности.

Процедура “чистки” представляет собой итеративное создание модели источника и состоит из следующих операций:

- С помощью преобразования Фурье функции видности и передаточной функции получается “грязная” карта.
- На “грязной” карте находится максимум интенсивности i_p , где помещается точечный источник с амплитудой γi_p . Отклик этого точечного источника вместе с боковыми лепестками вычитается из грязной карты. На следующей итерации полученная остаточная карта используется в качестве “грязной” карты и процесс повторяется. В ходе итераций происходит запоминание координат и амплитуды вычтенного компонента, и в модель источника добавляется компонент в виде δ -функции.
- Итерации прекращаются, когда все значимые элементы структуры источника удалены из карты, то есть при добавлении новых источников сходимость между данными и моделью не улучшается.
- Осуществляется свертка полученной модели источника (набор всех компонент, найденных в ходе итераций чистки) с откликом “чистой” диаграммы

направленности.

- Остаточная карта (остаточные значения интенсивности) добавляется к “чистой” карте, что дает результирующую карту метода.

Каждая компонента в модели источника представляет собой комплексную синусоидальную компоненту на (u, v) -плоскости, заполняя промежутки между реальными наблюдениями. Если компоненты находятся на расстоянии друг от друга менее размера диаграммы направленности, они представляют одну и ту же область источника.

Самокалибровка

В то время, как плохое покрытие на (u, v) -плоскости может быть устранено с помощью процедуры обращения функции видности, в изображении все равно присутствуют остаточные ошибки амплитуды и фазы, которые ухудшают качество изображения. Для устранения этих ошибок существует метод, называемый “самокалибровка”. Этот метод основан на минимизации квадратов абсолютных значений разности наблюдаемой и модельной функции видности. Для пары антенн $m - n$, минимизируемое выражение выглядит следующим образом:

$$\sum_{time} \sum_{m,n,m < n} w_{m,n} |V_{m,n}^{obs} - g_m g_n^* V_{m,n}^{model}|^2, \quad (1.24)$$

где g_m и g_n - комплексные функции усиления антенн, все величины являются функциями времени. Самокалибровка может быть применена или только к фазе, когда исправляются только ошибки фазы в комплексных усилениях антенн, либо к амплитуде и фазе, когда исправляются и те и другие ошибки. Самокалибровка применяется в комбинации с обращением свертки. Сначала при помощи обращения свертки находится первоначальная модель, используемая для самокалибровки (нахождения коэффициентов усиления). На следующем

шаге найденные коэффициенты усиления применяются к данным и производится Фурье-преобразование модифицированных функций видности для построения новой “грязной” карты. Затем находится новая модель и цикл повторяется снова. К данным сначала применяется фазовая калибровка, затем, когда получена достаточно хорошая модель источника, можно применять амплитудную калибровку. После того как исправлены значительные ошибки в фазе, можно использовать самокалибровку по фазе и амплитуде сначала на достаточно продолжительном интервале времени. Временной интервал амплитудно-фазовой самокалибровки постепенно уменьшается. Такая схема позволяет уменьшать остаточные ошибки от цикла к циклу. Важно отметить, что самокалибровка может уменьшить только ошибки, связанные с отдельной антенной, и не учитывает ошибки базы.

1.3.5. РСДБ-наблюдения: моделирование структуры

Моделирование структуры источника на каждом изображении было выполнено в Difmap с помощью задания `modelfit`, которое производит аппроксимацию данных с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта. Для создания модели источника использовался набор компонент с круговым гауссовым распределением яркости. Каждая компонента имеет параметры: плотность потока, размер, положение относительно центра карты. В процессе моделирования все параметры компонент могут меняться свободно. Процедура моделирования состоит из следующих этапов:

- “Начальная подгонка” плотности потока в ядре (в большинстве случаев - это яркая компактная деталь на одном из концов структуры).
- Последовательное добавление компонент, соответствующих ярким участкам на остаточном изображении. После добавления каждой новой компо-

ненты проводится цикл из 10 итераций, в котором все параметры компонент могут изменяться свободно.

- Прекращение добавления новых компонент в модель, когда значение χ^2 между (u, v) -данными и моделью перестает значимо изменяться при добавлении новых компонент.
- Заключительный цикл из 100 итераций, в котором все параметры всех компонент модели изменяются свободно.

Поскольку наблюдения проводятся приблизительно раз в месяц, модель предыдущей эпохи часто использовалась в качестве первоначальной модели для следующей. Благодаря такому подходу упрощается идентификация компонент на различных эпохах. В результате моделирования исследуемых источников были получены 184 модели, которые представлены в Приложении.

Глава 2

Определение кинематики джетов на основе РСДБ-карт

2.1. Модель джета

2.1.1. Релятивистский конический джет с распространяющимися ударными волнами

В 1970-х гг. переменное поляризованное излучение от компактных радиоисточников было интерпретировано как некогерентное синхротронное излучение от ансамбля релятивистских электронов со степенным распределением энергий. Первая непротиворечивая модель излучающей плазмы в этих источниках была представлена Бланфордом и Кениглом в 1979 году [36]. Они показали, что наблюдаемая переменность и кинематика компактного радиоисточника может быть объяснена моделью квазистационарного коллимированного конического сверхзвукового релятивистского джета. Эта модель дает хорошее приближение реальной формы релятивистского джета, видимого на радиокартах, и известна как модель Бланфорда-Кенигла. Наблюдаемое увеличение яркости в этой модели приписывается сильным ударным волнам, распространяющимся в джете, или плотным сгусткам, ускоряющимся в потоке джета.

В 1985 году Маршер и Гир [37] предложили подробное описание радиоизлучения ударных волн различной силы, распространяющихся по джету, и описали свойства плазмы такого джета. Ударные волны обусловлены наличием градиентов давления в джете. В этой модели ударная волна распространяется по коническому адиабатическому джету, который имеет постоянную скорость потока, характеризующуюся Лоренц-фактором Γ . Предполагается, что угол рас-

крытия джета меньше, чем угол зрения θ между осью джета и лучом зрения наблюдателя. Таким образом можно предполагать постоянство Доплер-фактора потока. Эта так называемая «модель ударной волны в джете» способна описать временную и спектральную эволюцию источника во время вспышки, которая наблюдается в различных диапазонах волн (от радио до оптики) и предсказывает связь вспышек в радиодиапазоне с высокоэнергетическим излучением. В настоящее время эта теоретическая модель широко используется для описания поведения АЯГ. На Рис.2.1 показаны процессы, происходящие в центральном регионе АЯГ в соответствии с моделью Бланфорда-Кенигла и моделью ударной волны в джете.

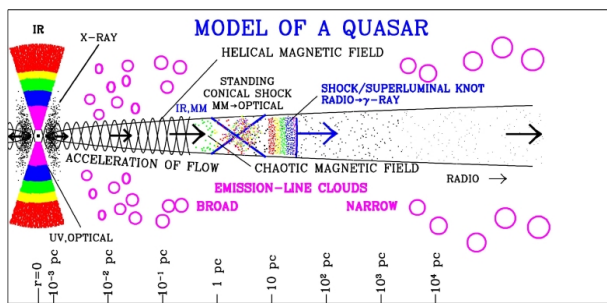


Рис. 2.1. Модель джета

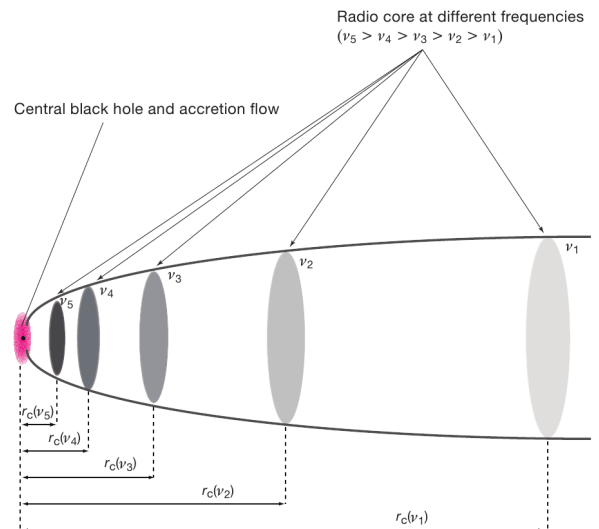


Рис. 2.2. Смещение положения радиоядра джета в зависимости от частоты [4]

Эволюция ударной волны описывается тремя этапами. Во время первого этапа, роста, комптоновские потери доминируют и плотность потока возрастает на всех частотах. Частота загиба спектра при этом не меняется. Когда плотность энергии фотонов становится равной плотности энергии магнитного поля, начинают доминировать синхротронные потери. В это время максимальная плотность потока остается примерно постоянной, а частота загиба смещается

в сторону более низких частот. В конечной стадии адиабатическое расширение начинает доминировать и ударная волна затухает.

Соколов и др. [38] предложили немного отличающуюся модель, в которой вспышки происходят, когда движущаяся ударная волна сталкивается со стоячей волной в джете, которая на радиокартах выглядит как стационарная компонента джета, например, ядро джета. Яркость VLBI-ядра возрастает, когда с ним сталкивается ударная волна, затем она становится видна как новая сверхсветовая компонента в джете. Недавнее исследование блазара BL Lac показало, что ускорение частиц происходит в области перед радиоядром, где излучающая компонента движется по спиральным линиям магнитного поля [39]. Радиовспышка видна, когда излучающая область пересекает ядро, которое является стоячей ударной волной. В данном случае впервые имели место достаточно плотные по времени наблюдения на всех доступных длинах волн, что позволило подтвердить данный сценарий наблюдательно.

Вопросы о том, как формируется и коллимируется джет и на каких масштабах происходит его ускорение, до сих пор остаются открытыми, так же как и вопрос о составе джета. Часть теоретических моделей и наблюдательных данных указывают на то, что быстрая сердцевина джета в области ускорения должна быть окружена значительно более медленной оболочкой. Мы видим начало джета на некотором расстоянии от центральной машины, так называемое радиоядро, которое наблюдается на РСДБ-картах. На самом деле формирование джета начинается ближе к центральной машине, но эта область джета непрозрачна в радиодиапазоне. Природа радиоядра до конца не выяснена. Его положение смещается в зависимости от частоты (см. Рис. 2.2). Возможно, ядро представляет собой область, где происходит переход от оптически толстой к оптически тонкой плазме, стоячую ударную волну или искривление в джете, которое изменяет Доплер-фактор в этой области [40]. В работе [4] было определено расстояние ядра джета радиогалактики M87 на частоте 43 ГГц. Расстояние

составило $14 - 23R_g$ ($0.007 - 0.01$ пк), что значительно меньше, чем аналогичные оценки для блазаров. В работах [3, 10, 12], для блазаров были получены оценки расстояния от центральной машины до ядра джета порядка $10^4 - 10^6 R_g$ ($0.1 - 15$ пк).

Данная работа в основном посвящена анализу и интерпретации наблюдательных данных, и эта интерпретация проводится в рамках упрощенной модели джета, основанной на теории, предложенной в работах Бландфорда и Кенигла [36] и Маршера и Гира [37]. На Рис.2.1 представлена схема джета, на которой показаны основные элементы. Мы рассматриваем узкий конический джет с малым половинным углом раскрытия ϕ , ось которого составляет угол θ с лучом зрения наблюдателя (наблюдаемый половинный угол раскрытия $\phi_{app} = \phi \operatorname{cosec} \theta$) и Лоренц-фактором Γ , описывающим скорость потока в джете. Сечение джета возрастает как $A \propto R^n$ ($n = 2$ в случае конического джета), где R - расстояние вдоль джета. В джете присутствует спиральное магнитное поле B , которое убывает с расстоянием как $B \propto R^{-a}$. Необходимое условие коллимации джета $B_{\perp} \propto R^{-1}$ и $B_{\parallel} \propto R^{-2}$ [36]. Кинетическая энергия электронов находится в приближенном равновесии с энергией магнитного поля. Релятивистские электроны имеют степенное распределение по энергиям $N(E) = KE^{-p}$, с $p = 1 - 2\alpha$ и плотность потока излучения $S \propto \nu^{\alpha}$.

2.2. Сверхсветовые движения и релятивистское усиление

Как было отмечено ранее, джеты блазаров направлены под малым углом к лучу зрения наблюдателя и плазма в джетах движется с релятивистской скоростью. В таком случае имеет место эффект релятивистского усиления, также известный как доплеровское усиление. Гипотеза о релятивистском усилении в компактных радиоисточниках впервые была выдвинута Ризом в 1966 году [41] для объяснения высоких яркостных температур в АЯГ при изучении их пе-

ременности. В 1970-х годах были получены наблюдательные подтверждения этой гипотезы: сверхсветовые движения в джетах блазаров 3С 279 и 3С 273 (см. [42, 43]). С течением времени сверхсветовые движения были обнаружены в джетах многих блазаров (см. [44–48]). Предположим, что скорость плазмы в джете $\beta = v/c$, где v измерено в системе отсчета источника, θ - угол между джетом и лучом зрения наблюдателя. Лоренц-фактором потока называется величина

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (2.1)$$

Доплер-фактором, отвечающим за релятивистское усиление излучения, называется величина:

$$\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos(\theta))} \quad (2.2)$$

Если рассматривать источник со степенным спектром излучения $S_\nu \propto \nu^\alpha$, где α - спектральный индекс, то благодаря эффекту доплеровского усиления наблюдатель будет регистрировать плотность потока

$$S'_\nu = \delta^{x-\alpha} S_\nu, \quad (2.3)$$

где $x = 2$ соответствует случаю однородного протяженного потока, а $x = 3$ - изолированному оптически тонкому движущемуся источнику. Это происходит, поскольку излучение от движущегося источника концентрируется в конусе с углом раскрытия $1/\Gamma$, ориентированном в направлении движения с осью, параллельной вектору скорости. Частота излучения возрастает $\nu' = \delta\nu$, временной масштаб также изменяется $\Delta t' = \delta^{-1}t$, из-за чего видимая переменность более быстрая, чем реальная.

Из-за эффекта релятивистского усиления наблюдаемая морфология джетов сильно зависит от угла зрения θ . Если смотреть на источник сбоку, обычно видны два джета с противоположных сторон от центральной машины. Такие

источники часто классифицируются как радиогалактики. Если источник виден под малым углом, то в этих случаях контрджет обычно невидим, поскольку доплеровское усиление усиливает излучение джета, направленного на наблюдателя и ослабляет излучение контрджета.

Сверхсветовое движение, наблюдаемое в джете, является просто иллюзией, возникающей в результате реального движения с релятивистской скоростью под малым углом к лучу зрения наблюдателя. Если излучающий компонент в джете движется со скоростью β под углом θ к лучу зрения наблюдателя, то наблюдатель измеряет скорость β_{app} , видимую трансверсальную (перпендикулярную к лучу зрения наблюдателя) скорость.

$$\beta_{app} = \frac{\beta \sin(\theta)}{1 - \beta \cos(\theta)} \quad (2.4)$$

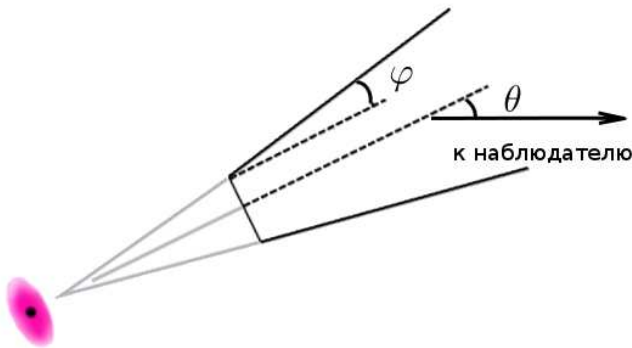


Рис. 2.3. Схема джета

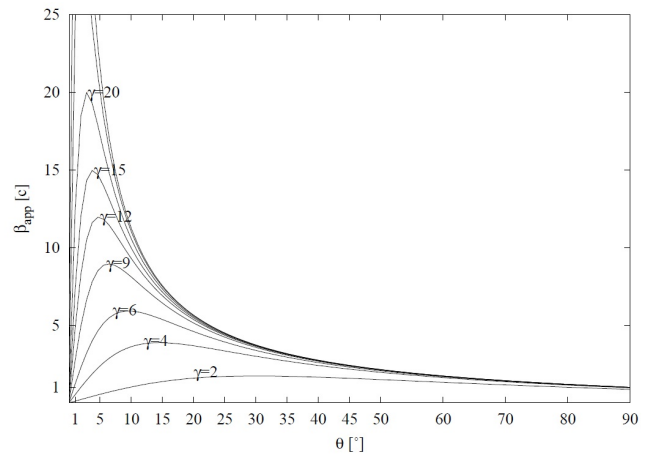


Рис. 2.4. Зависимость видимой скорости от угла между джетом и лучом зрения при разных Лоренц-факторах

Как видно из Рис.2.4, эта скорость может превосходить скорость света при достаточно малом угле θ .

Самая высокая видимая скорость $\beta_{app} = (46 \pm 4)c$ была измерена у квазара PKS 1510-089 [49].

Можно показать, что если $\beta > \frac{1}{\sqrt{2}}$, при некоторой ориентации системы наблюдаются сверхсветовые движения. Видимая скорость достигает максимального значения $\beta_{app,max} = \sqrt{\Gamma^2 - 1}$ при $\cos(\theta) = \beta$ или $\sin(\theta) = \Gamma^{-1}$, для этого угла $\delta = \Gamma$. Эти соотношения накладывают ограничение на минимальное значение Лоренц-фактора $\Gamma_{min} = \sqrt{\beta_{app}^2 + 1}$. Таким образом, зная наблюдаемую скорость, можно оценить Лоренц- и Доплер-факторы. Например, при $\beta_{app} \sim 5$ Лоренц-фактор должен иметь значение хотя бы 5.1. Из графика также видно, что сверхсветовые движения возможны и при больших углах к лучу зрения наблюдателя. Источники с $\theta \sim 50^\circ$ обладают $\beta_{app} \geq 2$ при $\Gamma \geq 5$, а источники с $\theta \sim 90^\circ$ обладают $\beta_{app} \sim 1$ при $\Gamma \geq 3$.

В этом и последующих разделах используются обозначения исследуемых величин, представленные в Таб.2.1.

2.3. Измерение собственных движений в джетах

РСДБ-данные позволяют исследовать изменение структуры джетов со временем. Данные позволили нам исследовать эволюцию ярких компонент в джете у 4 АЯГ (S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1222+216 и PKS 1510-989) на 46 эпохах примерно за 4 года (2008-2012). Для каждой карты нами была определена компонента С (VLBI-ядро), которая всегда находилась на одном из концов джета, однако не всегда являлась самой яркой. Принималось, что ядро по прямому восхождению x и склонению y имеет координаты $x=0$, $y=0$. Предполагается, что ядро неподвижно на протяжении всех эпох. Компоненты классифицировались следующим образом: А - неподвижные компоненты (собственное движение меньше или равно ошибке), имеют обратные движения (по направлению к ядру), или движутся с субсветовыми скоростями, К - движущиеся компоненты, Т - трейлинговые компоненты. Трейлинговые компоненты представляют собой ударные волны, возникающие при взаимодействии первичного возмущения,

Таблица 2.1. Обозначения

Символ	Описание
Γ	Лоренц-фактор
θ	угол между осью джета и лучом зрения наблюдателя
ϕ	угол раскрытия джета
ϕ_{app}	проекция половины угла раскрытия на плоскости неба
θ_{jet}	проекция направления джета на плоскости неба
δ	Доплер-фактор
β	реальная скорость в единицах скорости света
β_{app}	видимая скорость в единицах скорости света
μ	видимая угловая скорость в единицах мсек/год
$\dot{\mu}$	видимое ускорение в единицах мсек/год ²
$\langle \Phi \rangle$	вектор направления скорости
Θ	позиционный угол отдельной компоненты
R	расстояние отдельной компоненты от ядра
S	плотность потока отдельной компоненты
a	размер отдельной компоненты

распространяющегося в джете, со средой джета. Возможность образования таких компонент показана в работе [50]. Трейлинговые компоненты могут быть легко определены, поскольку они отделяются от первичного возмущения (компоненты), а не от ядра джета. Каждая компонента характеризуется следующим набором параметров: плотность потока S , положение x (прямое восхождение), y (склонение), R ($R = \sqrt{x^2 + y^2}$), позиционный угол $\Theta = \arctg(x/y)$, размер (FWHM) компоненты a .

2.3.1. Идентификация компонент в джетах источников

Отождествление компонент основано на сравнении параметров компонент, пока они проявляются на РСДБ-картах. Предполагается, что характеристики одной и той же компоненты (полный поток S , позиционный угол Θ , размер a) изменяются плавно с течением времени на каждой последующей эпохе. Однако характеристики некоторых компонент сильно меняются даже на временном интервале порядка 2-х месяцев, компоненты могут разделиться на несколько суб-компонент или слиться с другими компонентами. В данной работе изучались компоненты, которые отождествлены по крайней мере на трех эпохах.

2.3.2. Определение видимых скоростей в джетах источников

При расчетах использовался метод минимизации невязок, программы были написаны на языке Python. Для определения скоростей компонент использовались полиномы 1-го и 2-го порядка (в случае, если компонента наблюдается не менее шести эпох). Аппроксимация положения компонент на N эпохах проводилась отдельно для координат x и y :

$$x(t_i) = a_0 + a_1(t_i - t_{mid}) + a_2(t_i - t_{mid})^2, \quad (2.5)$$

$$y(t_i) = b_0 + b_1(t_i - t_{mid}) + b_2(t_i - t_{mid})^2, \quad (2.6)$$

где t_i - эпоха наблюдений $i = 1, \dots, N$, а $t_{mid} = (t_1 + t_N)/2$.

Первая прогонка дает приближенное значение χ^2 . Используя это предварительное значение χ^2 невязки равномерно перемасштабируются так, чтобы $\chi^2 = N_{points} - N_{parameters}$. Следующая прогонка программы дает нам достоверные оценки невязок для скорости, эпохи выброса, ускорения. Среднее собственное движение определено как вектор $(\langle \mu \rangle, \langle \Phi \rangle)$, где $\langle \mu \rangle$ представляет собой среднюю угловую скорость движения, а $\langle \Phi \rangle$ - среднее направление движения. Среднее значение было получено с использованием следующих соотношений:

$$\langle \mu \rangle = (\langle \mu_x \rangle + \langle \mu_y \rangle)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\langle \Phi \rangle = \text{arctg}(\langle \mu_x \rangle / \langle \mu_y \rangle), \quad (2.8)$$

где $\langle \mu_x \rangle = a_1$ и $\langle \mu_y \rangle = b_1$, $\langle \dot{\mu}_x \rangle = 2a_2$, $\langle \dot{\mu}_y \rangle = 2b_2$. Конечные ошибки всех параметров вычислялись по методу распространения ошибок из ошибок коэффициентов полиномов.

Время выброса T_0 компонент вычислялось экстраполяцией к моменту, когда положение компоненты совпадало с ядром. T_0 - взвешенное среднее от средних $t_{x,0}$, $t_{y,0}$. В свою очередь $t_{x,0}$, $t_{y,0}$ - корни полинома, которым аппроксимировались данные.

Видимая скорость $\langle \beta_{app} \rangle$, измеряемая в единицах скорости света c , вычисляется согласно следующему соотношению:

$$\langle \beta_{app} \rangle = \frac{\langle \mu \rangle D_L}{1 + z}, \quad (2.9)$$

где z - красное смещение, а $D_L = \sqrt{L/4\pi F}$ - расстояние по светимости (L - болометрическая светимость, F - болометрический поток).

2.4. Определение угла раскрытия джета

Предполагается, что джет имеет коническую структуру (см. Рис.2.1). Угол между осью джета и поверхностью конуса, ограничивающего излучающую область, ϕ , считался постоянным. Это предположение применимо к области джета, находящейся на удалении 1-2 мсек от ядра, в то время как на больших расстояниях (≥ 10 мсек) структура джета может иметь большой разброс по позиционным углам, даже если джет в целом остается достаточно узким (напр. [51]). Проекция половины угла раскрытия ϕ_{app} для каждого источника оценивалась с помощью соотношения между видимым размером s_t джета и видимым расстоянием по долготе s_l компонент: $\phi_{app} = \text{arctg}(\psi)$, где ψ - наклон прямой

зависимости s_t от s_l для каждой компоненты ярче 1% пика интенсивности. Величины s_t и s_l определяются так: $s_l = R$, где R - расстояние на котором компонента наблюдается отдельно от ядра, и $s_t = R \sin |\Theta_{jet} - \Theta| + a/2$, где Θ_{jet} - проекция направления джета, определенная по среднему позиционному углу всех достаточно ярких компонент на всех эпохах, Θ - позиционный угол компоненты, a - размер компоненты. Сначала происходит построение зависимости s_t от s_l для оценки предварительной линейной зависимости. Предварительное соотношение используется для того, чтобы убрать точки, отклоняющиеся более чем на 3σ от линейной модели. Затем методом наименьших квадратов получается конечное значение ψ . Все пары (s_t, s_l) и соответствующие линейные зависимости для каждого источника приведены в Приложении (Рис. А.2, Б.7, В.5, Г.5). В Таб. 3.4, 4.2, 5.2, 6.2 представлены параметры Θ_{jet} , θ_p , $\langle \Theta_0 \rangle$, ϕ , $\langle \Gamma \rangle$, $\langle \delta \rangle$ для каждого источника. Параметры $\langle \Gamma \rangle$, $\langle \delta \rangle$ и $\langle \Theta_0 \rangle$ - средние значения для отдельных компонент. Реальный половинный угол раскрытия ϕ оценивается как $\phi = \phi_{app} \sin \langle \Theta_0 \rangle$, где $\langle \Theta_0 \rangle$ - угол между осью джета и лучом зрения наблюдателя.

Глава 3

Блазар S4 0954+65

В этой главе и далее для кривых блеска объекта используются обозначения, представленные в Таб.3.1. На некоторых графиках символы цветные для лучшего восприятия.

Таблица 3.1. Обозначения для кривых блеска

Символ	Описание
▲	гамма-излучение
△	верхний предел для гамма-излучения
●	оптическое излучение
○	излучение на частоте 43 ГГц
◆	излучение всего объекта на 1 мм
▼	излучение всего объекта на 37 ГГц (Metsahovic)
▽	излучение всего объекта на 36 ГГц (Симеиз)
◇	излучение всего объекта на частоте 15 ГГц
■	излучение всего объекта на частоте 8 ГГц
□	излучение всего объекта на частоте 4.8 ГГц

3.1. Литературный обзор

Источник S4 0954+65 ($\alpha = 09^h58^m47.2^s$, $\delta = +65^d33^m55^s$ J2000.0) был впервые обнаружен в радиодиапазоне в рамках обзора Jodrell-Bank на частоте 996 МГц, в оптике он был отождествлен Коэном [52]. Уолш [53] классифициро-

вал источник как объект типа VL Лас. Первое определение красного смещения было выполнено в работе [54]. В этой работе было получено значение $z=0.368$, определенное по абсорбционным линиям. Это значение было подтверждено работой [55], в которой было получено $z=0.367$ по слабым эмиссионным линиям в спектре.

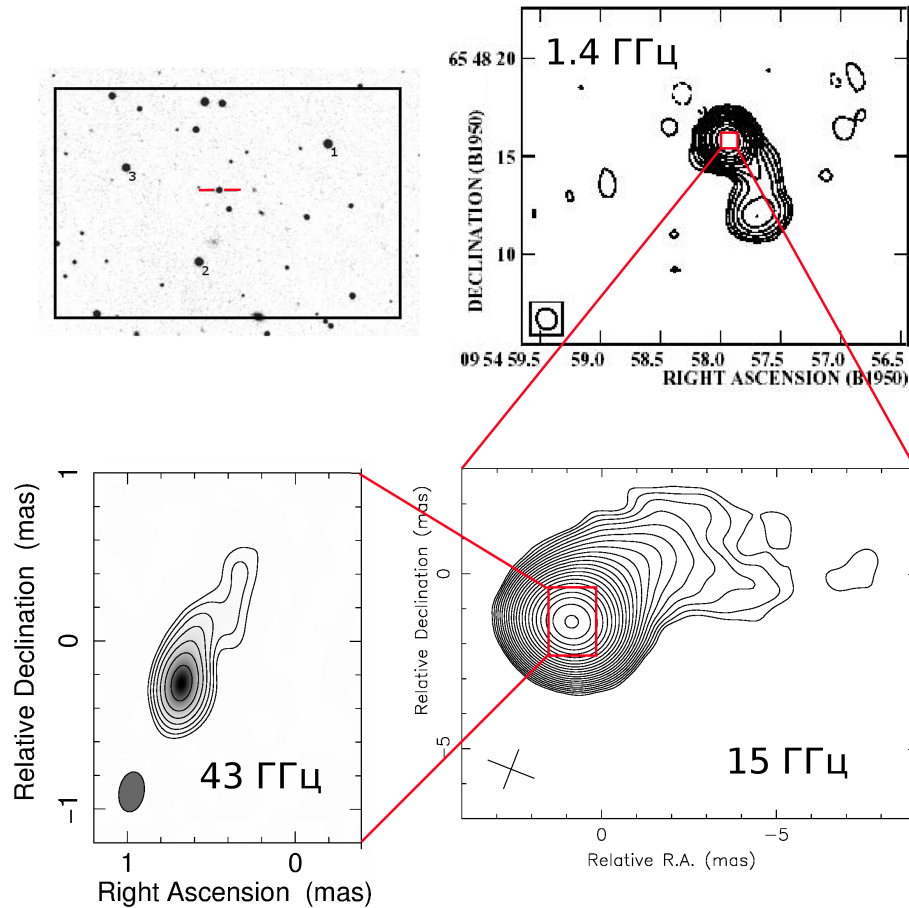


Рис. 3.1. Карта источника S4 0954+65 в оптическом диапазоне и радиоизображения на различных пространственных масштабах. Изображение на частоте 15 ГГц получено в рамках программы MOJAVE (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE>), на частоте 1.4 ГГц из работы [56].

Оптическая переменность этого источника изучалась в работе [57]: были обнаружены большие вариации потока (порядка $\sim 100\%$) на временных масштабах порядка 1 дня. В работе [58] было подробно исследовано поведение источника в оптическом и радиодиапазоне за период 1994-1998 гг. и обнаружены

большие изменения потока в течение ночи. Габузда и др. [59] обнаружили значительную переменность степени поляризации радиоядра объекта в течение ночи на частоте 5 ГГц. У источника наблюдается корреляция радио-оптика [60].

Согласно работе [61], гамма-излучение от объекта было впервые зарегистрировано инструментом EGRET в 1993 г. Источник S4 0954+658 также был зарегистрирован Fermi LAT и попал в первый [62] и второй [63] каталоги ярких источников.

Джет источника искривлен на парсековом и килопарсековом масштабах [59]. Парсековый джет объекта направлен в сторону северо-запада (на 43 и 15 ГГц), в то время как килопарсековый джет направлен на юг [56]. При VLBI-наблюдениях на частоте 15 ГГц в джете объекта были обнаружены движения со скоростями 0.29—0.56 мсек/год [64], на частоте 22 ГГц были обнаружены несколько компонент со скоростями около ~ 0.22 мсек/год [65], на частоте 43 ГГц кинематика джета изучена крайне плохо.

3.2. Анализ поляризации оптического излучения

На Рис. 3.2 показан набор кривых оптических фотометрических и поляриметрических данных, полученных нашей группой за 2008-2011 гг. Блазар демонстрирует значительную активность во время всего периода наших наблюдений, изменения блеска объекта в полосе R составляют более 2^m , а рекордный уровень поляризации превышает 40%. Даже на фоне такой значительной активности вспышка, которая началась в начале 2011 года, выглядит крайне впечатляющей. Вспышка была впервые зарегистрирована нашими наблюдателями, о чем была отправлена астрономическая телеграмма [66]. Приведенный далее анализ данной вспышки, а также ряда других вспышек описан в нашей статье [67]. Увеличенный график данной вспышки представлен на Рис. 3.3.

Начиная с конца февраля 2011 года наблюдалось вращение позиционно-

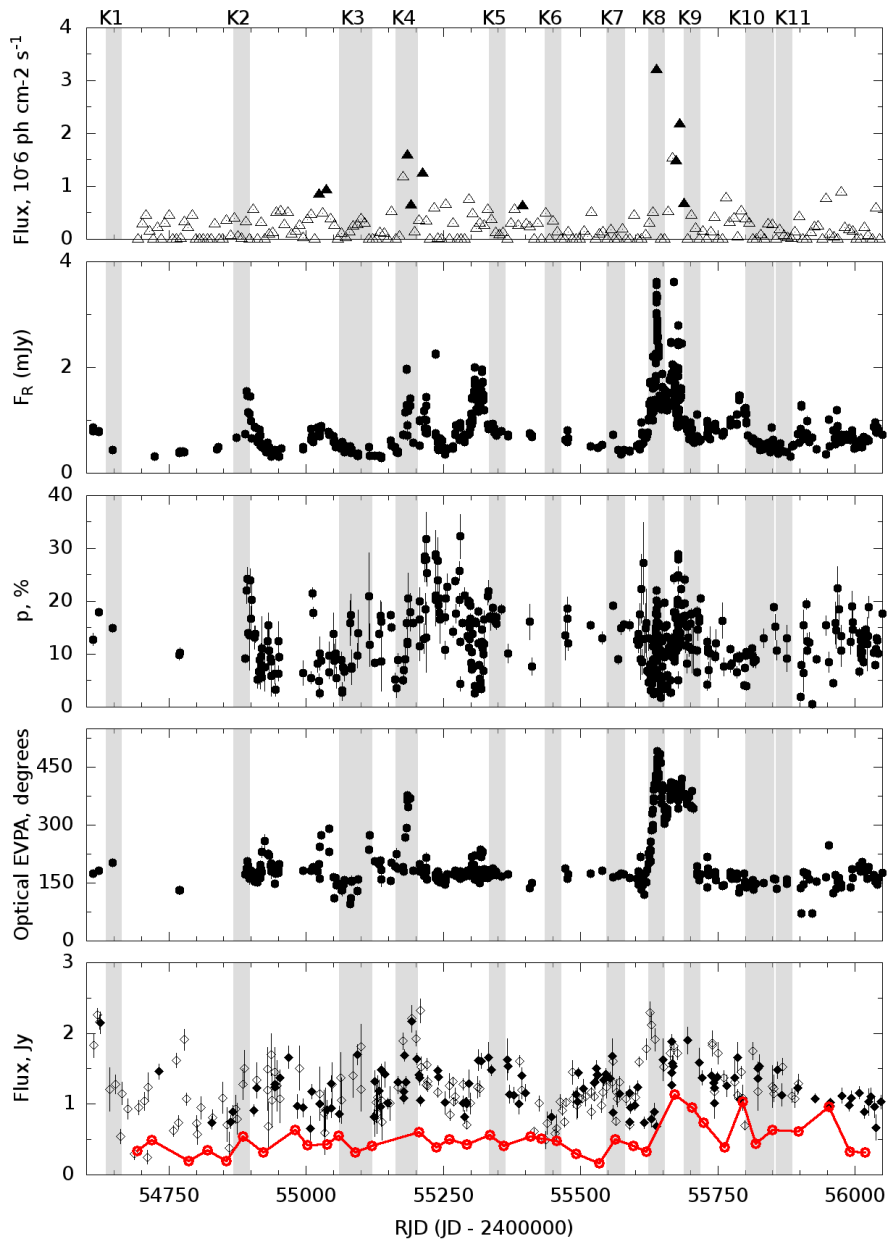


Рис. 3.2. Сверху вниз: гамма-кривая блеска, оптическая кривая блеска в полосе R; степень оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации; кривая блеска VLBI ядра на частоте 43 ГГц и кривая блеска от всего источника на 37 ГГц. Серые прямоугольники показывают время выброса сверхсветовых компонент.

го угла оптической поляризации с амплитудой $\sim 330^\circ$. Вращение происходило плавно со скоростью $\sim 13.3^\circ$ в день в течение марта 2011 и прекратилось около RJD 55643 (22 марта), вблизи максимума вспышки в полосе R. После этого

наблюдались только небольшие изменения позиционного угла оптической поляризации, несмотря на продолжающуюся сильную переменность плотности потока и степени поляризации. После $RJD \sim 55660$ позиционный угол оптической поляризации вернулся обратно к “спокойному” состоянию.

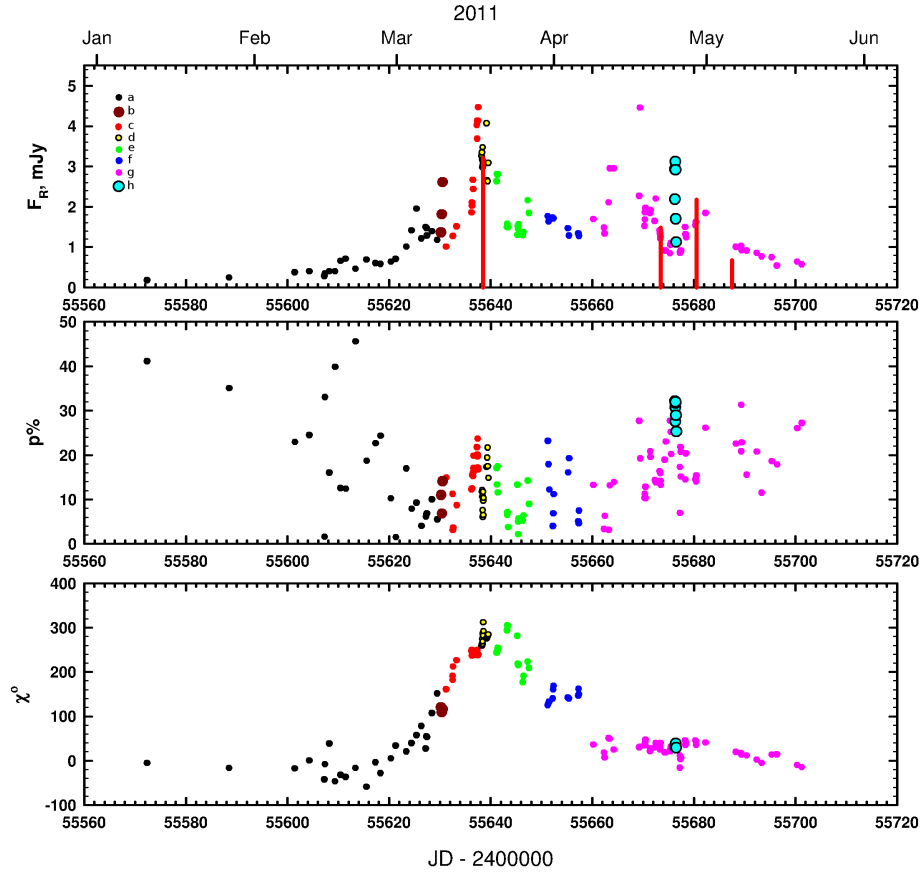


Рис. 3.3. Плотность потока в оптическом диапазоне (исправленная за галактическое поглощение), уровень поляризации и позиционный угол поляризации в полосе R за январь-май 2011 года. Увеличенные символы относятся к ночам, во время которых наблюдалась сильная переменность. Цвета соответствуют разделению на компоненты по различному поведению параметров Стокса (см. Таб.3.2). Красные вертикальные линии обозначают время регистрации объекта в гамма-диапазоне, высота пропорциональна потоку в гамма-диапазоне.

Во время двух ночей 9 марта и 24 апреля наблюдалась сильная переменность, $\sim 0.^m7$ за 7 часов и $\sim 1.^m0$ за 5 часов соответственно, сопровождающаяся синхронными изменениями поляризации (эта переменность отмечена увеличен-

ными символами на Рис.3.3). Степень поляризации излучения изменялась от 5.8% до 12.6% 9 марта и от 19.8% до 28.9% 24 апреля. Эти изменения плотности потока и степени поляризации являются самыми быстрыми, зафиксированными для данного источника, среди опубликованных в литературе.

Следуя работе [68], были построены графики поляризационных параметров Стокса (Q от I) и (U от I) (см Рис.3.4) и обнаружено, что весь набор данных может быть разделен на области, каждая из которых обладает своим поведением в пространстве параметров (I, Q, U). Эти области отмечены различными цветами (см. Рис.3.4). Данные на кривой блеска (см. Рис.3.3) обозначены теми же цветами.

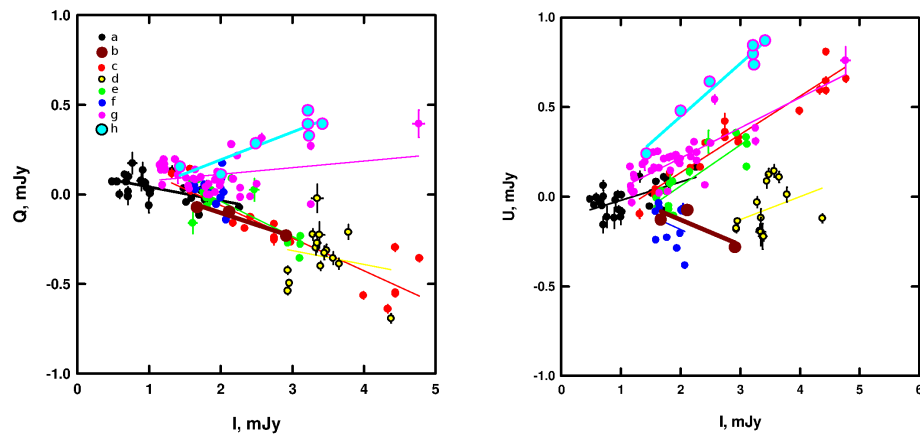


Рис. 3.4. Вариации абсолютных параметров Стокса за период январь-апрель 2011 года. Слева: Параметры Стокса Q от I . Справа: Параметры Стокса U от I . Различные цвета соответствуют различным стадиям изменения параметров Стокса (см. Таб. 3.2).

Регрессионные линии на Рис. 3.4 обозначают компоненты, каждая из которых имеет постоянные поляризационные параметры, P_{comp} и χ_{comp} , в то время как полный и поляризованный потоки меняются. Нами было выделено 8 компонент с различными параметрами Стокса. Поскольку поток этих компонент меняется со временем, будем говорить о них как о переменных источниках. Можно видеть, что регрессионные линии имеют тенденцию сходиться в одной

области, соответствующей состоянию параметров Стокса перед вспышкой. Такое поведение предполагает, что одна из компонент, ответственная за излучение и поляризацию S4 0954+658 до вспышки, имеет постоянные параметры Стокса. Была произведена оценка параметров постоянного источника: плотность потока 0.308 мЯн в полосе R (после исправления за межзвездное поглощение), $p=15\%$ and $\chi = -6^\circ$. Предполагается, что постоянная компонента должна вносить один и тот же вклад в полный и поляризованный поток и во время вспышки. Таким образом, вычитая вклад постоянной компоненты из параметров Стокса S4 0954+685, можно получить параметры переменных источников. Эти параметры приведены в Таб.3.2.

Таблица 3.2. Поляризационные параметры переменных источников

Название	RJD	p %	σ_p %	χ°	σ_χ°
a	55572-55629	12.66	1.91	-26.8	4.2
b	55630	19.24	5.18	23.3	7.4
c	55631-55637	27.79	1.22	-24.5	1.2
d	55638-55639	15.26	9.00	-24.7	17.0
e	55641-55647	30.00	2.83	31.3	2.6
f	55651-55657	17.35	11.22	42.3	17.8
g	55660-55701	18.08	1.24	31.2	1.9
h	55676	33.05	2.14	17.0	1.8

Для анализа цветовой переменности S4 0954+65 использовался метод, разработанный В.А. Гаген-Торном (см. напр. [69]). Если переменность обусловлена только вариациями потока, а относительное распределение энергии в спектре (SED) остается неизменным, то в n -мерном пространстве потоков $\{F_1, \dots, F_n\}$ (где n - число различных полос, в которых проводились многоцветные на-

блюдения) наблюдаемые точки должны ложиться на прямые линии. Наклоны этих прямых линий представляют собой отношения потоков для различных пар полос. С некоторыми ограничениями обратное также верно: линейное соотношение между наблюдаемыми потоками в двух различных полосах во время определенного временного интервала, предполагает, что наклон (то есть отношение потоков) остается неизменным. Такое соотношение для набора полос будет означать, что относительное спектральное распределение энергии остается постоянным и может быть получено из наклонов регрессионных линий.

Как отмечалось ранее, в §1.2.2, для оптических данных в полосах *BVRI* были использованы постоянные калибровки “звездная величина - поток” из работы [23]. Галактическое поглощение в направлении на S4 0954+65 вычислялось по закону экстинкции Карделли [70] и $A_V = 0.^m38$ [71].

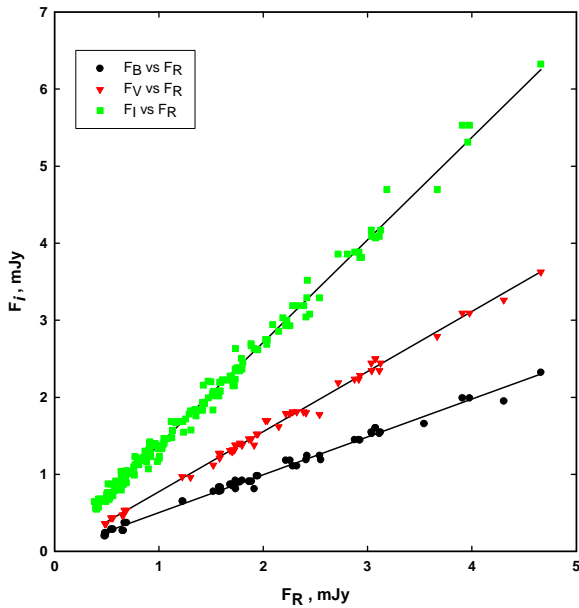


Рис. 3.5. Зависимости поток-поток для оптических полос.

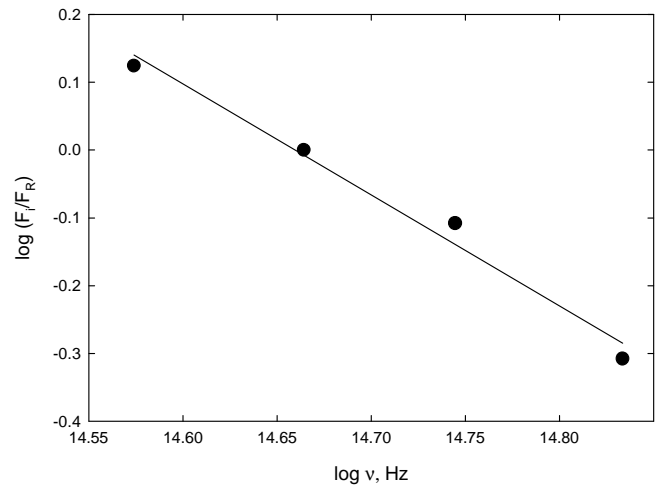


Рис. 3.6. Относительное спектральное распределение энергии переменного источника(ов) для объекта S4 0954+65.

На Рис. 3.5 показано, что во время вспышки в марте-апреле 2011 года отношение потоков было линейным, $F_i = A_i + B_i \cdot F_R$. Значения B_i , наклоны регрессионных линий, могут быть использованы для построения относительно-

го SED переменного источника, показанного на Рис. 3.6. В логарифмическом масштабе полученная зависимость была аппроксимирована прямой линией с наклоном $\alpha = -1.64 \pm 0.15$, что соответствует синхротронному спектру $F_\nu \propto \nu^\alpha$.

3.3. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн

Для определения параметров джета было произведено моделирование структуры джета на 37 эпохах. Из ядра джета выбрасывалось примерно 3 новых компонента в год. Были отождествлены 12 компонент, из них 11 движущиеся, 1 квазистационарная. Кинематические параметры компонент и параметры джета источника представлены в Таб.3.3, 3.4.

На Рис. 3.7 показана оптическая кривая блеска с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска радиоядра, кривые оптических поляризационных параметров с наложенными поляризационными параметрами радиоядра. Для всех остальных компонент данные кривые блеска представлены в приложении А. На Рис. 3.8 представлена зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент, позволяющая путем экстраполяции определить момент отделения компоненты от ядра. Эти моменты отмечены вертикальными прямоугольниками на Рис.3.2. На Рис. 3.9 показаны траектории движения компонент, наложенные на карту источника на одной из эпох наблюдений (последовательность изображений с наложенным положением компонент на всех исследуемых эпохах приведена в приложении А).

Было проведено детальное изучение поведения поляризации в парсековом джете в окрестности времени выброса компонент. Хорошо видно, что большую часть времени позиционный угол оптической поляризации находился в области $\chi \sim -7^\circ$, что близко к среднему позиционному углу поляризации радиоядра (-12°) и среднему направлению джета (-20°). Параметры поляризации компо-

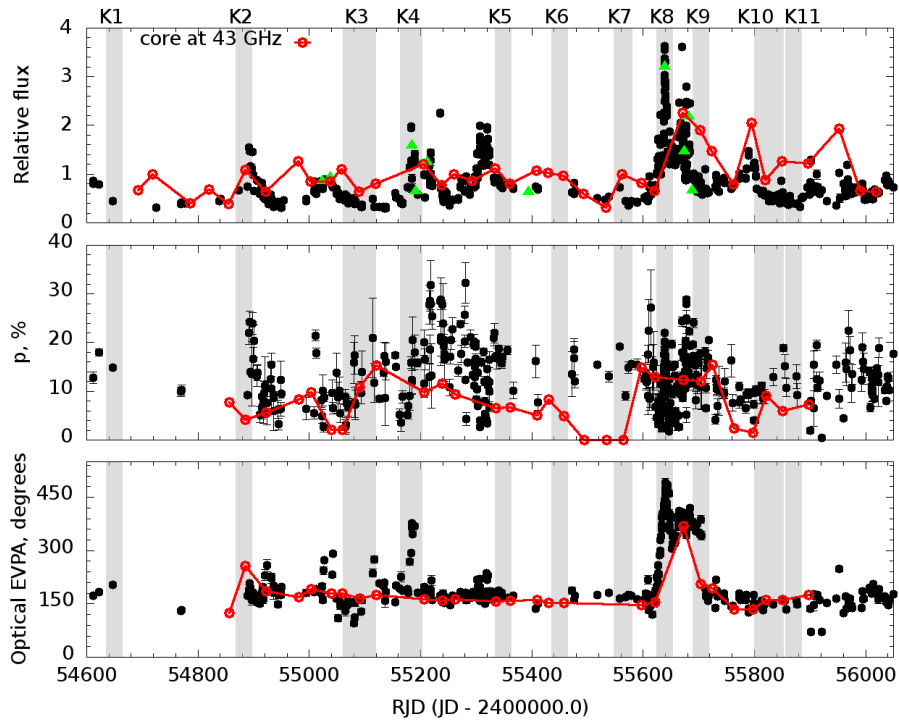


Рис. 3.7. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска VLBI ядра на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации с наложенной кривой уровня поляризации на частоте 43 ГГц; позиционный угол оптической поляризации с наложенным EVPA радиоядра на частоте 43 ГГц

мент представлены в Таб. 3.5, полная версия которой находится в Приложении А.

Для большинства компонент (8 из 11) была выявлена связь между временем выброса компоненты и активностью в оптическом и радиодиапазонах (37 ГГц). На кривой блеска за весь период наблюдений можно выделить несколько вспышек (Рис.3.2). Особенно интересны вспышки 2, 3, 3а, 5, 6, во время которых объект был зарегистрирован в гамма-диапазоне. Для сравнения эпох оптических вспышек и эпох выброса компонент мы разделили оптические вспышки на две группы. Группа А включает эпохи, в которых время максимума оптической вспышки совпало с выбросом компоненты в пределах $|(T_{opt_{max}} - T_{eject})| \leq \sigma$, где σ - ошибка определения момента выброса T_{eject} , и группа Б, для которой

Таблица 3.3. Кинематические параметры компонент

Узел	N	μ мсек/г	β_{app} с	T_{eject} MJD	$\dot{\mu}_{\perp}$ мсек/г ²	$\dot{\mu}_{\parallel}$ мсек/г ²	$\langle \Theta \rangle$ °
K1	10	0.59 ± 0.01	13.02 ± 0.30	54650.0 ± 15	-0.44 ± 0.02	-0.78 ± 0.03	-26.9 ± 5.47
K2	16	0.37 ± 0.01	8.24 ± 0.02	54883.5 ± 15	-	-	-49.0 ± 7.7
K3	21	0.32 ± 0.02	6.99 ± 0.42	55091.6 ± 30	-0.18 ± 0.01	-0.40 ± 0.01	-20.2 ± 6.6
K4	6	0.61 ± 0.06	13.53 ± 1.42	55184.7 ± 20	-	-	-14.3 ± 1.5
K5	5	0.69 ± 0.05	15.14 ± 1.12	55349.5 ± 14	-	-	-16.7 ± 2.3
K6	3	0.58 ± 0.01	12.75 ± 0.17	55450.4 ± 15	-	-	-21.7 ± 1.4
K7	3	0.87 ± 0.06	19.24 ± 1.31	55564.4 ± 17	-	-	-27.2 ± 0.68
K8	8	0.86 ± 0.01	18.95 ± 0.28	55639.1 ± 15	-1.69 ± 0.06	-0.23 ± 0.06	-25.4 ± 6.4
K9	5	0.78 ± 0.06	17.22 ± 1.39	55704.5 ± 15	-	-	-8.4 ± 4.4
K10	4	1.20 ± 0.07	26.61 ± 1.58	55827.2 ± 27	-	-	-24.1 ± 3.1
K11	4	0.92 ± 0.04	20.19 ± 0.91	55871.9 ± 15	-	-	-14.6 ± 2.6

$$|(T_{opt_{max}} - T_{eject})| \leq 3 \sigma.$$

В Таб. 3.6 представлены эпохи оптических вспышек, наличие гамма-вспышек, наличие вращения плоскости оптической поляризации, скорость этого вращения, номер выброшенной компоненты и тип вспышки согласно вышеописанной классификации.

Компонента K8: Узел K8 представляет наибольший интерес, поскольку его появление (в пределах 1σ) сопровождалось самой мощной оптической вспышкой, гамма-вспышкой и вспышкой на 37 ГГц. Помимо этого, время выброса K8 совпадает с вращением позиционного угла оптической поляризации на $\sim 330^\circ$ со скоростью ~ 13.3 градусов в день и увеличением поляризации до 22%.

Таблица 3.4. Параметры джета источника S4 0954+658 за 2008-2012 гг.

θ_{jet} ($^{\circ}$)	ϕ_{app} ($^{\circ}$)	θ ($^{\circ}$)	ϕ ($^{\circ}$)	Γ
-25.81 ± 13.40	12.39 ± 1.17	3.67 ± 1.43	0.79 ± 0.31	15.65 ± 5.36

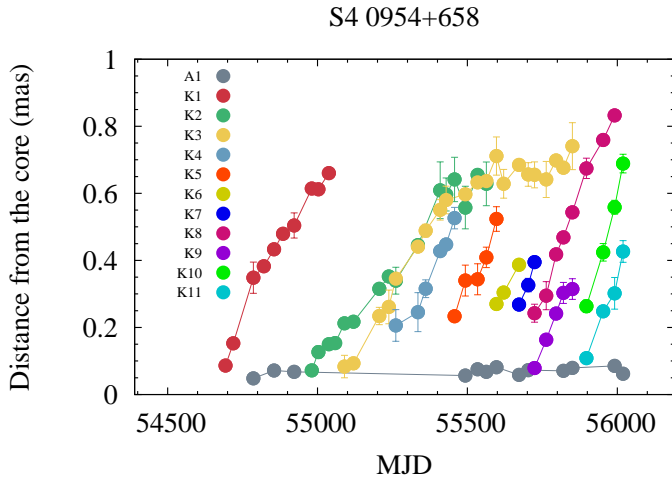


Рис. 3.8. Зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент.

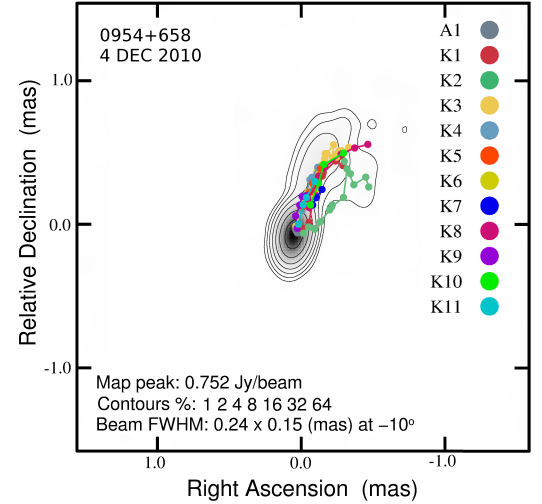


Рис. 3.9. Карта объекта на частоте 43 ГГц с наложенными траекториями компонент.

Компонента K1: Узел K1 был весьма ярким, однако для детального анализа у нас недостаточно данных в оптическом диапазоне на момент его выброса. Однако на кривой блеска на 37 ГГц присутствует вспышка, которая совпадает со временем появления компоненты в пределах 1σ .

Компонента K2: Выброс компоненты K2 (в пределах 1σ) сопровождался оптической вспышкой и увеличением оптической поляризации до 24%. Мы обнаружили несколько небольших вращений плоскости оптической поляризации, совпадающих со временем выброса K2 в пределах 3σ , однако для уверенных измерений мы имеем слишком мало точек (не более 4-х в каждом случае).

Помимо этого, позиционный угол K2 в джете ($\langle \Theta \rangle = -49^{\circ}$) значитель-

Таблица 3.5. Поляризационные свойства компонент на VLBA изображениях

МJD	Узел	Поток (Ян)	p %	χ°	Дата
55724.5	K8	0.10	27.4	146.2	12 JUN 2011
55763.5	...	0.12	19.0	135.0	21 JUL 2011
55796.5	...	0.15	18.7	116.8	23 AUG 2011
55820.5	...	0.08	23.2	117.3	16 SEP 2011
55850.5	...	0.08	23.8	122.6	16 OCT 2011
55897.5	...	0.11	15.4	144.8	02 DEC 2011

но отличается от среднего направления джета ($\sim -20^\circ$). Перед выбросом компоненты K2 в радиоядре наблюдается небольшая вспышка ($RJD = 54885$), которая совпадает с оптической вспышкой “1” (см. табл. 3.6). Во время этой вспышки позиционный угол поляризации радиоядра составлял $\sim 76^\circ$, что значительно отличается как от среднего позиционного угла оптической поляризации, так и от среднего позиционного угла поляризации радиоядра ($\sim -12^\circ$). Наблюдается резкий скачок позиционного угла оптической поляризации в момент $RJD \sim 54923$: χ изменяется от 78° до 45° . Последнее согласуется с позиционным углом компоненты K2 ($\chi = 45^\circ$) в момент $RJD = 54981$, когда узел впервые был виден отдельно от ядра на радиоизображении. Это предполагает связь между событиями в оптическом и радиодиапазоне.

Компонента K3: Появление K3 сопровождалось (в пределах 1σ) вращением позиционного угла оптической поляризации на $\sim 27^\circ$ ($RJD \sim 55063-55068$, ~ 4.5 градусов в день) и регистрацией источника в гамма-диапазоне. На оптической кривой блеска виден широкий максимум с центром на $RJD=55024$, который в пределах 3σ совпадает с временем выброса K3 и регистрацией источника в гамма-диапазоне.

Таблица 3.6. Характеристики оптических вспышек

N	Оптическая вспышка (RJD)	гамма -излучение	Вращение χ_{opt} (°)	Скорость вращения χ_{opt} (°/день)	Узел	Тип
1	54891.807	-	-	-	K2	A
2	55020.307	Да	27	4.5	K3	B
3	55182.447	Да	180	15.7	K4	A
3a	55217.384	Да	-	-	K4	B
4	55319.363	-	-	-	K5	B
5	55637.580	Да	333	13.3	K8	A
6	55669.434	Да	-	-	K9	B
7	55789.258	-	-	-	K10	B
8	55900.574	-	-	-	K11	B

Компонента K4: Выброс узла K4 в пределах 1σ совпадает с вращением позиционного угла оптической поляризации на $\sim 180^\circ$ (со скоростью ~ 15.7 градусов в день), увеличением оптической поляризации до 20%, оптической вспышкой, вспышкой в радиодиапазоне на частоте 37 ГГц (RJD=55192, $S=2.17 \pm 0.14$ Ян) и регистрацией источника в гамма-диапазоне. В пределах 2σ от момента выброса компонента K4 наблюдался исторический максимум оптической поляризации источника (RJD=55217, $P=41\%$).

Компонента K5: Время выброса K5 совпало с оптической вспышкой на RJD=55319 ($S_R = 1.96$ мЯн, $P = 12\%$). В данном случае не было обнаружено вращения позиционного угла оптической поляризации, но наблюдалось увеличение степени оптической поляризации в форме плато со средним значением $\sim 17\%$ и вспышка на 37 ГГц.

Компоненты K6 и K7: Компоненты K6 и K7 были зарегистрированы толь-

ко на 3-х эпохах и являются достаточно слабыми, хотя ясно видны на картах поляризации на частоте 43 ГГц. На кривой блеска видно некоторое увеличение потока в полосе R (до 0.81 мЯн) и достаточно высокий уровень оптической поляризации (до 18%) внутри интервала 2σ относительно выброса K6. Подобное поведение мы видим и для выброса K7 в пределах 1σ : небольшое увеличение потока в полосе R (до 0.72 мЯн) и поляризации (до 19%). Тем не менее мы не обнаружили сильной активности в оптическом или гамма-диапазонах, подобной той, что мы видели в случае компонент K2-K5.

Компонента K9: Сильная переменность на масштабах менее дня была зарегистрирована в ночь 24 апреля 2011 (увеличение блеска на $\sim 0.7^m$ за 7 часов). Эта переменность в пределах 2σ совпала с выбросом компоненты K9. Во время этой вспышки поток в полосе R увеличился до 2.47 мЯн, а уровень поляризации возрос до 28%.

Компонента K10: Узел K10 был выброшен после вспышки в полосе R RJD=55789 (в пределах 2σ), что также совпало со вспышкой на 37 ГГц (RJD=55786, $S = 1.66$ Ян), в то время как уровень оптической поляризации во время этой вспышки был достаточно скромным ($\sim 10\%$).

Компонента K11: Компонента K11 была выброшена во время оптической вспышки RJD=55900 в пределах 2σ . Оптическая вспышка сопровождалась вспышкой на 37 ГГц, а уровень оптической поляризации достиг значения 19% через 10 дней после максимума оптической вспышки (RJD 55910).

Компонента A1 - стационарная компонента на расстоянии $\sim 0.07 \pm 0.01$ мсек от ядра. В работе [44] было показано, что стационарные компоненты наблюдаются в джетах многих объектов, и, как правило, находятся на расстоянии около 1-3 мсек от ядра. В данной работе предлагается 3 категории моделей для объяснения стационарных компонент: а) стоячая реколламинационная ударная волна, обусловленная разницей в давлении во внутренней и внешней частях джета; б) место максимального Доплеровского усиления, где джет изгибается; в) стац-

онарная ударная волна, где джет резко искривляется. Мы предполагаем, что компонента A1 скорее всего относится к типу “а”, поскольку она квазистационарна со временем жизни от нескольких месяцев до года.

3.4. Обсуждение и выводы

Начиная с середины февраля 2011 года объект показывает мощную активность в оптическом диапазоне. Полученные в ходе работы оптические фотометрические и поляриметрические наблюдения плотно покрывают этот период. Помимо этого, получен обширный набор VLBA-изображений объекта на частоте 43 ГГц, что позволило провести сравнение оптической активности с поведением парсекового джета источника. При анализе наблюдательных данных были сделаны следующие выводы:

1. За весь период наблюдений источник показывал сильную переменность в оптическом диапазоне, парсековый джет также был очень активен. От ядра джета отделялись примерно 3 новые компоненты в год.
2. Согласно нашему анализу, 8 из 11-ти компонент (K2, K3, K4, K5, K8, K9, K10, K11) были выброшены из ядра во время сильных оптических вспышек (с разбросом по времени от 1 до 3σ относительно T_{eject}). В 4-х из 8-ми этих случаев источник был зарегистрирован в гамма-диапазоне (уровень потока превышал 5×10^{-7} фот $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$). Во всех этих случаях максимумы гамма-излучения совпадали с оптическими. Наблюдался лишь один случай, когда точка в гамма-диапазоне не совпала с оптической активностью.
3. Было обнаружено 3 случая плавного вращения позиционного угла оптической поляризации во время выброса новых компонент из ядра джета. При этом вращение позиционного угла оптической поляризации с самой медленной скоростью соответствовало появлению компоненты K3, скорость

движения которой в джете была примерно в 2 раза меньше средней скорости в джете.

4. Поведение источника во время оптической вспышки в марте-апреле 2011 года может быть объяснено излучением долгоживущей компоненты с постоянными параметрами Стокса и новой компонентой с сильной переменностью, позиционный угол оптической поляризации которой вращается со скоростью $\sim 13^\circ/\text{день}$ с начала вспышки до момента, соответствующего максимуму потока и затем остановившегося на уровне $\sim 310^\circ$. При исправлении за неопределенность $k \cdot 180^\circ$, значение позиционного угла оптической поляризации соответствует -50° , что значительно отличается от состояния перед вспышкой (-6°). Такое быстрое монотонное вращение может быть объяснено движением по спирали переменного источника в геликоидальном магнитном поле (нового сверхсветового узла яркости) [72, 73]. На VLBA-картах на 43 ГГц видно появление нового релятивистского узла яркости К8, совпадающее в пределах 1σ (относительно времени выброса T_{eject}) с максимумом на кривой блеска в фильтре R, вспышкой в гамма-диапазоне и на 37 ГГц.
5. Согласно оптическим данным поляризационные параметры переменного источника ($p = 27\%$, $\chi = -25^\circ$, “с” в Таб.3.2) близки к поляризационным параметрам компоненты К8 ($p = 27\%$, $\chi = -34^\circ$ см. Таб.3.5) в эпоху (12 июня 2011 года), когда компонента впервые была видна отдельно от ядра на радиокартах. Узел К8 сохранял высокий уровень поляризации и на более поздних эпохах.
6. Была обнаружена сильная переменность потока и уровня поляризации на масштабах менее суток. Такая переменность может отражать тонкую структуру магнитного поля, что следует ожидать, если плазма джета тур-

булентна [74]. Переменность, наблюдаемая 24 апреля 2011 г., совпадает со вспышкой в гамма-диапазоне и выбросом компоненты К9 в пределах 2σ (от времени выброса T_{eject}). Однако не исключено, что эта гамма-вспышка может быть связана с компонентой К8, движущейся по джету. Взаимодействие К8 со стоячей реколлимационной ударной волной (А1) могло привести ко второй гамма-вспышке и сильной переменности на масштабах менее суток, аналогично случаю 3С 454.3 [75]. Исходя из скорости движения, К8 достигла бы А1 примерно за 30 дней, что согласуется с промежутком между двумя максимумами в гамма-диапазоне (~ 42 дня). Таким образом, К9 может быть новой компонентой, порожденной взаимодействием К8 и А1. Подобное поведение можно видеть и при появлении К4. Две вспышки в гамма-диапазоне произошли с промежутком 28 дней, тогда как время, необходимое компоненте К4, чтобы достигнуть А1, составляет ~ 41 день.

7. За весь период наших наблюдений наибольший уровень потока в радиоядре на частоте 43 ГГц соответствовал самой мощной оптической вспышке. Помимо этого, во время данной оптической вспышки наблюдался высокий уровень поляризации в ядре ($\sim 13\%$), который упал до 2% после вспышки. Меньшее значение уровня поляризации в радиодиапазоне по сравнению с уровнем в оптике может быть объяснено тем, что радиоизлучение приходит из большего объема, нежели оптическое, а также турбулентностью магнитного поля. Позиционный угол поляризации ядра и практически всех компонент джета близок к позиционному углу оптической поляризации источника в спокойном состоянии. Таким образом можно предположить, что магнитное поле в областях, ответственных за оптическое и радиоизлучение, имеет одинаковую структуру. Более того, одновременное увеличение уровня поляризации оптического и радиоизлучения говорит о том, что эти зоны находятся в одной и той же области пространства.

Глава 4

Блазар S5 0716+71

4.1. Литературный обзор

Блазар S5 0716+71 ($\alpha = 07^h 21^m 53.4^s$, $\delta = +71^d 20^m 36^s$ J2000.0) - один из наиболее интенсивно изучаемых объектов типа BL Лас. Определение красного смещения ($z \sim 0.3$) этого объекта основано на измерениях размера косвенно зарегистрированной подстилающей галактики и положении 3-х галактик с красным смещением 0.26 [76, 77]. Недавнее обнаружение L_α в ультрафиолетовом спектре источника подтверждает ранние оценки красного смещения $0.2315 < z < 0.3407$ [78].

S5 0716+714 - один из наиболее ярких объектов типа BL Лас в оптическом диапазоне. Оптическая переменность изучалась многими исследователями, источник обладает постоянной активностью на различных временных масштабах [80, 81]. Источник был целью нескольких кампаний по исследованию переменности на временных масштабах менее суток (IDV) [82, 83]. Объект имеет высокий уровень поляризации и неоднократно показывал большое ($\sim 360^\circ$) вращение позиционного угла оптической поляризации во время мощных оптических вспышек, которое наблюдалось нами на телескопах LX-200 и АЗТ-8 [84–86]. В работе [80] была обнаружена значительная корреляция изменений на временных масштабах порядка 1 дня между оптическим и радиодиапазоном. В работе [87] было показано, что оптическая переменность источника имеет долгопериодическую компоненту на масштабах ~ 350 дней, на которую наложены повторяющиеся вариации на временных масштабах ~ 60 дней.

Гамма-излучение от объекта регистрировалось инструментами EGRET [88, 89] и AGILE [90] и космической гамма-обсерваторией Ферми [62, 91]. Источник

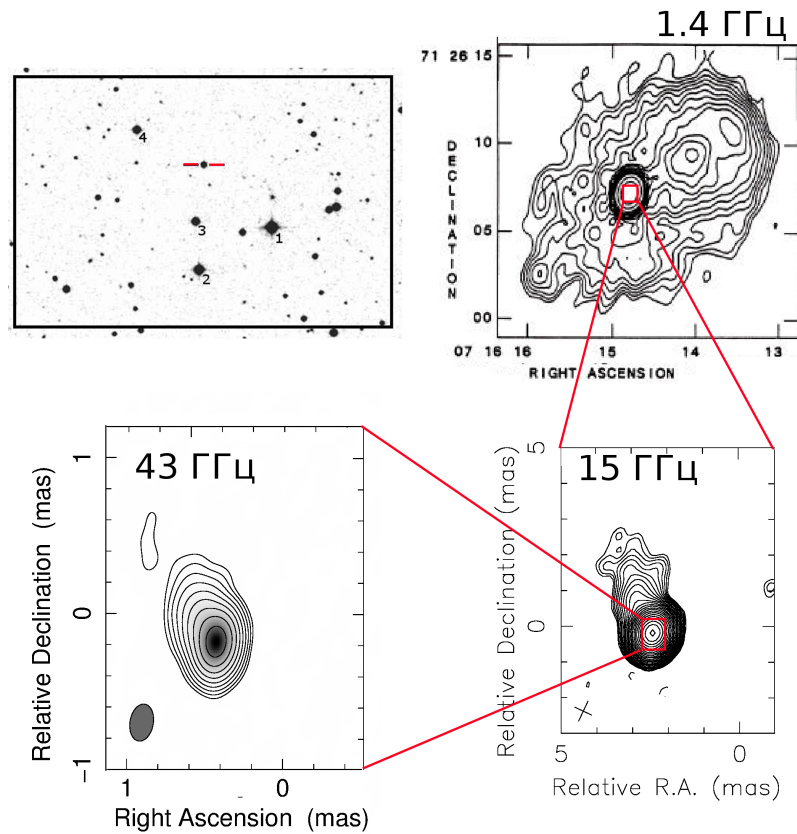


Рис. 4.1. Карта источника S5 0716+71 в оптическом диапазоне и радиоизображения на различных пространственных масштабах. Изображение на частоте 15 ГГц получено в рамках программы MOJAVE (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE>), на частоте 1.4 ГГц из работы [79].

ведет себя очень активно во всех диапазонах. В работе [86] была обнаружена корреляция между оптическим и гамма-излучением во время мощной вспышки в октябре 2011 г.

Объект изучается с помощью различных РСДБ-массивов более 20 лет. На 15 ГГц джет состоит из яркого ядра и диффузной компоненты, направленной в сторону севера, протяженностью несколько десятков мсек. На килопарсековом масштабе направление джета отличается примерно на 90° и источник имеет двойную структуру [79]. При VLBI-наблюдениях на частоте 15 ГГц в джете объекта были обнаружены движения со скоростями 0.51—0.65 мсек/год [46], 0.52

мсек/год [92], при наблюдениях на частоте 43 ГГц были обнаружены скорости 1.1—1.2 мсек/год [44].

4.2. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн

В отличие от объекта S4 0954+65, данный объект характеризуется непрерывной активностью как в оптическом, так и в гамма-диапазоне. Важно отметить, что в гамма-диапазоне объект очень яркий и его поток большую часть времени превышает 2.5×10^{-6} фот/(с см²). За исследуемый период наблюдалось большое количество вспышек. При наблюдениях объекта в активном состоянии в оптике группой СПбГУ, в которую входит автор, было опубликовано несколько астрономических телеграмм [84, 85]. На Рис. 4.2 показан набор кривых оптических фотометрических и поляриметрических данных, полученных нашей группой за 2008-2011 гг.

Важной особенностью данного объекта является компактность джета на частоте 43 ГГц, что делает изучение кинематики крайне сложным. В подобной ситуации предполагается, что для надежных результатов требуются как можно более плотные ряды данных в радиодиапазоне.

Нами были промоделированы 55 эпох с июня 2008 по май 2012 гг. За этот период было идентифицировано 11 компонент, помимо ядра A0, которое стационарно и расположено в южной части изображения. Из 11 компонент 6 были идентифицированы как движущиеся (K1-K6), 2 стационарные компоненты (A1 и A2), а также 3 трейлинговых компоненты. В среднем из ядра джета выбрасывалась примерно 1 новая компонента в год. На Рис.4.3 показано удаление компонент от ядра с течением времени, на Рис.4.4 показаны траектории компонент, наложенные на карту объекта на одной из эпох (последовательность изображений с наложенным положением компонент на всех исследуемых эпохах

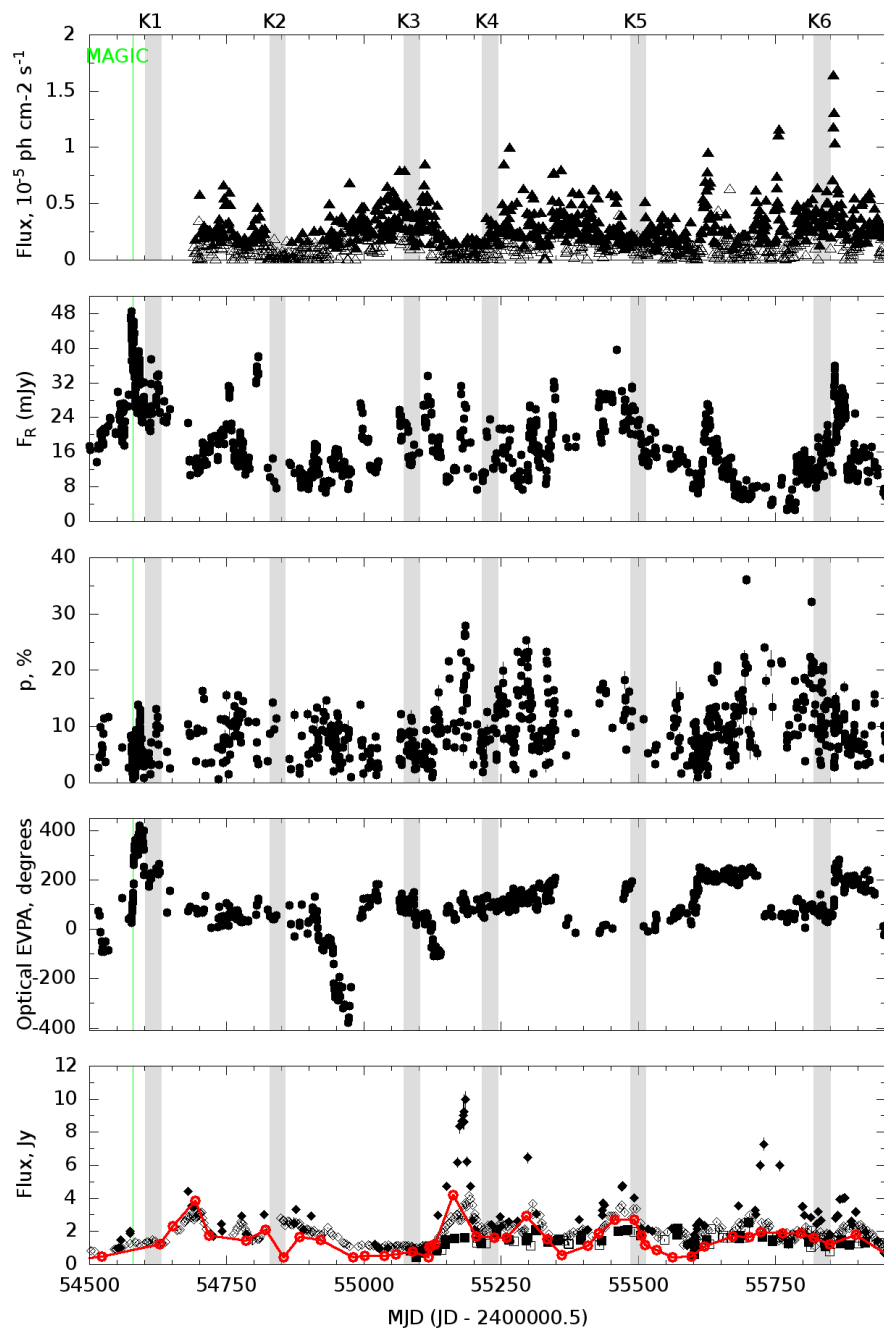


Рис. 4.2. Сверху вниз: гамма-кривая блеска, оптическая кривая блеска в полосе R; степень оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации; кривая блеска VLBI ядра на частоте 43 ГГц и кривая блеска от всего источника на 37 ГГц. Серые прямоугольники показывают время выброса сверхсветовых компонент. Регистрация в VHE-диапазоне отмечена зеленой линией [93]

приведена в приложении Б). Узлы движутся в направлении на северо-восток по немного отличающимся траекториям со скоростями от ~ 8 с до ~ 29 с. Видимые скорости порядка 20 с являются характерными для этого источника на парсековом масштабе [94]. Кинематические параметры компонент и параметры джета источника представлены в Таб. 4.1, 4.2. На Рис. 4.5 показана оптическая кривая блеска с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска радиоядра; кривые оптических поляризационных параметров. Для всех остальных компонент данные кривые блеска представлены в приложении Б.

Таблица 4.1. Кинематические параметры компонент

Кnot	N	μ мсек/г	β_{app} с	T_{eject} MJD	$\dot{\mu}_{\perp}$ мсек/г ²	$\dot{\mu}_{\parallel}$ мсек/г ²	$\langle \Theta \rangle$ °
K1	7	0.61 ± 0.01	11.83 ± 0.27	54617 ± 15	-1.24 ± 0.11	0.65 ± 0.09	27.2 ± 14.0
K2	5	1.27 ± 0.05	24.58 ± 1.06	54843 ± 15	2.18 ± 0.09	-0.60 ± 0.41	11.1 ± 10.4
K3	5	1.52 ± 0.03	29.35 ± 0.66	55088 ± 15	—	—	44.9 ± 9.1
K4	4	0.42 ± 0.02	8.22 ± 0.45	55230 ± 15	—	—	57.7 ± 13.0
K5	12	0.83 ± 0.05	16.05 ± 0.88	55500 ± 15	-0.24 ± 0.04	0.23 ± 0.02	39.5 ± 14.3
K6	6	1.06 ± 0.03	20.47 ± 0.73	55839 ± 15	—	—	28.7 ± 4.3

Таблица 4.2. Параметры джета источника за 2008-2012 гг.

θ_{jet} (°)	ϕ_{app} (°)	θ (°)	ϕ (°)	Γ
33.95 ± 17.69	12.83 ± 2.59	3.11 ± 1.45	0.88 ± 0.40	18.42 ± 7.24

Компонента K1: Выброс компоненты K1 в пределах 3σ совпадает с мощной оптической вспышкой (MJD ~ 54580) и быстрым вращением позиционного

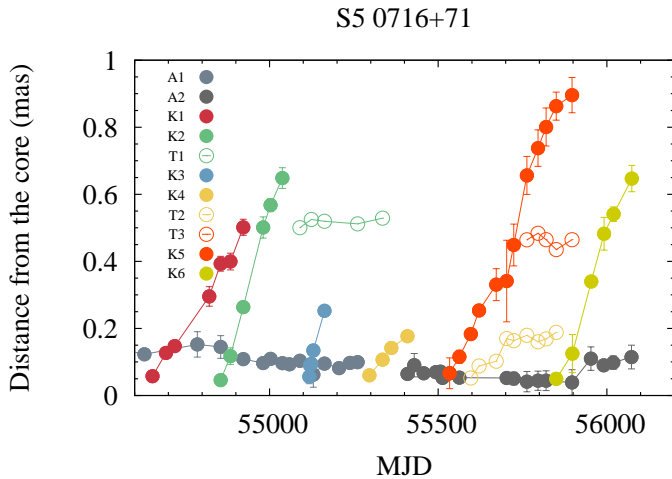


Рис. 4.3. Зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент.

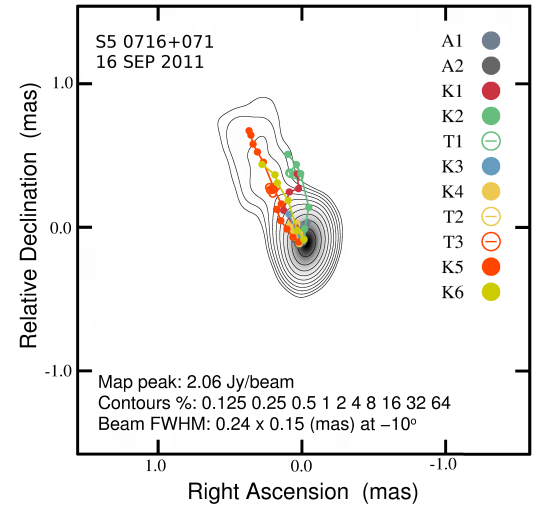


Рис. 4.4. Карта объекта на частоте 43 ГГц с наложенными траекториями компонент.

угла оптической поляризации на $\sim 330^\circ$ ($47^\circ/\text{день}$). Во время вспышки оптическая поляризация возросла до $\sim 15\%$. В данный промежуток наблюдений космическая гамма-обсерватория Ферми еще не начала свои наблюдения, однако объект был зарегистрирован в ТэВ-диапазоне телескопами MAGIC [93] во время максимума оптической вспышки.

Компонента K2: Появление компоненты K2 в пределах 3σ совпадает с вспышкой в оптическом и гамма-диапазоне MJD ~ 54800 .

Компонента K3: Выброс компоненты K3 в пределах 3σ совпадает с оптической вспышкой и вспышкой в гамма-диапазоне (MJD ~ 55100). Необходимо отметить, что зарегистрировать выброс этой компоненты удалось лишь благодаря плотной серии наблюдений в рамках кампании (14, 16, 20, 26 октября 2009). Если бы наблюдения проводились в обычном режиме 1 раз в месяц - компоненту не удалось бы обнаружить.

Компонента K4: Во время выброса компоненты K4 в пределах 2σ наблюдается вспышка в гамма-диапазоне (MJD ~ 55250), вспышка в оптическом диа-

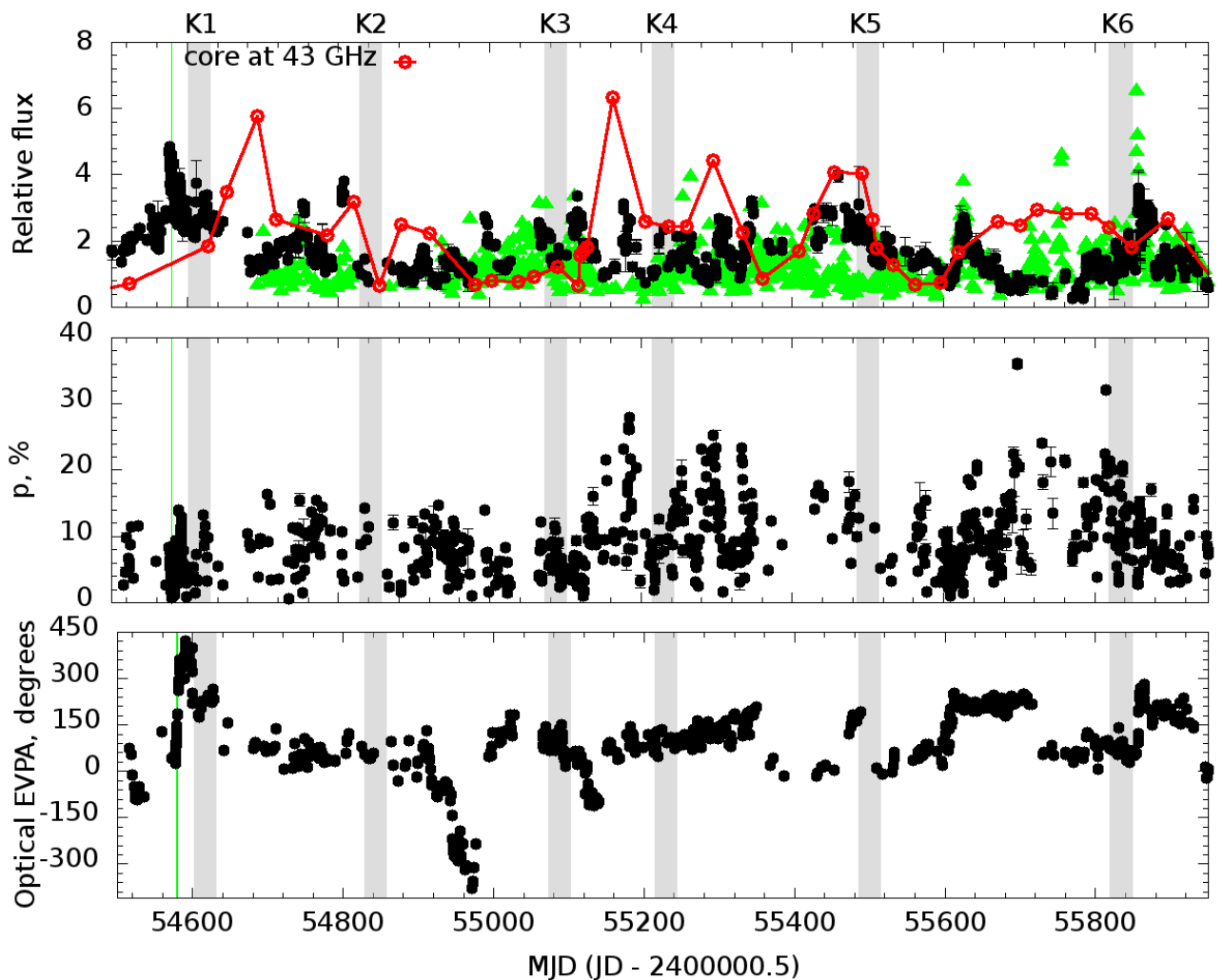


Рис. 4.5. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска радиоядра на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации.

пазоне и увеличение степени оптической поляризации до $\sim 15\%$.

Компонента K5: Появление яркой компоненты K5 сопровождалось вспышками в оптическом и гамма-диапазоне (MJD $\sim 55450 - 55500$). Интересно отметить, что некоторое время спустя после появления узла K5 наблюдалась достаточно сильная оптическая вспышка, сопровождавшаяся вращением позиционного угла оптической поляризации (MJD $\sim 55600 - 55650$). Мы предполагаем, что данная вспышка может быть связана с появлением яркой компоненты T2, которая скорее всего является трейлинговой компонентой. Кривая блеска ком-

поненты Т2 (см. Рис.Б.2) на частоте 43 ГГц достаточно хорошо воспроизводит оптическую кривую.

Компонента К6: Выброс компоненты К6 совпал с самой мощной вспышкой в гамма-диапазоне, оптической вспышкой, высоким уровнем оптической поляризации ($> 30\%$), а также значительным вращением позиционного угла поляризации ($\sim 157^\circ$ за промежуток времени MJD 55856.8-55858.07). За этот короткий промежуток нами было проведено 11 измерений на трех телескопах в различных частях света (LX200, Perkins, АЗТ-8).

4.3. Обсуждение и выводы

Объект вел себя очень активно во всех диапазонах длин волн на протяжении всего исследуемого интервала наблюдений. Нами был получен плотный ряд оптических фотометрических и поляриметрических наблюдений во время мощнейшей вспышки блазара S5 0716+71 в гамма-диапазоне. Мы исследовали структуру источника на частоте 43 ГГц.

1. Периоды активности радиоядра на частоте 43 ГГц достаточно хорошо совпадают с активностью в оптическом и гамма-диапазоне (Рис. 4.2,4.5).
2. Были отождествлены 6 движущихся компонент, появление которых сопровождалось активностью во всех исследуемых диапазонах.
3. В апреле 2008 года в оптическом диапазоне наблюдалась мощная вспышка, зарегистрированная также в ТЭВ-диапазоне, сопровождавшаяся вращением позиционного угла оптической поляризации на $\sim 330^\circ$ ($47^\circ/\text{день}$). Мы связываем эту вспышку с появлением компоненты К1.
4. Во время оптической вспышки MJD \sim 55850 и появления компоненты К6 нами было обнаружено вращение позиционного угла оптической поляри-

зации на $\sim 160^\circ$, которое прекратилось в момент максимума оптической вспышки. Это событие могло бы быть не зарегистрировано, если бы оптические наблюдения не проводились одновременно в трех различных местах (Санкт-Петербург, Крым, Аризона).

5. Была зарегистрирована оптическая вспышка $\text{MJD} \sim 55180$ (см. Рис. 4.2,4.5), во время которой произошло резкое увеличение степени поляризации оптического излучения до $\sim 28\%$. Эта вспышка примечательна тем, что в этот период объект не проявлял активности в гамма-диапазоне. Однако данная вспышка совпала с мощной вспышкой в радиодиапазоне на 1 мм, 7 мм и 2 см, таким образом, можно предположить, что вспышка произошла вблизи ядра джета на 43 ГГц.

Глава 5

Квазар PKS 1510-089

5.1. Литературный обзор

Блазар PKS 1510-089 ($\alpha = 15^h 12^m 50.5^s$, $\delta = -09^d 06^m 00^s$ J2000.0) является одним из наиболее часто наблюдаемых объектов. Впервые этот источник был идентифицирован в оптическом диапазоне как квазар с избытком ультрафиолетового излучения [95]. Красное смещение $z = 0.361$ было измерено по эмиссионным линиям в работе [96] и подтверждено в работе [97].

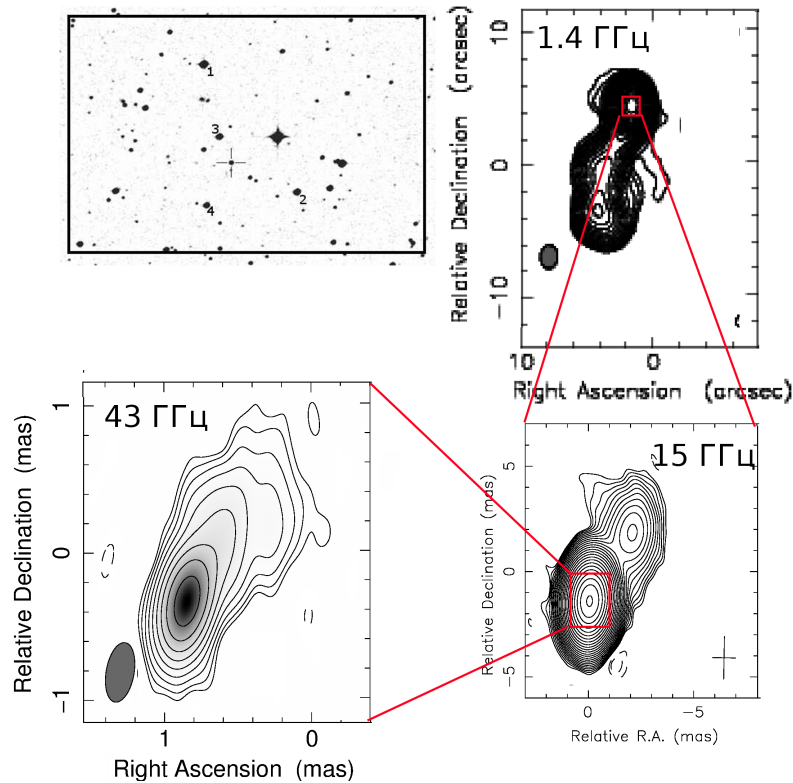


Рис. 5.1. Карта источника PKS 1510—089 в оптическом диапазоне и радиоизображения на различных пространственных масштабах. Изображение на частоте 15 ГГц получено в рамках программы MOJAVE (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE>), на частоте 1.4 ГГц из работы [98]

В спектральном распределении энергии доминирует гамма-излучение, в то время как синхротронный пик находится в инфракрасном диапазоне. В ультрафиолетовой области ярко выраженный пик, предположительно связанный с тепловым излучением аккреционного диска [99, 100]. В радиодиапазоне источник обладает быстрой переменностью с большой амплитудой [101]. Объект имеет высокий уровень оптической поляризации. Во время мощной оптической вспышки [12] наблюдалось большое ($\sim 720^\circ$) вращение позиционного угла оптической поляризации.

Источник интенсивно наблюдался в рентгеновской области аппаратами EXOSAT [102, 103], GINGA [104], ROSAT [105], ASCA [106] и Chandra [107]. Гамма-излучение от объекта регистрировалось инструментами EGRET [88] и космической гамма-обсерваторией Ферми [62].

Направления парсекового и килопарсекового джета различаются примерно на 180 градусов [98, 108]. При VLBI-наблюдениях на частоте 15 ГГц в джете объекта были обнаружены движения со скоростями 0.57—0.85 мсек/год [46], при наблюдениях на частоте 43 ГГц были обнаружены скорости 1.25—2.04 мсек/год [49], 0.28—0.63 мсек/год [44].

5.2. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн

Для изучения структуры джета были промоделированы и исследованы карты объекта на 46 эпохах. В результате анализа было отождествлено 10 компонент (К1-К6 движущиеся компоненты, А1 - стационарная компонента, Т1-Т3 -трейлинговые компоненты). В среднем из ядра джета выбрасывалась примерно 1 новая компонента в год. Кинематические параметры компонент и параметры джета источника представлены в Таб. 5.1, 5.2. На Рис. 5.2 представлена зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент,

а на Рис. 5.3 показаны траектории движения компонент, наложенные на карту источника. Последовательность изображений с наложенным положением компонент для всех эпох представлена в Приложении В.

Таблица 5.1. Параметры компонент в джете PKS 1510-089 на 43 ГГц

Кnot	N	μ мсек/г	β_{app} с	T_{eject} MJD	$\dot{\mu}_{\perp}$ мсек/г ²	$\dot{\mu}_{\parallel}$ мсек/г ²	$\langle \Theta \rangle$ °
K1	8	1.04 ± 0.08	22.45 ± 1.71	54621 ± 15	0.1 ± 0.06	0.62 ± 0.03	-32.6 ± 2.7
K2	8	0.84 ± 0.04	18.23 ± 0.79	54946 ± 33	-0.51 ± 0.08	-0.63 ± 0.06	-33.3 ± 2.9
K3	3	1.44 ± 0.13	31.20 ± 2.79	55162 ± 15	-	-	-37.8 ± 3.0
K4	6	0.69 ± 0.05	14.99 ± 1.02	55870 ± 16	0.2 ± 0.2	-1.39 ± 0.27	-20.3 ± 4.2
K5	5	0.91 ± 0.03	19.58 ± 0.68	55980 ± 15	-	-	-32.4 ± 5.7
K6	5	0.88 ± 0.08	18.91 ± 1.78	56295 ± 15	-	-	-5.8 ± 12.4

Таблица 5.2. Параметры джета PKS 1510-089 за 2008-2012 гг.

источник	θ_{jet} °	ϕ_{app} °	θ °	ϕ °	Г
PKS 1510-089	-27.24 ± 11.67	16.69 ± 1.29	2.74 ± 0.71	0.80 ± 0.21	20.92 ± 5.10

На Рис. 5.4 представлены многоволновые кривые блеска для объекта PKS 1510-089, кривые оптических поляризационных параметров, и отмечены эпохи выброса сверхсветовых компонент. На Рис. 5.5 показана оптическая кривая блеска с наложенными гамма-кривой блеска, кривой блеска радиоядра и кривые оптических поляризационных параметров.

У объекта можно выделить два периода мощной активности в гамма-диапазоне, которые споровождались активностью в оптическом диапазоне. Первый

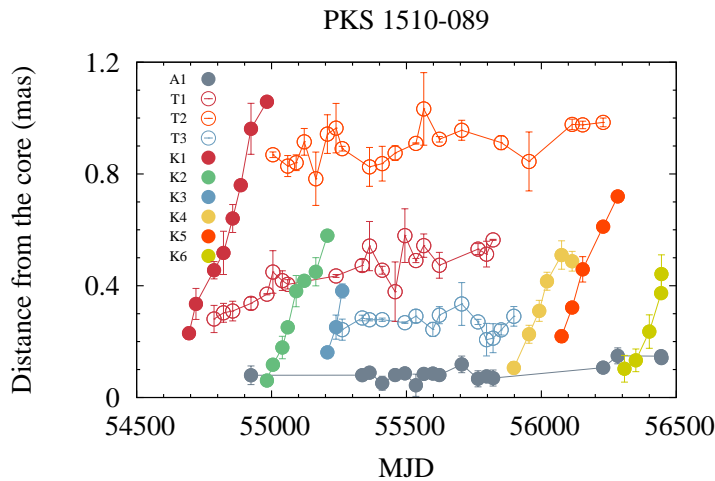


Рис. 5.2. Зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент.

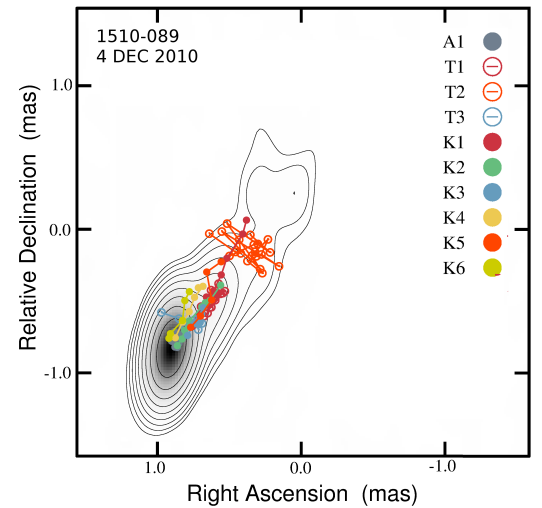


Рис. 5.3. Карта объекта на частоте 43 ГГц с наложенными траекториями компонент.

период длился с $MJD \sim 54700-54200$, второй с $MJD \sim 55600-56050$. Во время активности объекта в оптике группой наблюдателей СПбГУ были опубликованы несколько астрономических телеграмм [109, 110]. Важно отметить, что точки, соответствующие максимуму самой мощной вспышки в оптическом диапазоне ($MJD \sim 54950$) были получены на телескопе LX-200 [111]. Для 5 из 6 движущихся компонент нами была выявлена связь между временем выброса компоненты и активностью в гамма-, оптическом и радиодиапазонах. Хорошо видно, что позиционный угол оптической поляризации меняется достаточно сильно, причем за период наблюдений несколько раз происходили сильные вращения со скоростями $\sim 10 - 15^\circ/\text{день}$.

Во время данного периода активности на кривой блеска в гамма-диапазоне можно выделить 8 мощных вспышек. Для сравнения эпох гамма-вспышек и эпох выброса компонент вспышки были разделены на три группы. Группа А включает эпохи, в которых время максимума гамма-вспышки совпало с выбросом компоненты в пределах $|(T_{\gamma_{max}} - T_{eject})| \leq \sigma$, где σ - ошибка определения

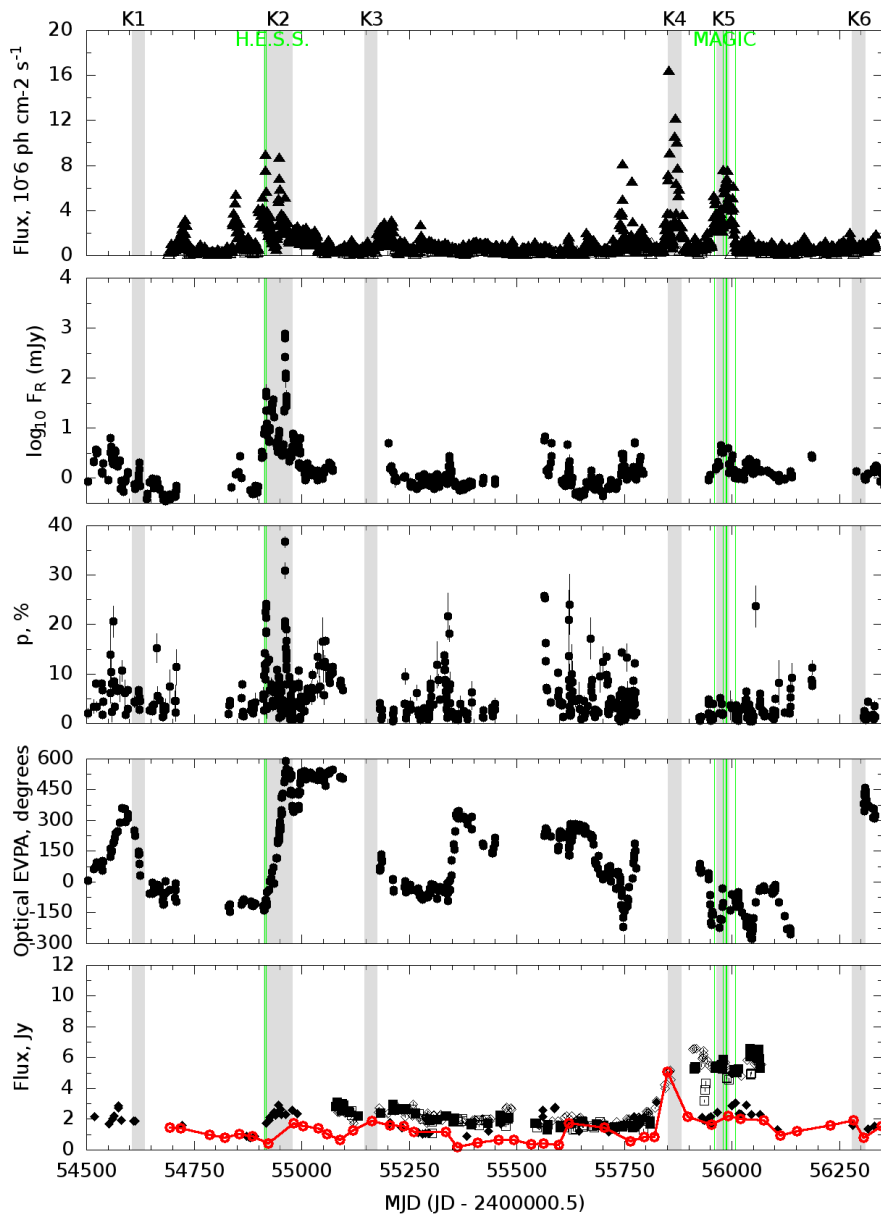


Рис. 5.4. Сверху вниз: гамма-кривая блеска, оптическая кривая блеска в полосе R; оптическая поляризация; позиционный угол оптической поляризации; кривые блеска на различных длинах волн в радиодиапазоне. Серые прямоугольники показывают время выброса сверхсветовых компонент. Регистрация в VHE-диапазоне отмечена зелеными линиями [112],[113].

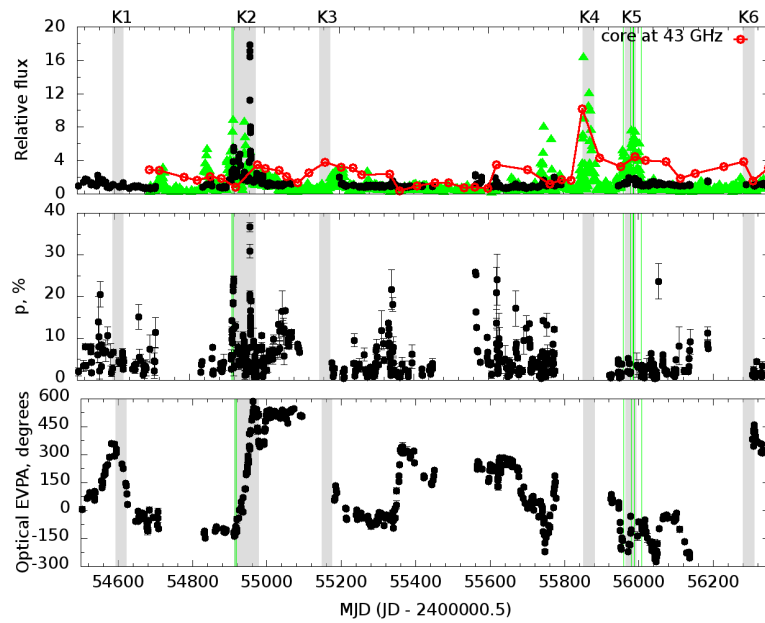


Рис. 5.5. Оптическая кривая блеска радиоядра в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска радиоядра на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

времени выброса T_{eject} , группа В, для которой $|(T_{\gamma_{max}} - T_{eject})| \leq 3\sigma$ и группа С, для которой не наблюдалось выброса компоненты. В Таб. 5.3 представлены эпохи гамма-вспышек, эпохи оптических вспышек, наличие вращения позиционного угла оптической поляризации, скорость вращения позиционного угла оптической поляризации, номер радиокон компоненты и тип вспышки согласно вышеописанной классификации.

Компонента K1: Выброс компоненты K1 сопровождался вращением позиционного угла оптической поляризации против часовой стрелки в течение 29 дней (298° , $10^\circ/\text{день}$), увеличением уровня оптической поляризации до $\sim 10\%$. Перед выбросом K1 наблюдалась вспышка в оптике (MJD=54555, $S_r = 2.22$ мЯн) и вращение позиционного угла оптической поляризации по часовой стрелке на 187° в течение 39 дней ($\sim 5^\circ/\text{день}$).

Компонента K2: Выброс компоненты K2 сопровождался мощными вспышками в гамма- и оптическом диапазоне, вращением позиционного угла опти-

Таблица 5.3. Характеристики оптических вспышек

N	гамма-вспышка MJD	оптическая вспышка °	вращение χ_{opt} °/день	скорость вращения χ_{opt}	выброс узла	Тип
1	54729	нет данных	-	-	-	C
2	54846	Да	-	-	-	C
3	54916	Да	720	12	K2	B
4	54947	Да	720	12	K2	A
5	55183	Да	-	-	K3	B
6	55746	Да	406	15	-	C
7	55854	нет данных	-	-	K4	A
8	55990	Да	213	4.5	K5	A

ческой поляризации, увеличением уровня оптической поляризации до 36% и вспышкой в радиоядре на 43 ГГц. Позиционный угол оптической поляризации повернулся на $\sim 720^\circ$ за ~ 60 дней. При этом степень оптической поляризации достигала 36%. Вспышка в гамма-диапазоне № 3 произошла примерно через 2 недели после начала вращения, а вспышка № 4 совпала с окончанием вращения позиционного угла оптической поляризации. В нашей статье [12] более подробно рассматриваются окрестности данных вспышек. Оптическая вспышка с максимумом MJD ~ 54961 является самой мощной за историю наблюдения объекта с 1948 г. [114]. Максимум вспышки был зарегистрирован на телескопе СПбГУ LX-200 [109, 111]. Во время вспышки № 4 объект был зарегистрирован в ТЭВ-диапазоне телескопами Н.Е.С.С. [112], причем в это же время наблюдалось резкое увеличение степени оптической поляризации до 24%. Увеличенный график в окрестности выброса K2 представлен на Рис. 5.6. Мы считаем, что узел K2 отвечает за группу вспышек № 3 и № 4, а также, возможно № 2.

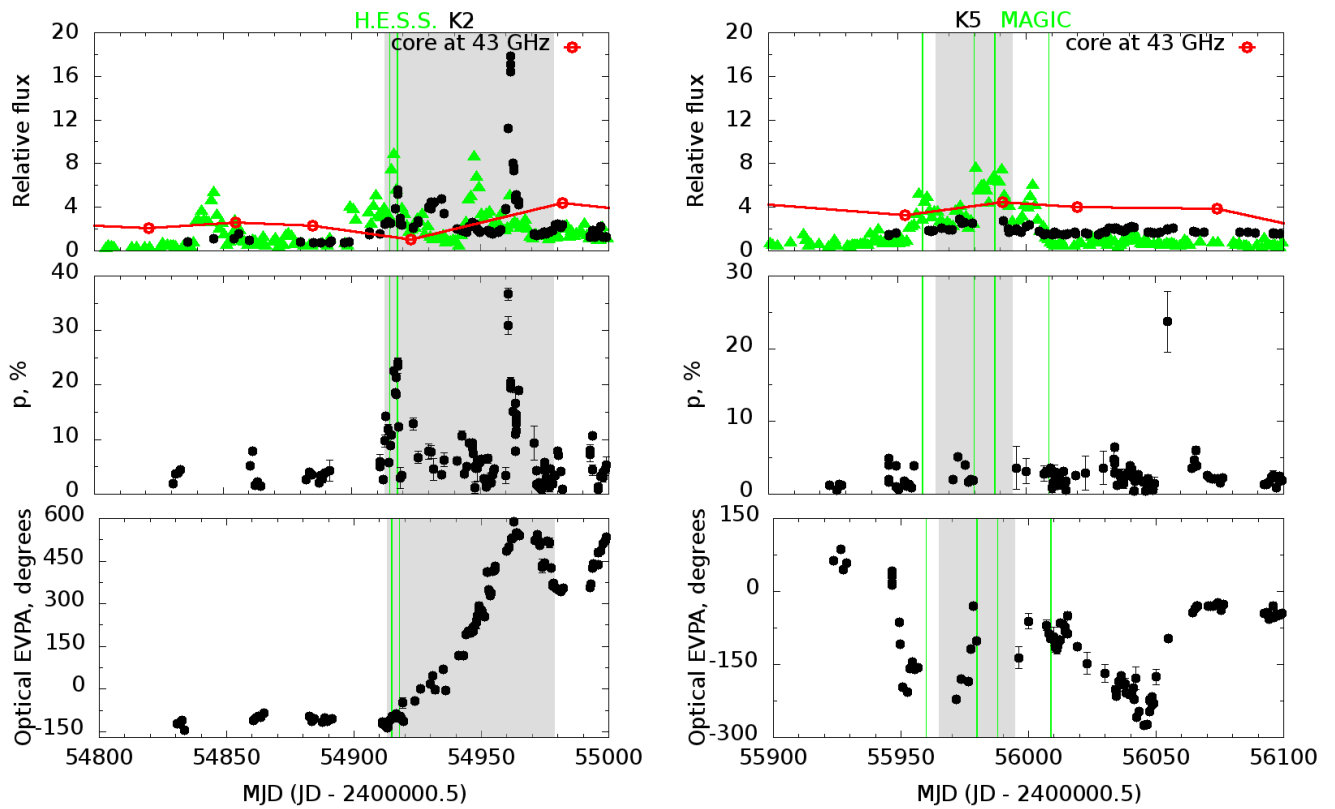


Рис. 5.6. Оптическая кривая блеска в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска ядра на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров для компонент K2 и K5.

Компонента K3: Выброс компоненты K3 сопровождался вспышками в гамма- и оптическом диапазоне и вспышкой в радиоядре на 43 ГГц, степень оптической поляризации была достаточно скромной и не превышала 7%, значительного вращения позиционного угла оптической поляризации не было обнаружено. Непосредственно во время выброса компоненты отсутствуют данные в оптическом диапазоне, однако в пределах 3σ от момента выброса наблюдается оптическая вспышка (MJD \sim 55201).

Компонента K4: Появление компоненты K4 (в пределах 1σ) сопровождалось самой мощной гамма-вспышкой за историю наблюдений данного объекта, а также самой мощной вспышкой в радиоядре объекта за весь период наблюдений. Оптические наблюдения за данный период отсутствуют.

Компонента К5: При появлении компоненты К5, помимо вспышки в гамма-диапазоне, оптической вспышки и вспышки в радиоядре, источник был зарегистрирован в ТэВ-диапазоне телескопами MAGIC [113]. В оптическом диапазоне также наблюдалась небольшая вспышка, уровень поляризации не превышал 5%. Увеличенный график в окрестности выброса К5 представлен на Рис. 5.6 вместе с графиком при выбросе К2. На данном графике видно, что во время выброса К5 источник был намного спокойнее в оптике, однако набор оптических данных в этом случае меньше. Позиционный угол оптической поляризации менялся достаточно сильно и хаотично, примерно с $MJD \sim 56000$ произошло вращение на $\sim 213^\circ$ в течение 47 дней (около $4.5^\circ/\text{день}$).

Компонента К6: Появление К6 сопровождалось небольшой вспышкой в гамма-диапазоне, в оптическом диапазоне объект вел себя спокойно в момент выброса, однако оптические данные непосредственно перед вспышкой отсутствуют.

5.3. Обсуждение и выводы

Подробный анализ поведения объекта PKS 1510—089 в различных диапазонах позволяет сделать некоторые заключения о механизмах и области генерации высокоэнергетического излучения.

1. За период наблюдений с 2008 по 2012 гг. нами был идентифицирован ряд вспышек в гамма-диапазоне, которые были тесно связаны с выбросом новых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц. За время работы космической гамма-обсерватории Ферми мощные гамма-вспышки были зарегистрированы во время выброса четырех из пяти компонент (К2, К3, К4, К5).

2. Во время вспышек в гамма-диапазоне № 3, 4 и 8 объект был зарегистрирован в ТэВ-диапазоне, что помещает область генерации данных вспышек за пределы области ШЭЛ, непрозрачной для этого диапазона спектра, а выброс новых сверхсветовых компонент в непосредственной близости к максимумам вспышек означает, что данные вспышки произошли вблизи ядра джета на частоте 43 ГГц.
3. Нами было обнаружено несколько вращений позиционного угла оптической поляризации во время выброса компонент. Во время выброса компоненты К1 наблюдалось вращение против часовой стрелки на 298° в течение 29 дней, а непосредственно перед выбросом - по часовой стрелке на 187° в течение 39 дней. Во время выброса К5 наблюдалось вращение на 213° в течение 47 дней. Продолжительное плавное вращение позиционного угла оптической поляризации на $\sim 720^\circ$ в течение 60 дней в 2009 году во время мощных вспышек в оптическом и гамма-диапазонах (MJD ~ 54947) предполагает, что эта переменность была обусловлена движением сверхсветового узла яркости К2, который виден на РСДБ-картах. Как и в случае BL Lac [39], а также описанных выше вращений позиционного угла оптической поляризации у объектов S4 0954+658 (см. Главу 3) и S5 0716+71 (см. Главу 4), такое поведение может быть объяснено в рамках модели, в которой возмущение распространяется в джете по спиральной траектории.

Глава 6

Блазар PKS 1222+216

6.1. Литературный обзор

Объект PKS 1222+216 (также известный как 4C +21.35, $\alpha = 12^h 24^m 54.4^s$, $\delta = +21^d 22^m 46^s$ J2000.0, $z = 0.432$ [115]) является ярким в гамма-диапазоне FSRQ [62, 88], а также входит в список источников, зарегистрированных в VHE-диапазоне ($E > 100$ ГэВ) телескопами MAGIC [116]. Впервые был обнаружен в радиодиапазоне.

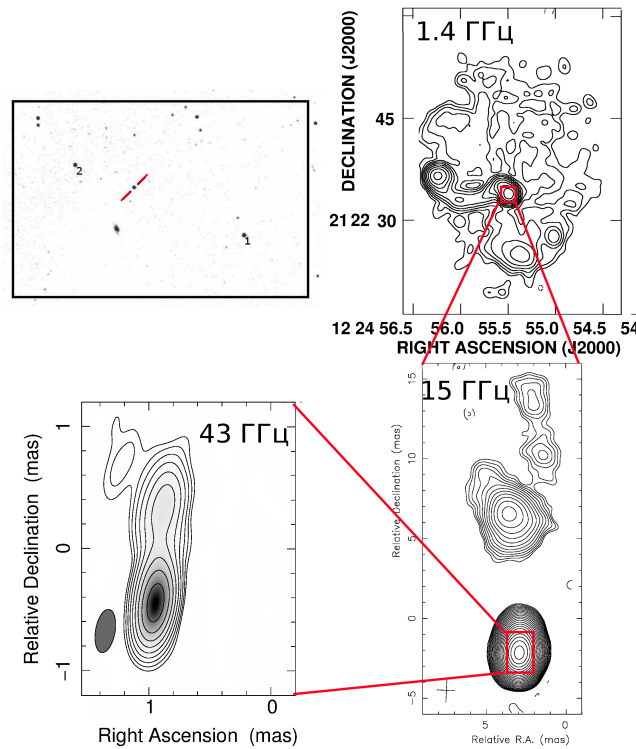


Рис. 6.1. Карта источника 4C +21.35 в оптическом диапазоне и радиоизображения на различных пространственных масштабах. Изображение на частоте 15 ГГц получено в рамках программы MOJAVE (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE>), на частоте 1.4 ГГц из работы [117]

Парсековый джет на частоте 43 ГГц направлен на север, на частоте 15

ГГц диффузный джет протяженностью ~ 15 мсек также направлен на север, в то время как килопарсековый джет сильно искривлен и направлен на восток [117, 118]. Отличительной особенностью этого источника является наличие на масштабах порядка 100 кпк радиоструктуры, напоминающей морфологию радиогалактик. При VLBI-наблюдениях на частоте 15 ГГц в джете объекта были обнаружены движения со скоростями 0.096—1.013 мсек/год (2.5—26.6 с) [64], при наблюдениях на частоте 43 ГГц были обнаружены скорости 0.5—0.9 мсек/год [44]. Радиоядро имеет плоский спектр и яркостную температуру $T_b \sim 5 \times 10^{11}$ К [119], что так же, как и сверхсветовые движения, говорит о малом угле наклона к лучу зрения.

PKS 1222+216 был зарегистрирован EGRET (скорее всего 3EG J1224+2118 [88]). Источник был зарегистрирован космической гамма-обсерваторией Ферми и попал в First LAT Catalog 1FGL [62]. В декабре 2009 года инструментами AGILE Gamma-ray Imaging Detector и Fermi-LAT была зарегистрирована мощная вспышка [120, 121]. В конце апреля 2010 года Fermi-LAT зарегистрировал мощную вспышку в ГэВ диапазоне [122]. Анализ, выполненный Нероновым и др. [123] показал, что во время этой вспышки гамма-излучение простиралось до области энергий, превышающей 100 ГэВ, попадая в (VHE) диапазон. В это же время наблюдалось увеличение яркости в инфракрасном диапазоне [124]. Вторая значительная ГэВ вспышка была зафиксирована Fermi и AGILE в июне 2010 года [125, 126]. В это же время (17 июня 2010 г.) телескопами MAGIC был обнаружен избыток фотонов в $\sim 0.07 - 0.4$ ТэВ из области 4C+21.35 [127].

6.2. Кинематика джета и поведение на различных длинах волн

Для определения параметров джета нами было произведено моделирование структуры джета на 45 эпохах. Из ядра джета выбрасывалось примерно 1

новая компонента в год. В ходе анализа были отождествлены 10 компонент, из них 5 движущиеся, 2 квазистационарные, 1 трейлинговая. Кинематические параметры компонент и параметры джета источника представлены в Таб. 6.1, 6.2. На Рис. 6.2 представлена зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент, а на Рис. 6.3 показаны траектории движения компонент, наложенные на карту источника. Последовательность изображений с наложенным положением компонент для всех эпох представлена в Приложении Г.

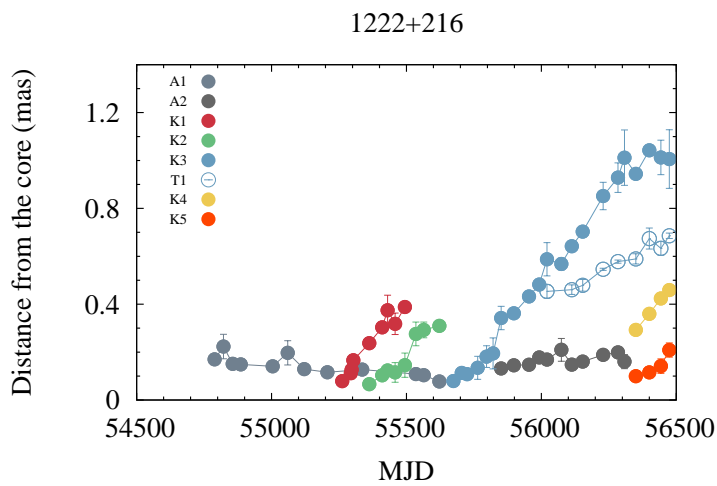


Рис. 6.2. Зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент.

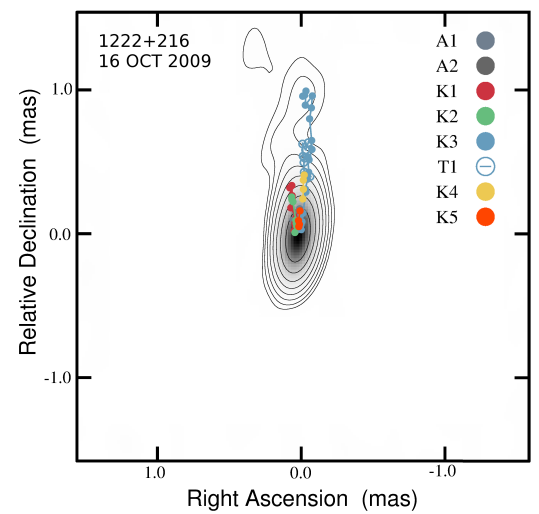


Рис. 6.3. Карта объекта на частоте 43 ГГц с наложенными траекториями компонент.

Для 3-х из 5-ти компонент нами была выявлена связь между временем выброса компоненты и активностью в гамма-, оптическом и радиодиапазонах. Хорошо видно, что при спокойном состоянии объекта в оптике и гамма-диапазоне позиционный угол оптической поляризации находился в области $\chi \sim 150^\circ$, что отличается от среднего направления джета (0°).

На Рис. 6.4 представлены многоволновые кривые блеска для объекта PKS 1222+216, кривые оптических поляризационных параметров, и отмечены эпо-

Таблица 6.1. Кинематические параметры компонент

Knot	N	μ	β_{app}	T_{eject}	$\dot{\mu}_{\perp}$	$\dot{\mu}_{\parallel}$	$\langle \Theta \rangle$
K1	9	0.52 ± 0.03	13.35 ± 0.75	55201 ± 15	-	-	12.8 ± 5.8
K2	9	0.33 ± 0.03	8.06 ± 0.84	55306 ± 15	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01	12.0 ± 6.0
K3	21	0.43 ± 0.02	10.88 ± 0.56	55624 ± 15	0.10 ± 0.01	-0.12 ± 0.01	-5.7 ± 2.2
K4	4	0.49 ± 0.01	12.57 ± 0.15	56133 ± 15	-	-	-4.3 ± 0.4
K5	4	0.27 ± 0.09	6.91 ± 2.26	56212 ± 51	-	-	0.8 ± 1.5

Таблица 6.2. Параметры джета источника за 2008-2012 гг.

θ_{jet} (°)	ϕ_{app} (°)	θ (°)	ϕ (°)	Γ
1.89 ± 9.32	8.94 ± 0.32	5.54 ± 1.42	0.86 ± 0.22	10.40 ± 2.50

хи выброса сверхсветовых компонент. На Рис. 6.5 показана оптическая кривая блеска с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска сверхсветовых компонент и кривые оптических поляризационных параметров.

На кривой блеска за весь период наблюдений очевиден период мощной активности объекта в гамма-диапазоне $MJD \sim 55100 - 55800$ (Рис.6.4). В это же время наблюдается активное поведение объекта в оптическом диапазоне и радиодиапазоне на частоте 43 ГГц. Во время данного периода активности на оптической кривой блеска можно выделить 6 вспышек. Для сравнения эпох оптических вспышек и эпох выброса компонент оптические вспышки были разделены на три группы. Группа А включает эпохи, в которых время максимума оптической вспышки совпало с выбросом компоненты в пределах $|(T_{opt_{max}} - T_{eject})| \leq \sigma$, где σ - ошибка определения времени выброса T_{eject} , группа В, для которой $|(T_{opt_{max}} - T_{eject})| \leq 3 \sigma$ и группа С, для которой не наблюдалось выброса ком-

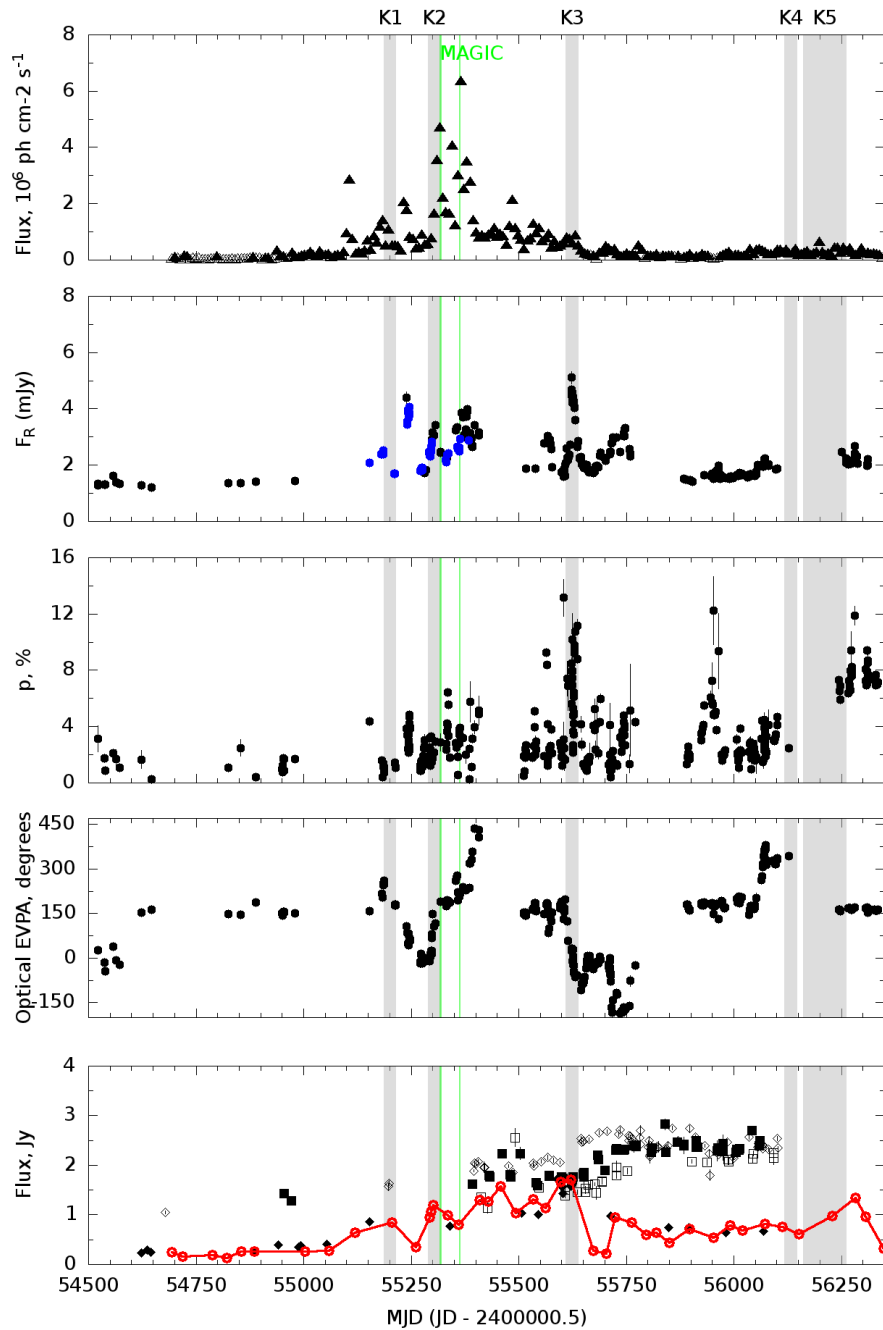


Рис. 6.4. Сверху вниз: гамма-кривая блеска, оптическая кривая блеска в полосе R (синие кружки - соответствуют фильтру V); оптическая поляризация; позиционный угол оптической поляризации; кривая блеска VLBI ядра на частоте 43 ГГц и кривая блеска от всего источника на 37 ГГц. Серые прямоугольники показывают время выброса сверхсветовых компонент. Регистрация в VHE-диапазоне отмечена зелеными линиями [128].

ПОНЕНТЫ.

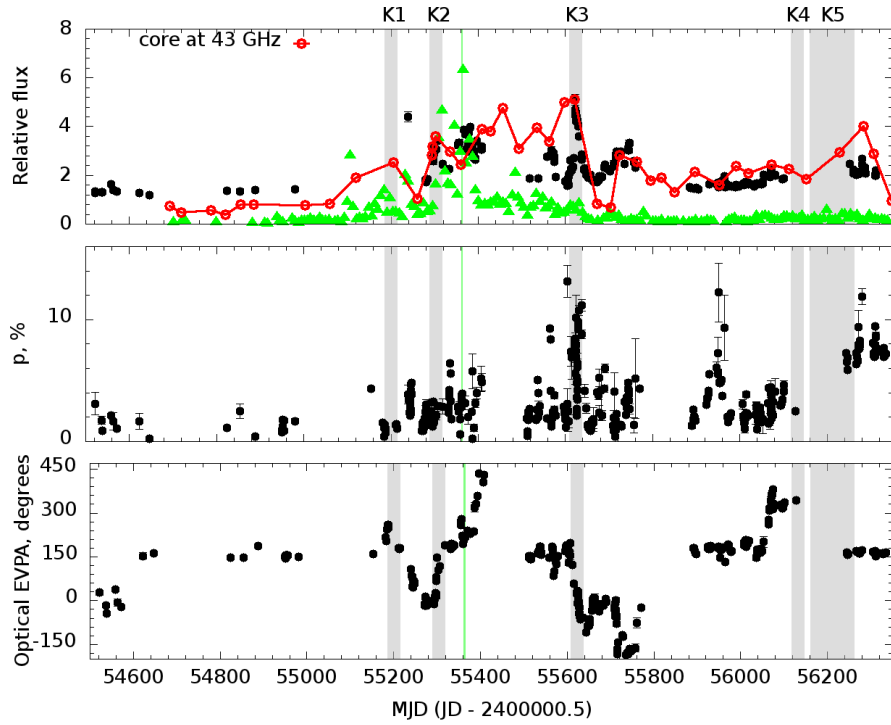


Рис. 6.5. Оптическая кривая блеска радиоядра в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска радиоядра на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

В Таб.6.3 представлены эпохи оптических вспышек, наличие гамма-вспышек, наличие вращения позиционного угла оптической поляризации, скорость вращения позиционного угла оптической поляризации, номер выброшенной компоненты и тип вспышки согласно вышеописанной классификации.

Компонента K1: Выброс компоненты K1 сопровождался вспышкой в гамма-диапазоне, вспышкой в оптическом диапазоне, вращением позиционного угла оптической поляризации на 248° за 84 дня ($\sim 3.15^\circ/\text{день}$), увеличением уровня оптической поляризации и вспышкой в радиоядре на 43 ГГц.

Компонента K2: Появление K2 сопровождалось мощной вспышкой в гамма-диапазоне, вспышкой в оптическом диапазоне, вращением позиционного угла оптической поляризации на 440° за 115 дней ($\sim 3.82^\circ/\text{день}$) и вспышкой в ра-

Таблица 6.3. Характеристики оптических вспышек

N	гамма-вспышка MJD	оптическая вспышка	вращение $\chi_{opt} \text{ }^\circ$	скорость вращения $\chi_{opt} \text{ }^\circ/\text{день}$	выброс узла	Тип
1	55239	Да	265	3.2	K1	B
2	55306	Да	440	3.8	K2	A
3	55370	Да	-	-	-	C
4	55573		68	7.5	-	C
5	55622	скромная	203	5.5	K3	A
6	55746	скромная	-	-	-	C

диодре. Уровень поляризации во время оптической вспышки не превышал 4%. Через 60 дней после выброса компоненты из ядра наблюдалась вторая вспышка в гамма- и оптическом диапазоне, которая сопровождалась регистрацией объекта в области ТэВ-энергий (объект был зарегистрирован телескопами MAGIC [127]). Этот момент соответствует первой эпохе, на которой компонента была видна отдельно от ядра.

Компонента K3: Выброс компоненты K3 в пределах 1σ сопровождался мощной вспышкой в оптическом диапазоне, вращением позиционного угла оптической поляризации на 203° за 37 дней ($\sim 5.5 \text{ }^\circ/\text{день}$), вспышкой в радиоядре и самым высоким уровнем поляризации оптического излучения за период наблюдений, более 10%, причем уровень активности в гамма-диапазоне был достаточно скромным.

Компоненты K4 и K5: Во время выброса компонентов K4 и K5 не наблюдалось значительной активности в гамма-диапазоне. Оптические наблюдения на данном периоде отсутствовали. Появление компонент сопровождалось вспышкой в радиоядре джета на 43 ГГц.

Необходимо отметить, что было обнаружено изменение направления джета источника за период наблюдений с $\sim 11^\circ$ (компоненты K1 и K2) до $\sim -5^\circ$ (компоненты K3, K4, K5). Снижение уровня активности в гамма-диапазоне может быть связано с изменением направления джета.

6.3. Обсуждение и выводы

За время наших наблюдений 2008-2012 гг. объект вел себя активно во всех исследуемых диапазонах.

1. На кривой блеска можно видеть, что период активности в ядре джета $\text{MJD} \sim 55100\text{--}55800$ совпадает с мощной активностью объекта в оптическом и гамма-диапазонах
2. Были идентифицированы 5 движущихся компонент в джете, 3 из которых были выброшены во время вспышек в оптическом и гамма-диапазонах.
3. Во время исторического максимума в гамма-диапазоне $\text{MJD} \sim 55350$ из ядра джета на 43 ГГц была выброшена новая компонента (K2). Появление компоненты сопровождалось вращением позиционного угла оптической поляризации и вспышкой в оптическом диапазоне, объект был зарегистрирован в области ТэВ-энергий (телескопами MAGIC [127]). Этот момент соответствует первой эпохе, на которой компонента была видна отдельно от ядра на VLBA-картах. Наличие излучения в ТэВ-диапазоне помещает область генерации данных вспышек за пределы области ШЭЛ, что с одновременной активностью в оптическом и радиодиапазонах позволяет сделать заключение о том, что данные вспышки произошли вблизи ядра джета на частоте 43 ГГц.

4. Было обнаружено изменение направления джета источника за период наблюдений с $\sim 11^\circ$ (компоненты К1 и К2) до $\sim -5^\circ$ (компоненты К3, К4, К5). Снижение уровня активности в гамма-диапазоне может быть связано с изменением направления джета.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы:

1. Проведены оптические фотополариметрические мониторинговые наблюдения ряда блазаров на телескопах LX-200 и АЗТ-8. Произведена обработка данных в оптическом, радио и гамма-диапазонах для четырех блазаров (S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216).
2. Определены параметры джетов блазаров S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216 на частоте 43 ГГц.
3. Проанализированы наблюдательные данные для блазаров S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216 в гамма-, оптическом и радиодиапазоне и проведена интерпретация ряда вспышек в гамма- и оптическом диапазоне как распространение возмущения в джете.
4. Локализована зона генерации гамма-излучения для ряда вспышек 2008-2012 гг. У исследуемых объектов она находится в парсековом радиоджете.

Автор приносит глубокую благодарность Валерию Михайловичу Ларионову и Светлане Георгиевне Эрштадт, а также Владимиру Александровичу Гаген-Торну и Ивану Станиславовичу Троицкому. Кроме того, автор благодарен всем сотрудникам лаборатории наблюдательной астрофизики СПбГУ, принимавшим участие в получении обширного высококачественного наблюдательного материала, на котором основана данная работа.

Список сокращений

АЯГ — Активные ядра галактик;

УЭЛ — Область узких эмиссионных линий;

ШЭЛ — Область широких эмиссионных линий;

ACD — (AntiCoincidence Detector) Детектор заряженных частиц;

FITS — Flexible Image Transfer System;

FSRQ — (Flat spectrum radio quasar) Радиоквазар с плоским спектром;

FSSC — (Fermi Science Support Center) Центр поддержки обсерватории Ферми;

FWHM — (Full Width at Half Maximum) Полная ширина (кривой) на уровне полумаксимума;

IDV — (Intraday variability) Внутрисуточная переменность;

NED — (NASA Extragalactic Database) База данных по внегалактическим объектам (<http://ned.ipac.caltech.edu/>);

SED — (Spectral energy distribution) Спектральное распределение энергии;

SNR — (Signal to Noise Ratio) Отношение сигнал-шум;

SSC — (Synchrotron Self Compton) Синхрокомптоновский механизм излучения;

VLBI — (Very Long Baseline Interferometry) Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами;

WEBT — (Whole Earth Blazar Telescope) Всемирный блазарный телескоп (<http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/>);

Список литературы

1. Antonucci R. Unified models for active galactic nuclei and quasars // [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#). 1993. Vol. 31. P. 473–521.
2. Urry C. M., Padovani P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // [Publications of Astronomical Society of the Pacific](#).. 1995. Vol. 107. P. 803.
3. Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y. et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // [Astronomy and Astrophysics](#). 2012. Vol. 545. P. A113.
4. Hada K., Doi A., Kino M. et al. An origin of the radio jet in M87 at the location of the central black hole // [Nature](#). 2011. Vol. 477. P. 185–187.
5. Donato D., Ghisellini G., Tagliaferri G., Fossati G. Hard X-ray properties of blazars // [Astronomy and Astrophysics](#). 2001. Vol. 375. P. 739–751.
6. Matthews T. A., Sandage A. R. Optical Identification of 3c 48, 3c 196, and 3c 286 with Stellar Objects. // [Astrophysical Journal](#). 1963. Vol. 138. P. 30.
7. Dent W. A. Quasi-Stellar Sources: Variation in the Radio Emission of 3C 273 // [Science](#). 1965. Vol. 148. P. 1458–1460.
8. 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 // [Astrophysical Journal](#). 1966. Vol. 146. P. 634.
9. Poutanen J., Stern B. GeV Breaks in Blazars as a Result of Gamma-ray Absorption Within the Broad-line Region // [Astrophysical Journal Letters](#). 2010. Vol. 717. P. L118–L121.

10. Agudo I., Jorstad S. G., Marscher A. P. et al. Location of γ -ray Flare Emission in the Jet of the BL Lacertae Object OJ287 More than 14 pc from the Central Engine // [Astrophysical Journal Letters](#). 2011. Vol. 726. P. L13.
11. Agudo I., Marscher A. P., Jorstad S. G. et al. On the Location of the γ -Ray Outburst Emission in the BL Lacertae Object AO 0235+164 Through Observations Across the Electromagnetic Spectrum // [Astrophysical Journal Letters](#). 2011. Vol. 735. P. L10.
12. 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 // [Astrophysical Journal Letters](#). 2010. Vol. 710. P.L126–L131.
13. Bregman J. N., Glassgold A. E., Huggins P. J. et al. Multifrequency observations of the superluminal quasar 3C 345 // [Astrophysical Journal](#). 1986. Vol. 301. P. 708–726.
14. Белоконь Е. Т. 3C 120: связь оптической переменности со сверхсветовыми компонентами миллисекундной радиоструктуры // [Астрофизика](#). 1987. Vol. 27. P. 429–446.
15. Atwood W. B., Bagagli R., Baldini L. et al. Design and initial tests of the Tracker-converter of the Gamma-ray Large Area Space Telescope // [Astroparticle Physics](#). 2007. Vol. 28. P. 422–434.
16. Atwood W. B., Abdo A. A., Ackermann M. et al. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission // [Astrophysical Journal](#). 2009. Vol. 697. P. 1071–1102.

17. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. Bright Active Galactic Nuclei Source List from the First Three Months of the Fermi Large Area Telescope All-Sky Survey // *Astrophysical Journal*. 2009. Vol. 700. P. 597–622.
18. Mattox J. R., Bertsch D. L., Chiang J. et al. The Likelihood Analysis of EGRET Data // *Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 461. P. 396.
19. Wells D. C., Greisen E. W., Harten R. H. FITS - a Flexible Image Transport System // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1981. Vol. 44. P. 363–370.
20. Копацкая Е. Н., Ларионов В. М. Фотометрические и поляриметрические наблюдения с ПЗС-камерой на телескопах LX200 и АЗТ-8: Учебно-методич. пособие. Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 2007.
21. Bertin E., Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction. // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1996. Vol. 117. P. 393–404.
22. Ефимова Н. В. Цветовая и поляризационная переменность блазаров: Кандидатская диссертация / ГАО РАН. 2009.
23. Mead A. R. G., Ballard K. R., Brand P. W. J. L. et al. Optical and infrared polarimetry and photometry of blazars // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1990. Vol. 83. P. 183–204.
24. Berry R., Burnell J. The handbook of astronomical image processing. Richmond: Willmann-Bell, 2005.
25. Блинов Д. Строение джетов блазаров по результатам оптического мониторинга: Кандидатская диссертация / СПбГУ. 2011.
26. Ryle M., Hewish A. The synthesis of large radio telescopes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1960. Vol. 120. P. 220.

27. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W., Jr. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 2nd Edition. 2001.
28. Rastorgueva E. Multifrequency VLBI Observations of Selected Active Galactic Nuclei: Ph. D. thesis / Turun Yliopisto University of Turku. 2011.
29. Schwab F. R., Cotton W. D. Global fringe search techniques for VLBI // [Astronomical Journal](#). 1983. Vol. 88. P. 688–694.
30. Cotton W. D. Fringe Fitting // Very Long Baseline Interferometry and the VLBA / Ed. by J. A. Zensus, P. J. Diamond, P. J. Napier. Vol. 82 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 1995. P. 189.
31. Bridle A. H., Greisen E. W. The NRAO AIPS Project — a Summary // AIPS Memo 87, NRAO. 1994.
32. 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.
33. Schwab F. R. Adaptive calibration of radio interferometer data // 1980 International Optical Computing Conference I / Ed. by W. T. Rhodes. Vol. 231 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 1980. P. 18–25.
34. Cornwell T. J., Wilkinson P. N. A new method for making maps with unstable radio interferometers // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1981. Vol. 196. P. 1067–1086.
35. Högbom J. A. Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 1974. Vol. 15. P. 417.

36. Blandford R. D., Königl A. Relativistic jets as compact radio sources // [Astrophysical Journal](#). 1979. Vol. 232. P. 34–48.
37. 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 // [Astrophysical Journal](#). 1985. Vol. 298. P. 114–127.
38. Sokolov A., Marscher A. P., McHardy I. M. Synchrotron Self-Compton Model for Rapid Nonthermal Flares in Blazars with Frequency-dependent Time Lags // [Astrophysical Journal](#). 2004. Vol. 613. P. 725–746.
39. 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.
40. Marscher A. P. [Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei](#) // Relativistic Jets: The Common Physics of AGN, Microquasars, and Gamma-Ray Bursts / Ed. by P. A. Hughes, J. N. Bregman. Vol. 856 of American Institute of Physics Conference Series. 2006. P. 1–22.
41. Rees M. J. Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources // [Nature](#). 1966. Vol. 211. P. 468–470.
42. Whitney A. R., Shapiro I. I., Rogers A. E. E. et al. Quasars Revisited: Rapid Time Variations Observed Via Very-Long-Baseline Interferometry // [Science](#). 1971. Vol. 173. P. 225–230.
43. Cohen M. H., Cannon W., Purcell G. H. et al. The Small-Scale Structure of Radio Galaxies and Quasi-Stellar Sources at 3.8 Centimeters // [Astrophysical Journal](#). 1971. Vol. 170. P. 207.

44. 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: Superluminal Motion of Gamma-Ray Bright Blazars // [Astrophysical Journal Supplement Series](#). 2001. Vol. 134. P. 181–240.
45. Piner B. G., Mahmud M., Fey A. L., Gospodinova K. Relativistic Jets in the Radio Reference Frame Image Database. I. Apparent Speeds from the First 5 Years of Data // [Astronomical Journal](#). 2007. Vol. 133. P. 2357–2388.
46. Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C. et al. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. III. Kinematics of Parsec-scale Radio Jets // [Astrophysical Journal](#). 2004. Vol. 609. P. 539–563.
47. Vermeulen R. C., Cohen M. H. Superluminal motion statistics and cosmology // [Astrophysical Journal](#). 1994. Vol. 430. P. 467–494.
48. Zensus J. A. Parsec-Scale Jets in Extragalactic Radio Sources // [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#). 1997. Vol. 35. P. 607–636.
49. 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 // [Astronomical Journal](#). 2005. Vol. 130. P. 1418–1465.
50. Agudo I., Gómez J.-L., Martí J.-M. et al. Jet Stability and the Generation of Superluminal and Stationary Components // [Astrophysical Journal Letters](#). 2001. Vol. 549. P. L183–L186. [astro-ph/0101188](#).
51. Lister M. L., Kellermann K. I., Vermeulen R. C. et al. 4C +12.50: A Superluminal Precessing Jet in the Recent Merger System IRAS 13451+1232 // [Astrophysical Journal](#). 2003. Vol. 584. P. 135–146.

52. Cohen A. M., Porcas R. W., Browne I. W. A. et al. Accurate position measurements and optical identifications for radio sources selected at 966 MHz // *Memoirs of the Royal Astronomical Society*. 1977. Vol. 84. P. 1.
53. Walsh D., Beckers J. M., Carswell R. F., Weymann R. J. Spectroscopy of 26 QSO candidates from the Jodrell Bank 966-MHz survey // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1984. Vol. 211. P. 105–109.
54. Lawrence C. R., Pearson T. J., Readhead A. C. S., Unwin S. C. New redshifts of strong radio sources // [Astronomical Journal](#). 1986. Vol. 91. P. 494.
55. Stickel M., Fried J. W., Kuehr H. The complete sample of 1 Jy BL Lac objects. II - Observational data // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1993. Vol. 98. P. 393–442.
56. Cassaro P., Stanghellini C., Bondi M. et al. Extended radio emission in BL Lac objects. I. The images // [Astronomy and Astrophysics Supplement Series](#). 1999. Vol. 139. P. 601–616.
57. Wagner S. J., Witzel A., Krichbaum T. P. et al. Intraday variability in the BL Lac object 0954 + 658 // *Astronomy and Astrophysics*. 1993. Vol. 271. P. 344.
58. Raiteri C. M., Villata M., Tosti G. et al. Optical and radio behaviour of the blazar S4 0954+65 // *Astronomy and Astrophysics*. 1999. Vol. 352. P. 19–31.
59. Gabuzda D. C., Kochenov P. Y., Kollgaard R. I., Cawthorne T. V. VLBI and VLA observations of intraday polarization variability in 0917+624 and 0954+658 // [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#). 2000. Vol. 315. P. 229–240.
60. Wagner S., Sanchez-Pons F., Quirrenbach A., Witzel A. Simultaneous optical

- and radio monitoring of rapid variability in quasars and BL Lac objects // *Astronomy and Astrophysics*. 1990. Vol. 235. P. L1–L4.
61. Mukherjee R., Aller H. D., Aller M. F. et al. EGRET gamma-ray sources: GRO J0744+54 and GRO J0957+65 (= BL Lacertae object 0954+658) // *Astrophysical Journal*. 1995. Vol. 445. P. 189–195.
62. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. Fermi Large Area Telescope First Source Catalog // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2010. Vol. 188. P. 405–436.
63. Nolan P. L., Abdo A. A., Ackermann M. et al. Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2012. Vol. 199. P. 31.
64. 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 // *Astronomical Journal*. 2013. Vol. 146. P. 120.
65. Kudryavtseva N., Gabuzda D., Mahmud M., O’Sullivan S. Polarization structure and variability of the BL Lac object S4 0954+658 // 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the New Generation of Radio Arrays. 2010.
66. Larionov V. M., Morozova D. A., Troitsky I. S. et al. Optical brightening of blazar S4 0954+658 // *The Astronomer’s Telegram*. 2011. Vol. 3220.
67. Morozova D. A., Larionov V. M., Troitsky I. S. et al. The Outburst of the Blazar S40954+658 in 2011 March-April // *Astronomical Journal*. 2014. Vol. 148. P. 42.

68. Hagen-Thorn V. A., Marchenko S. G. Photometry and Polarimetry of Active Galactic Nuclei // *Baltic Astronomy*. 1999. Vol. 8. P. 575–592.
69. Hagen-Thorn V. A., Larionov V. M., Jorstad S. G. et al. The Outburst of the Blazar AO 0235+164 in 2006 December: Shock-in-Jet Interpretation // *Astrophysical Journal*. 2008. Vol. 672. P. 40–47.
70. Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *Astrophysical Journal*. 1989. Vol. 345. P. 245–256.
71. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds // *Astrophysical Journal*. 1998. Vol. 500. P. 525.
72. 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.
73. 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 // *Astrophysical Journal Letters*. 2010. Vol. 710. P. L126–L131.
74. Marscher A. P. Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars // *Astrophysical Journal*. 2014. Vol. 780. P. 87. [1311.7665](#).
75. Jorstad S. G., Marscher A. P., Smith P. S. et al. A Tight Connection between Gamma-Ray Outbursts and Parsec-scale Jet Activity in the Quasar 3C 454.3 // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 773. P. 147.

76. Bychkova V. S., Kardashev N. S., Boldycheva A. V. et al. The unique BL Lac object S5 0716+714 // [Astronomy Reports](#). 2006. Vol. 50. P. 802–808.
77. Nilsson K., Pursimo T., Sillanpää A. et al. Detection of the host galaxy of S5 0716+714 // [Astronomy and Astrophysics](#). 2008. Vol. 487. P. L29–L32.
78. Danforth C. W., Nalewajko K., France K., Keeney B. A. A Fast Flare and Direct Redshift Constraint in Far-ultraviolet Spectra of the Blazar S50716+714 // [Astrophysical Journal](#). 2013. Vol. 764. P. 57.
79. Antonucci R. R. J., Hickson P., Olszewski E. W., Miller J. S. Deep radio maps of high-frequency selected BL Lac objects // [Astronomical Journal](#). 1986. Vol. 92. P. 1–5.
80. Wagner S. J., Witzel A., Heidt J. et al. Rapid Variability in S5 0716+714 Across the Electromagnetic Spectrum // [Astronomical Journal](#). 1996. Vol. 111. P. 2187.
81. Hagen-Thorn V. A., Larionov V. M., Efimova N. V. et al. Optical and IR monitoring of the BL Lac object S5 0716+714 from 2001 2004 // [Astronomy Reports](#). 2006. Vol. 50. P. 458–467.
82. Gupta A. C., Krichbaum T. P., Wiita P. J. et al. Multiwavelength intraday variability of the BL Lacertae S5 0716+714 // [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#). 2012. Vol. 425. P. 1357–1370.
83. Gupta A. C., Srivastava A. K., Wiita P. J. Periodic Oscillations in the Intra-Day Optical Light Curves of the Blazar S5 0716+714 // [Astrophysical Journal](#). 2009. Vol. 690. P. 216–223.
84. Larionov V., Konstantinova T., Kopatskaya E. et al. S5 0716+71: polarimetric activity during outburst // [The Astronomer's Telegram](#). 2008. Vol. 1502. P. 1.

85. Blinov D., Morozova D., Larionov V. Blazar S5 0716+714 is in a flaring state in optical and gamma // *The Astronomer's Telegram*. 2011. Vol. 3700. P. 1.
86. Larionov V. M., Jorstad S. G., Marscher A. P. et al. The Outburst of the Blazar S5 0716+71 in 2011 October: Shock in a Helical Jet // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 768. P. 40.
87. Rani B., Krichbaum T. P., Fuhrmann L. et al. Radio to gamma-ray variability study of blazar S5 0716+714 // *Astronomy and Astrophysics*. 2013. Vol. 552. P. A11.
88. Hartman R. C., Bertsch D. L., Bloom S. D. et al. The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 1999. Vol. 123. P. 79–202.
89. Lin Y. C., Bertsch D. L., Dingus B. L. et al. EGRET observations of the BL Lacertae objects 0716+714 and 0521-365 // *Astrophysical Journal*. 1995. Vol. 442. P. 96–104.
90. Chen A. W., D'Ammando F., Villata M. et al. AGILE detection of variable γ -ray activity from the blazar S5 0716+714 in September-October 2007 // *Astronomy and Astrophysics*. 2008. Vol. 489. P. L37–L40.
91. Rani B., Krichbaum T. P., Lott B. et al. S5 0716+714: GeV variability study // *Advances in Space Research*. 2013. Vol. 51. P. 2358–2367.
92. Lister M. L., Cohen M. H., Homan D. C. et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets // *Astronomical Journal*. 2009. Vol. 138. P. 1874–1892.

93. Anderhub H., Antonelli L. A., Antoranz P. et al. Discovery of very High Energy γ -Rays from the Blazar S5 0716+714 // [Astrophysical Journal Letters](#). 2009. Vol. 704. P. L129–L133.
94. Rastorgueva E. A., Wiik K. J., Bajkova A. T. et al. Multi-frequency VLBA study of the blazar S5 0716+714 during the active state in 2004. II. Large-scale jet kinematics and the comparison of the different methods of VLBI data imaging as applied to kinematic studies of AGN // [Astronomy and Astrophysics](#). 2011. Vol. 529. P. A2.
95. Bolton J. G., Ekers J. Identification of strong extragalactic radio sources in the declination zone 0° to -20° // [Australian Journal of Physics](#). 1966. Vol. 19. P.559.
96. Burbidge E. M., Kinman T. D. Redshifts of Fourteen Quasi-Stellar Radio Sources // [Astrophysical Journal](#). 1966. Vol. 145. P. 654.
97. Thompson D. J., Djorgovski S., de Carvalho R. Spectroscopy of radio sources from the Parkes 2700 MHz survey // [Publications of Astronomical Society of the Pacific](#).. 1990. Vol. 102. P. 1235–1240.
98. Wardle J. F. C., Homan D. C., Cheung C. C., Roberts D. H. The Ultra-Fast Quasar PKS 1510-089: Direct Evidence for a Changing Orientation of the Central Engine // [Future Directions in High Resolution Astronomy](#) / Ed. by J. Romney, M. Reid. Vol. 340 of [Astronomical Society of the Pacific Conference Series](#). 2005. P. 67.
99. Malkan M. A., Moore R. L. The ultraviolet excess of quasars. III - The highly polarized quasars PKS 0736 + 017 and PKS 1510 - 089 // [Astrophysical Journal](#). 1986. Vol. 300. P. 216–223.

100. Pian E., Treves A. The Ultraviolet Continua of Blazars: A Reconsideration of IUE Archives // [Astrophysical Journal](#). 1993. Vol. 416. P. 130.
101. Aller M. F., Aller H. D., Hughes P. A. Centimeter-wavelength Flux and Polarization Variability as a Probe of the Physical Conditions in AGN (I) // *Blazar Continuum Variability* / Ed. by H. R. Miller, J. R. Webb, J. C. Noble. Vol. 110 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 1996. P. 193.
102. Singh K. P., Rao A. R., Vahia M. N. EXOSAT observations of the blazar PKS 1510 - 089 // [Astrophysical Journal](#). 1990. Vol. 365. P. 455–459.
103. Sambruna R. M., Barr P., Giommi P. et al. The X-ray spectra of blazars: Analysis of the complete EXOSAT archive // [Astrophysical Journal Supplement Series](#). 1994. Vol. 95. P. 371–385.
104. Lawson A. J., Turner M. J. L. GINGA observations of the X-ray spectra of quasars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1997. Vol. 288. P. 920–944.
105. Siebert J., Brinkmann W., Drinkwater M. J. et al. X-ray properties of the Parkes sample of flat-spectrum radio sources: dust in radio-loud quasars? // [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#). 1998. Vol. 301. P. 261–279.
106. Singh K. P., Shrader C. R., George I. M. X-Ray Spectrum of the High-Polarization Quasar PKS 1510-089 // [Astrophysical Journal](#). 1997. Vol. 491. P. 515.
107. Gambill J. K., Sambruna R. M., Chartas G. et al. Chandra observations of nuclear X-ray emission from a sample of radio sources // [Astronomy and Astrophysics](#). 2003. Vol. 401. P. 505–517.

108. Homan D. C., Wardle J. F. C., Cheung C. C. et al. PKS 1510-089: A Head-on View of a Relativistic Jet // [Astrophysical Journal](#). 2002. Vol. 580. P. 742–748.
109. Larionov V. M., Konstantinova T. S., Blinov D. A. Optical unprecedented high brightness level of blazar PKS 1510-08 // [The Astronomer's Telegram](#). 2009. Vol. 2045. P. 1.
110. Morozova D. A., Larionov V. M., Jorstad S. G. Renewed activity of PKS 1510-089 // [The Astronomer's Telegram](#). 2011. Vol. 3194. P. 1.
111. Larionov V. M., Villata M., Raiteri C. M. et al. Optical historical maximum of the blazar PKS 1510-08 observed by the GASP // [The Astronomer's Telegram](#). 2009. Vol. 1990. P. 1.
112. H.E.S.S. Collaboration, Abramowski A., Acero F. et al. H.E.S.S. discovery of VHE γ -rays from the quasar PKS 1510-089 // [Astronomy and Astrophysics](#). 2013. Vol. 554. P. A107.
113. MAGIC Collaboration, Aleksić J., Ansoldi S. et al. MAGIC gamma-ray and multifrequency observations of flat spectrum radio quasar PKS 1510-089 in early 2012 // [ArXiv e-prints](#). 2014. [1401.5646](#).
114. Liller M. H., Liller W. Photometric histories of QSOs - Two QSOs with large light amplitude // [Astrophysical Journal Letters](#). 1975. Vol. 199. P. L133–L135.
115. Osterbrock D. E., Pogge R. W. Optical spectra of narrow emission line Palomar-Green galaxies // [Astrophysical Journal](#). 1987. Vol. 323. P. 108–117.
116. Tavecchio F., Becerra-Gonzalez J., Ghisellini G. et al. On the origin of the γ -ray emission from the flaring blazar PKS 1222+216 // [Astronomy and Astrophysics](#). 2011. Vol. 534. P. A86.

117. Cooper N. J., Lister M. L., Kochanzyk M. D. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. III. Deep VLA Images at 1.4 GHz // [Astrophysical Journal Supplement Series](#). 2007. Vol. 171. P. 376–388.
118. Saikia D. J., Wiita P. J., Muxlow T. W. B. 1222+216 - A wide-angle-tailed quasar? // [Astronomical Journal](#). 1993. Vol. 105. P. 1658–1665.
119. Kovalev Y. Y., Kellermann K. I., Lister M. L. et al. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure // [Astronomical Journal](#). 2005. Vol. 130. P. 2473–2505.
120. Verrecchia F., Striani E., Tavani M. et al. AGILE detection of a gamma-ray flare from the blazar PKS 1222+216 // [The Astronomer's Telegram](#). 2009. Vol. 2348. P. 1.
121. Ciprini S. Fermi LAT confirmation of a strong GeV flare from 4C 21.35 (PKS 1222+21) // [The Astronomer's Telegram](#). 2009. P. 1.
122. Donato D. Fermi LAT observed another strong GeV flare from 4C 21.35 (PKS 1222+21) // [The Astronomer's Telegram](#). 2010. Vol. 2584. P. 1.
123. Neronov A., Semikoz D., Vovk I. High Galactic latitude Fermi sources of γ -rays with energies above 100 GeV // [Astronomy and Astrophysics](#). 2011. Vol. 529. P. A59.
124. Carrasco L., Carramiñana A., Recillas E. et al. NIR Flaring of PKS1222+216 // [The Astronomer's Telegram](#). 2010. Vol. 2626. P. 1.
125. Iafrate G., Longo F., D'Ammando F. Fermi LAT detection of a very intense GeV flare from 4C +21.35 (PKS 1222+21) // [The Astronomer's Telegram](#). 2010. Vol. 2687. P. 1.

126. Striani E., Verrecchia F., Donnarumma I. et al. AGILE detection of a gamma-ray flare from the blazar 4C+21.35 (PKS 1222+21) // The Astronomer's Telegram. 2010. Vol. 2686. P. 1.
127. Aleksić J., Antonelli L. A., Antoranz P. et al. MAGIC Discovery of Very High Energy Emission from the FSRQ PKS 1222+21 // [Astrophysical Journal Letters](#). 2011. Vol. 730. P. L8.
128. Ackermann M., Ajello M., Allafort A. et al. Multifrequency Studies of the Peculiar Quasar 4C +21.35 during the 2010 Flaring Activity // [Astrophysical Journal](#). 2014. Vol. 786. P. 157. [1403.7534](#).

Приложение А

S4 0954+658

Таблица А.1. Поляризационные свойства компонент источника S4 0954+658 на VLBA изображениях

MJD	Узел	Поток (Ян)	ρ %	χ °	Дата
54855.5	CORE	0.20	7.7	124.6	24 JAN 2009
54884.5	...	0.54	4.1	256.2	22 FEB 2009
54922.5	...	0.32	5.7	185.6	01 APR 2009
54981.5	...	0.64	8.4	168.6	30 MAY 2009
55003.5	...	0.42	9.8	191.9	21 JUN 2009
55039.5	...	0.43	2.0	180.0	27 JUL 2009
55059.5	...	0.55	2.1	180.0	16 AUG 2009
55090.5	...	0.32	10.8	164.4	16 SEP 2009
55120.5	...	0.40	15.4	174.9	16 OCT 2009
55206.5	...	0.60	9.8	163.4	10 JAN 2010
55238.5	...	0.39	11.5	158.0	11 FEB 2010
55261.5	...	0.50	9.4	163.5	06 MAR 2010
55335.5	...	0.56	6.6	157.2	19 MAY 2010
55361.5	...	0.40	6.7	159.6	14 JUN 2010
55409.5	...	0.54	5.1	160.4	01 AUG 2010
55429.5	...	0.52	8.3	152.5	21 AUG 2010
55457.5	...	0.48	4.9	151.9	18 SEP 2010
55493.5	...	0.29	0.0	-	24 OCT 2010
55534.5	...	0.16	0.0	-	04 DEC 2010
55563.5	...	0.50	0.0	-	02 JAN 2011
55596.5	...	0.41	14.9	146.2	04 FEB 2011
55621.5	...	0.33	13.0	154.2	01 MAR 2011
55672.5	...	1.13	12.3	368.9	21 APR 2011
55703.5	...	0.95	12.0	206.0	22 MAY 2011

Продолжение таб.А.1

MJD	Узел	Поток (Ян)	p %	χ°	Дата
55724.5	...	0.73	15.5	192.6	12 JUN 2011
55763.5	...	0.39	2.4	135.0	21 JUL 2011
55796.5	...	1.03	1.5	135.0	23 AUG 2011
55820.5	...	0.44	9.1	161.5	16 SEP 2011
55850.5	...	0.63	6.0	161.3	16 OCT 2011
55897.5	...	0.61	7.2	176.1	02 DEC 2011
54981.5	K2	0.37	2.6	225.0	30 MAY 2009
55003.5	...	0.22	2.0	135.0	21 JUN 2009
55039.5	...	0.28	6.3	112.6	27 JUL 2009
55059.5	...	0.45	4.1	248.9	16 AUG 2009
55090.5	...	0.28	11.5	238.4	16 SEP 2009
55120.5	...	0.32	11.4	260.1	16 OCT 2009
55206.5	...	0.10	16.0	241.1	10 JAN 2010
55238.5	...	0.06	10.5	225.0	11 FEB 2010
55261.5	...	0.09	14.0	270.0	06 MAR 2010
55335.5	...	0.04	18.3	257.0	19 MAY 2010
55361.5	...	0.09	8.1	270.0	14 JUN 2010
55409.5	...	0.10	9.4	259.1	01 AUG 2010
55429.5	...	0.07	8.5	225.0	21 AUG 2010
55457.5	...	0.15	1.8	270.0	18 SEP 2010
55493.5	...	0.02	0.0	-	24 OCT 2010
55534.5	...	0.02	0.0	-	04 DEC 2010
55563.5	...	0.02	0.0	-	02 JAN 2011
55090.5	K3	0.49	0.0	-	16 SEP 2009
55120.5	...	0.32	0.0	-	16 OCT 2009
55206.5	...	0.34	11.2	185.9	10 JAN 2010
55238.5	...	0.19	12.3	144.0	11 FEB 2010
55261.5	...	0.19	12.5	164.5	06 MAR 2010
55335.5	...	0.28	18.1	167.6	19 MAY 2010
55361.5	...	0.21	18.9	164.3	14 JUN 2010

Продолжение таб.А.1

MJD	Узел	Поток (Ян)	ρ %	χ °	Дата
55409.5	...	0.15	16.1	161.1	01 AUG 2010
55429.5	...	0.14	14.3	158.0	21 AUG 2010
55457.5	...	0.19	19.2	167.5	18 SEP 2010
55493.5	...	0.17	12.5	167.2	24 OCT 2010
55534.5	...	0.13	13.4	176.2	04 DEC 2010
55563.5	...	0.09	15.7	180.0	02 JAN 2011
55596.5	...	0.06	19.6	180.0	04 FEB 2011
55621.5	...	0.14	14.0	163.0	01 MAR 2011
55672.5	...	0.15	9.4	180.0	21 APR 2011
55703.5	...	0.13	8.1	180.0	22 MAY 2011
55724.5	...	0.10	14.3	180.0	12 JUN 2011
55763.5	...	0.11	14.1	159.6	21 JUL 2011
55796.5	...	0.09	11.8	143.3	23 AUG 2011
55820.5	...	0.09	12.7	156.6	16 SEP 2011
55850.5	...	0.09	12.5	135.0	16 OCT 2011
55261.5	K4	0.17	18.9	180.0	06 MAR 2010
55335.5	...	0.16	12.2	177.9	19 MAY 2010
55361.5	...	0.08	11.0	180.0	14 JUN 2010
55409.5	...	0.07	13.8	180.0	01 AUG 2010
55429.5	...	0.07	13.3	149.3	21 AUG 2010
55457.5	K5	0.11	9.3	180.0	18 SEP 2010
55493.5	...	0.07	21.0	188.9	24 OCT 2010
55534.5	...	0.06	14.3	180.0	04 DEC 2010
55563.5	...	0.04	0.0	-	02 JAN 2011
55596.5	...	0.05	0.0	-	04 FEB 2011
55724.5	K8	0.10	27.4	146.2	12 JUN 2011
55763.5	...	0.12	19.0	135.0	21 JUL 2011
55796.5	...	0.15	18.7	116.8	23 AUG 2011
55820.5	...	0.08	23.2	117.3	16 SEP 2011
55850.5	...	0.08	23.8	122.6	16 OCT 2011

Продолжение таб.А.1

MJD	Узел	Поток (Ян)	ρ %	χ °	Дата
55897.5	...	0.11	15.4	144.8	02 DEC 2011
55763.5	K9	0.26	12.0	180.0	21 JUL 2011
55796.5	...	0.23	7.7	163.3	23 AUG 2011
55820.5	...	0.09	11.3	167.3	16 SEP 2011
55850.5	...	0.05	18.6	190.0	16 OCT 2011

Таблица А.2. Модели структуры джета объекта S4 0954+658.

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2008.62	54693.00	0.334	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2008.62	54693.00	1.629	-0.043	0.075	0.086	-29.902	0.077
2008.62	54693.00	0.149	-0.087	0.349	0.359	-14.031	0.109
2008.62	54693.00	0.018	-0.424	0.604	0.738	-35.049	0.221
2008.69	54719.00	0.495	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049
2008.69	54719.00	0.690	-0.096	0.119	0.153	-38.963	0.078
2008.69	54719.00	0.093	-0.084	0.338	0.348	-13.903	0.227
2008.87	54786.00	0.199	0.000	0.000	0.000	0.000	0.044
2008.87	54786.00	0.271	-0.015	0.046	0.048	-17.714	0.000
2008.87	54786.00	0.159	-0.045	0.132	0.140	-18.949	0.063
2008.87	54786.00	0.058	-0.254	0.416	0.488	-31.406	0.198
2008.87	54786.00	0.083	-0.090	0.257	0.273	-19.277	0.000
2008.87	54786.00	0.255	-0.134	0.322	0.348	-22.583	0.126
2008.87	54786.00	0.007	-0.534	0.858	1.011	-31.881	0.183
2008.97	54821.00	0.343	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045
2008.97	54821.00	0.092	-0.055	0.149	0.159	-20.411	0.013
2008.97	54821.00	0.175	-0.140	0.356	0.383	-21.437	0.191
2009.06	54855.00	0.195	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
2009.06	54855.00	0.190	-0.036	0.062	0.072	-29.989	0.046
2009.06	54855.00	0.042	-0.098	0.223	0.244	-23.777	0.000
2009.06	54855.00	0.112	-0.162	0.402	0.433	-21.929	0.153

Продолжение таб.А.2

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2009.06	54855.00	0.041	-0.331	0.525	0.621	-32.247	0.256
2009.15	54885.00	0.541	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
2009.15	54885.00	0.133	-0.188	0.441	0.479	-23.053	0.182
2009.15	54885.00	0.079	-0.076	0.109	0.133	-35.109	0.057
2009.25	54922.00	0.322	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2009.25	54922.00	0.591	-0.040	0.054	0.068	-36.595	0.019
2009.25	54922.00	0.052	-0.312	0.593	0.670	-27.786	0.221
2009.25	54922.00	0.083	-0.106	0.177	0.207	-30.865	0.081
2009.25	54922.00	0.044	-0.195	0.465	0.504	-22.689	0.103
2009.41	54981.00	0.636	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2009.41	54981.00	0.373	-0.058	0.043	0.072	-53.441	0.053
2009.41	54981.00	0.033	-0.281	0.546	0.614	-27.206	0.210
2009.41	54981.00	0.125	-0.110	0.146	0.183	-36.839	0.106
2009.47	55003.00	0.423	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043
2009.47	55003.00	0.219	-0.092	0.086	0.127	-46.924	0.068
2009.47	55003.00	0.022	-0.332	0.515	0.612	-32.786	0.184
2009.56	55038.00	0.426	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063
2009.56	55038.00	0.280	-0.130	0.075	0.150	-59.797	0.110
2009.56	55038.00	0.021	-0.106	0.281	0.301	-20.684	0.000
2009.56	55038.00	0.018	-0.320	0.578	0.660	-28.954	0.386
2009.62	55059.00	0.552	0.000	0.000	0.000	0.000	0.094
2009.62	55059.00	0.449	-0.136	0.071	0.153	-62.260	0.193
2009.71	55090.00	0.321	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
2009.71	55090.00	0.488	-0.016	0.082	0.083	-11.219	0.037
2009.71	55090.00	0.283	-0.173	0.123	0.212	-54.706	0.079
2009.71	55090.00	0.053	-0.135	0.318	0.345	-22.949	0.127
2009.71	55090.00	0.003	-0.521	0.739	0.905	-35.193	0.000
2009.79	55120.00	0.405	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047
2009.79	55120.00	0.316	-0.005	0.093	0.093	-2.783	0.049
2009.79	55120.00	0.318	-0.177	0.125	0.217	-54.750	0.098

Продолжение таб.А.2

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2009.79	55120.00	0.062	-0.149	0.343	0.374	-23.529	0.148
2009.79	55120.00	0.004	-0.597	0.690	0.912	-40.881	0.000
2009.79	55120.00	0.002	-0.828	0.597	1.021	-54.173	0.000
2010.02	55206.00	0.602	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026
2010.02	55206.00	0.337	-0.045	0.230	0.234	-11.110	0.049
2010.02	55206.00	0.102	-0.239	0.205	0.315	-49.352	0.135
2010.02	55206.00	0.026	-0.315	0.467	0.563	-33.997	0.212
2010.02	55206.00	0.004	-0.722	1.005	1.237	-35.701	0.000
2010.02	55206.00	0.003	-1.094	1.254	1.664	-41.119	0.310
2010.11	55238.00	0.389	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
2010.11	55238.00	0.185	-0.064	0.253	0.261	-14.132	0.053
2010.11	55238.00	0.063	-0.258	0.240	0.352	-47.058	0.206
2010.11	55238.00	0.008	-0.364	0.557	0.665	-33.193	0.021
2010.11	55238.00	0.003	-0.513	-0.041	0.514	-94.588	0.000
2010.18	55261.00	0.497	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052
2010.18	55261.00	0.169	-0.047	0.201	0.206	-13.070	0.069
2010.18	55261.00	0.089	-0.253	0.226	0.339	-48.240	0.172
2010.18	55261.00	0.191	-0.089	0.334	0.345	-14.942	0.061
2010.18	55261.00	0.013	-0.351	0.483	0.597	-36.019	0.000
2010.18	55261.00	0.018	-0.272	0.627	0.683	-23.434	0.304
2010.26	55293.00	0.432	0.000	0.000	0.000	0.000	0.093
2010.26	55293.00	0.013	-0.843	0.882	1.220	-43.695	0.040
2010.26	55293.00	0.499	-0.087	0.286	0.299	-16.874	0.132
2010.26	55293.00	0.246	-0.194	0.477	0.515	-22.156	0.282
2010.26	55293.00	0.031	-0.413	0.074	0.420	-79.823	0.036
2010.38	55335.00	0.559	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032
2010.38	55335.00	0.164	-0.055	0.239	0.246	-13.019	0.060
2010.38	55335.00	0.284	-0.128	0.422	0.441	-16.906	0.089
2010.38	55335.00	0.043	-0.336	0.293	0.446	-48.939	0.120
2010.38	55335.00	0.043	-0.317	0.519	0.608	-31.414	0.140

Продолжение таб.А.2

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2010.38	55335.00	0.031	-0.164	0.540	0.564	-16.916	0.000
2010.45	55361.00	0.405	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014
2010.45	55361.00	0.076	-0.073	0.307	0.316	-13.373	0.024
2010.45	55361.00	0.085	-0.328	0.434	0.544	-37.104	0.230
2010.45	55361.00	0.209	-0.148	0.466	0.489	-17.574	0.092
2010.45	55361.00	0.005	-0.040	0.161	0.166	-13.974	0.000
2010.45	55361.00	0.004	-0.234	0.632	0.674	-20.308	0.000
2010.58	55409.00	0.539	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2010.58	55409.00	0.066	-0.102	0.415	0.428	-13.835	0.071
2010.58	55409.00	0.152	-0.184	0.519	0.551	-19.498	0.105
2010.58	55409.00	0.105	-0.360	0.491	0.609	-36.258	0.240
2010.58	55409.00	0.010	-0.357	0.248	0.434	-55.199	0.000
2010.58	55409.00	0.035	-0.065	0.188	0.199	-19.126	0.146
2010.64	55429.00	0.516	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
2010.64	55429.00	0.140	-0.209	0.541	0.580	-21.112	0.139
2010.64	55429.00	0.068	-0.117	0.432	0.448	-15.096	0.094
2010.64	55429.00	0.070	-0.384	0.457	0.597	-40.034	0.220
2010.64	55429.00	0.033	-0.029	0.181	0.183	-9.129	0.128
2010.64	55429.00	0.036	-0.620	0.863	1.062	-35.689	0.599
2010.71	55457.00	0.484	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059
2010.71	55457.00	0.193	-0.157	0.502	0.526	-17.318	0.123
2010.71	55457.00	0.115	-0.051	0.228	0.234	-12.559	0.125
2010.71	55457.00	0.152	-0.342	0.543	0.641	-32.187	0.273
2010.71	55457.00	0.090	-0.808	1.109	1.372	-36.059	0.788
2010.81	55493.00	0.294	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.81	55493.00	0.068	-0.098	0.325	0.340	-16.791	0.079
2010.81	55493.00	0.459	-0.031	0.048	0.057	-32.934	0.036
2010.81	55493.00	0.166	-0.204	0.561	0.597	-20.024	0.141
2010.81	55493.00	0.023	-0.407	0.380	0.557	-46.961	0.163
2010.81	55493.00	0.050	-0.479	0.644	0.803	-36.643	0.362

Продолжение таб.А.2

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2010.92	55534.00	0.159	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.92	55534.00	0.642	-0.020	0.073	0.075	-15.330	0.031
2010.92	55534.00	0.059	-0.103	0.328	0.344	-17.505	0.121
2010.92	55534.00	0.127	-0.208	0.597	0.633	-19.232	0.206
2010.92	55534.00	0.043	-0.502	0.874	1.008	-29.896	0.461
2010.92	55534.00	0.022	-0.491	0.434	0.655	-48.508	0.147
2011.00	55563.00	0.497	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
2011.00	55563.00	0.243	-0.020	0.065	0.068	-16.960	0.022
2011.00	55563.00	0.085	-0.219	0.597	0.636	-20.175	0.173
2011.00	55563.00	0.040	-0.121	0.391	0.409	-17.182	0.102
2011.00	55563.00	0.016	-0.511	0.365	0.628	-54.458	0.173
2011.00	55563.00	0.023	-0.534	0.679	0.864	-38.187	0.301
2011.10	55597.00	0.407	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021
2011.10	55597.00	0.090	-0.094	0.253	0.270	-20.266	0.062
2011.10	55597.00	0.178	-0.027	0.077	0.081	-19.239	0.033
2011.10	55597.00	0.054	-0.175	0.493	0.523	-19.565	0.146
2011.10	55597.00	0.009	-0.755	0.551	0.934	-53.886	0.116
2011.10	55597.00	0.006	-0.556	0.356	0.661	-57.368	0.000
2011.10	55597.00	0.060	-0.267	0.659	0.711	-22.085	0.229
2011.16	55621.00	0.329	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023
2011.16	55621.00	0.129	-0.111	0.283	0.304	-21.341	0.048
2011.16	55621.00	0.303	-0.026	0.056	0.062	-25.008	0.007
2011.16	55621.00	0.137	-0.257	0.573	0.628	-24.181	0.196
2011.30	55672.00	1.132	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
2011.30	55672.00	0.530	-0.007	0.058	0.059	-6.850	0.034
2011.30	55672.00	0.073	-0.121	0.240	0.268	-26.796	0.076
2011.30	55672.00	0.086	-0.155	0.354	0.387	-23.627	0.087
2011.30	55672.00	0.151	-0.302	0.615	0.685	-26.189	0.247
2011.39	55703.00	0.952	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
2011.39	55703.00	0.371	-0.002	0.073	0.073	-1.213	0.032

Продолжение таб.А.2

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.39	55703.00	0.125	-0.146	0.292	0.326	-26.656	0.084
2011.39	55703.00	0.129	-0.283	0.592	0.656	-25.591	0.295
2011.44	55724.00	0.734	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
2011.44	55724.00	0.099	-0.096	0.223	0.243	-23.300	0.052
2011.44	55724.00	0.095	-0.282	0.591	0.655	-25.482	0.300
2011.44	55724.00	0.215	-0.013	0.078	0.079	-9.665	0.036
2011.44	55724.00	0.060	-0.186	0.348	0.395	-28.157	0.063
2011.55	55763.00	0.391	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
2011.55	55763.00	0.123	-0.087	0.282	0.295	-17.160	0.042
2011.55	55763.00	0.108	-0.289	0.573	0.642	-26.746	0.341
2011.55	55763.00	0.255	-0.003	0.163	0.164	-1.080	0.042
2011.55	55763.00	0.065	-0.174	0.359	0.399	-25.827	0.000
2011.64	55796.00	1.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038
2011.64	55796.00	0.231	-0.032	0.240	0.242	-7.512	0.099
2011.64	55796.00	0.152	-0.156	0.388	0.418	-21.888	0.144
2011.64	55796.00	0.090	-0.322	0.620	0.698	-27.433	0.308
2011.71	55820.00	0.441	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017
2011.71	55820.00	0.393	-0.002	0.070	0.071	-1.842	0.024
2011.71	55820.00	0.086	-0.048	0.299	0.303	-9.117	0.071
2011.71	55820.00	0.081	-0.161	0.440	0.469	-20.143	0.130
2011.71	55820.00	0.092	-0.317	0.597	0.676	-27.947	0.269
2011.79	55850.00	0.631	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
2011.79	55850.00	0.046	-0.080	0.304	0.314	-14.738	0.048
2011.79	55850.00	0.371	-0.019	0.077	0.079	-13.997	0.049
2011.79	55850.00	0.090	-0.371	0.641	0.741	-30.058	0.295
2011.79	55850.00	0.084	-0.207	0.502	0.543	-22.345	0.156
2011.92	55897.00	0.612	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.92	55897.00	0.112	-0.022	0.106	0.109	-11.857	0.062
2011.92	55897.00	0.109	-0.319	0.594	0.674	-28.243	0.268
2011.92	55897.00	0.061	-0.106	0.241	0.263	-23.775	0.096

Продолжение таб.А.2

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2012.07	55953.00	0.963	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040
2012.07	55953.00	0.104	-0.413	0.637	0.759	-32.977	0.470
2012.07	55953.00	0.067	-0.055	0.242	0.248	-12.816	0.114
2012.07	55953.00	0.038	-0.162	0.392	0.424	-22.518	0.060
2012.17	55991.00	0.329	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
2012.17	55991.00	0.386	-0.013	0.085	0.085	-8.448	0.021
2012.17	55991.00	0.064	-0.078	0.291	0.302	-15.034	0.116
2012.17	55991.00	0.057	-0.199	0.522	0.559	-20.868	0.182
2012.17	55991.00	0.052	-0.505	0.662	0.832	-37.340	0.355
2012.25	56019.00	0.317	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2012.25	56019.00	0.385	-0.019	0.059	0.062	-18.147	0.019
2012.25	56019.00	0.062	-0.075	0.275	0.285	-15.343	0.066
2012.25	56019.00	0.041	-0.137	0.404	0.427	-18.719	0.081
2012.25	56019.00	0.084	-0.337	0.601	0.689	-29.247	0.255

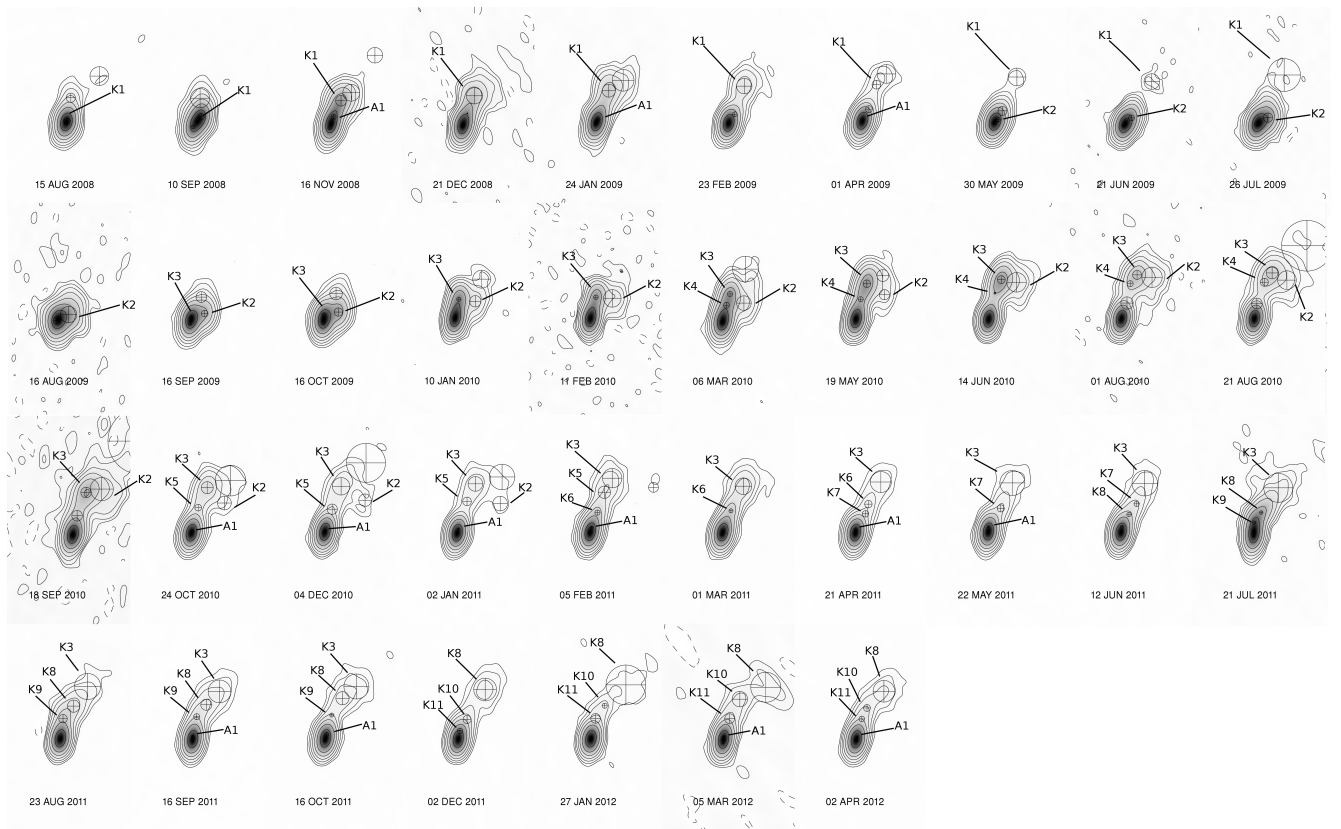


Рис. А.1. Изображения в полном потоке с наложенным движением компонент для всех эпох. Контуры соответствуют 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 % от пиковой интенсивности, главный лепесток диаграммы направленности $0.24 \times 0.15, -10^\circ$.

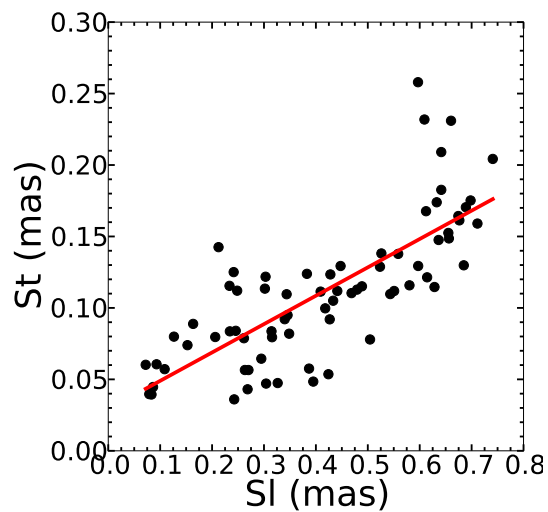


Рис. А.2. Соотношение между видимым размером s_t джета и видимым расстоянием по долготе s_l компонент для объекта S4 0954+658

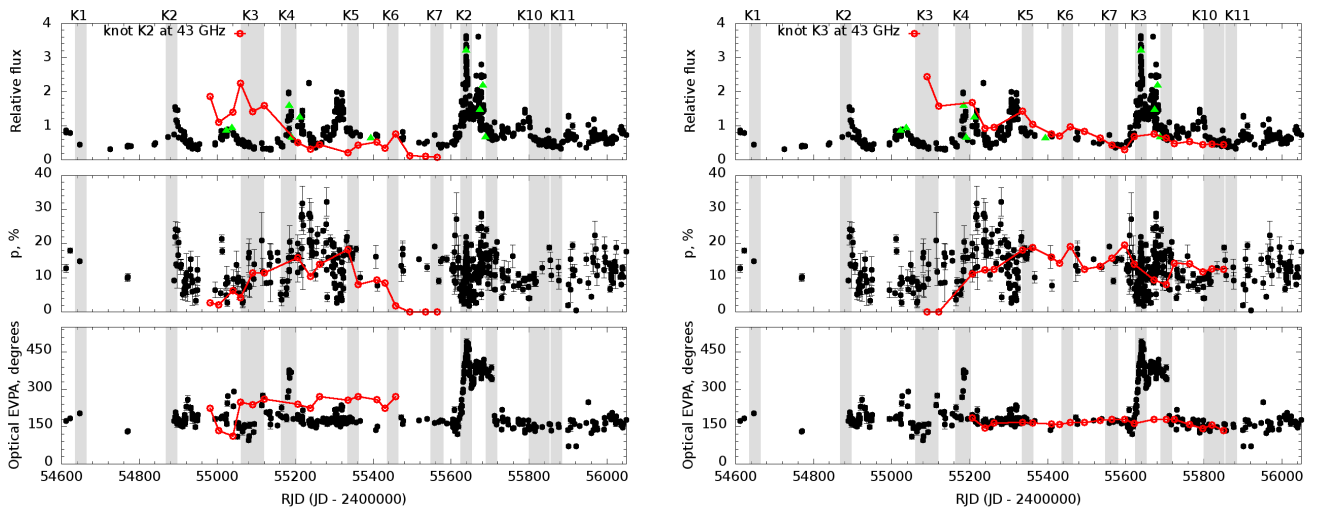


Рис. А.3. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации с наложенной кривой уровня поляризации на частоте 43 ГГц; позиционный угол оптической поляризации с наложенным позиционным углом оптической поляризации радиоядра на частоте 43 ГГц

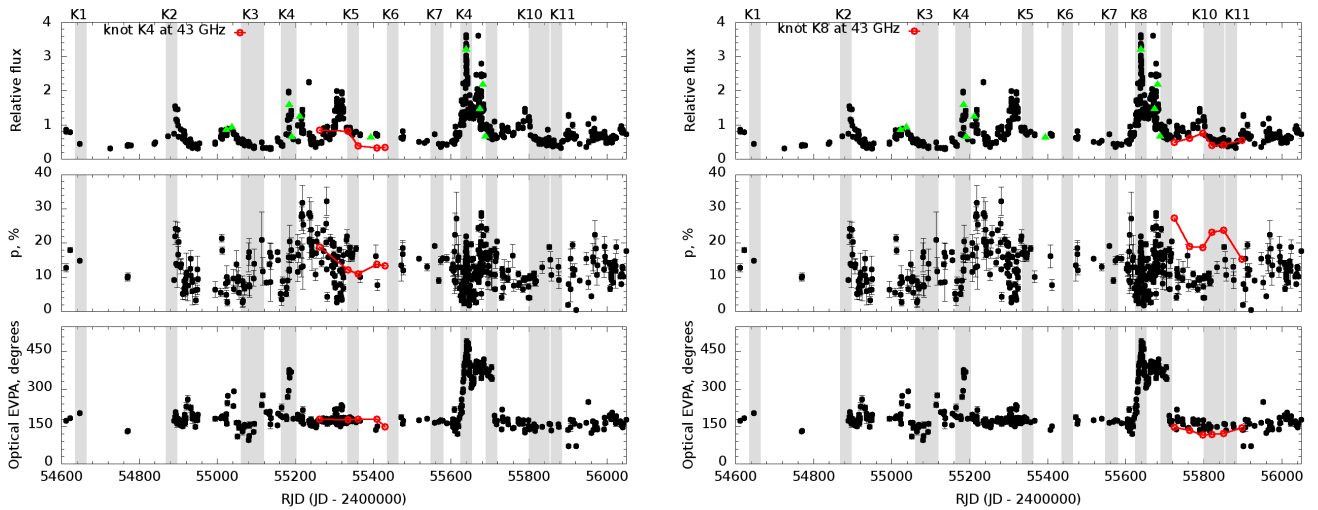


Рис. А.4. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации с наложенной кривой уровня поляризации на частоте 43 ГГц; позиционный угол оптической поляризации с наложенным позиционным углом оптической поляризации радиоядра на частоте 43 ГГц

Приложение Б

S5 0716+71

Таблица Б.1. Модели структуры джета объекта S5 0716+71.

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2007.45	54264.00	1.458	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014
2007.45	54264.00	0.129	0.031	0.135	0.139	12.969	0.079
2007.45	54264.00	0.021	0.350	1.164	1.215	16.724	0.196
2007.53	54293.00	1.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039
2007.53	54293.00	0.047	0.033	0.141	0.144	13.013	0.000
2007.59	54318.00	0.987	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024
2007.59	54318.00	0.103	0.047	0.106	0.116	23.699	0.081
2007.59	54318.00	0.016	0.110	0.564	0.575	11.015	0.130
2007.66	54342.00	1.258	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
2007.66	54342.00	0.083	0.014	0.138	0.138	5.651	0.061
2007.66	54342.00	0.015	0.091	0.520	0.528	9.903	0.000
2007.74	54372.00	1.782	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028
2007.74	54372.00	0.105	0.024	0.111	0.114	11.998	0.074
2007.74	54372.00	0.016	0.114	0.550	0.562	11.677	0.152
2007.83	54405.00	2.690	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040
2007.83	54405.00	0.029	0.092	0.096	0.133	43.715	0.000
2007.83	54405.00	0.010	0.010	0.395	0.395	1.408	0.083
2007.83	54405.00	0.008	0.275	0.992	1.030	15.496	0.070
2008.04	54482.00	0.331	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046
2008.04	54482.00	0.430	0.008	0.065	0.066	7.070	0.000
2008.04	54482.00	0.070	0.003	0.159	0.159	1.065	0.178
2008.04	54482.00	0.011	0.389	0.882	0.964	23.810	0.139
2008.16	54524.00	0.476	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021
2008.16	54524.00	0.099	0.053	0.137	0.147	21.127	0.082
2008.16	54524.00	0.011	0.121	0.627	0.639	10.902	0.141

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2008.45	54629.00	1.228	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039
2008.45	54629.00	0.055	0.076	0.097	0.123	38.070	0.000
2008.45	54629.00	0.051	0.115	0.562	0.573	11.539	0.181
2008.51	54653.00	2.327	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011
2008.51	54653.00	0.543	0.042	0.039	0.058	47.004	0.055
2008.51	54653.00	0.069	0.150	0.486	0.508	17.126	0.249
2008.51	54653.00	0.038	0.317	0.784	0.846	21.984	0.000
2008.62	54693.00	3.846	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047
2008.62	54693.00	0.122	0.077	0.101	0.127	37.393	0.000
2008.69	54719.00	1.770	0.000	0.000	0.000	0.000	0.054
2008.69	54719.00	0.045	0.085	0.120	0.147	35.214	0.000
2008.69	54719.00	0.016	0.223	0.502	0.549	23.993	0.136
2008.87	54786.00	1.454	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
2008.87	54786.00	0.312	0.041	0.049	0.064	39.755	0.000
2008.87	54786.00	0.109	0.056	0.142	0.152	21.514	0.148
2008.87	54786.00	0.024	0.309	1.504	1.535	11.622	0.521
2008.97	54821.00	2.116	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046
2008.97	54821.00	0.034	0.167	0.244	0.295	34.477	0.106
2009.06	54855.00	0.434	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
2009.06	54855.00	1.756	0.024	0.039	0.046	32.073	0.025
2009.06	54855.00	0.409	0.036	0.140	0.145	14.202	0.073
2009.06	54855.00	0.034	0.128	0.372	0.393	18.947	0.263
2009.14	54884.00	1.658	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033
2009.14	54884.00	0.481	0.021	0.116	0.117	10.301	0.050
2009.14	54884.00	0.057	0.064	0.394	0.400	9.183	0.242
2009.14	54884.00	0.013	0.443	1.791	1.845	13.883	0.655
2009.25	54922.00	1.484	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
2009.25	54922.00	0.272	0.030	0.104	0.108	15.816	0.053
2009.25	54922.00	0.039	0.071	0.497	0.502	8.129	0.202
2009.25	54922.00	0.021	-0.008	0.264	0.264	-1.651	0.000

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2009.41	54981.00	0.450	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043
2009.41	54981.00	0.156	0.061	0.075	0.097	39.316	0.080
2009.41	54981.00	0.041	0.048	0.499	0.501	5.545	0.222
2009.47	55003.00	0.528	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2009.47	55003.00	0.097	0.054	0.095	0.109	29.769	0.063
2009.47	55003.00	0.030	0.078	0.562	0.568	7.931	0.269
2009.56	55038.00	0.520	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033
2009.56	55038.00	0.255	0.067	0.070	0.096	43.654	0.051
2009.56	55038.00	0.016	0.139	0.634	0.649	12.350	0.191
2009.62	55059.00	0.621	0.000	0.000	0.000	0.000	0.044
2009.62	55059.00	0.188	0.071	0.060	0.093	49.900	0.059
2009.62	55059.00	0.044	-0.017	0.279	0.280	-3.435	0.281
2009.62	55059.00	0.017	0.140	0.782	0.794	10.188	0.154
2009.71	55090.00	0.809	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049
2009.71	55090.00	0.256	0.078	0.068	0.104	48.951	0.071
2009.71	55090.00	0.054	0.097	0.491	0.500	11.173	0.267
2009.78	55118.00	0.436	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2009.78	55118.00	0.487	0.046	0.032	0.056	55.685	0.045
2009.78	55118.00	0.042	0.124	0.127	0.177	44.268	0.075
2009.78	55118.00	0.034	0.156	0.663	0.681	13.217	0.266
2009.79	55120.00	1.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017
2009.79	55120.00	0.264	0.072	0.054	0.090	53.230	0.030
2009.79	55120.00	0.043	0.123	0.595	0.607	11.641	0.283
2009.80	55124.00	1.123	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013
2009.80	55124.00	0.301	0.067	0.066	0.094	45.373	0.049
2009.80	55124.00	0.020	0.086	0.518	0.525	9.442	0.188
2009.80	55124.00	0.018	0.138	0.764	0.776	10.235	0.160
2009.82	55130.00	1.216	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021
2009.82	55130.00	0.298	0.048	0.040	0.062	50.072	0.000
2009.82	55130.00	0.194	0.086	0.104	0.134	39.487	0.077

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2009.82	55130.00	0.035	0.132	0.662	0.675	11.244	0.241
2009.91	55163.00	4.214	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017
2009.91	55163.00	0.311	0.053	0.079	0.095	33.963	0.045
2009.91	55163.00	0.069	0.129	0.217	0.253	30.807	0.111
2009.91	55163.00	0.013	0.151	0.811	0.825	10.540	0.176
2009.91	55163.00	0.009	0.126	0.504	0.520	14.058	0.000
2010.02	55206.00	1.727	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033
2010.02	55206.00	0.347	0.037	0.073	0.082	27.172	0.051
2010.02	55206.00	0.037	0.058	0.478	0.482	6.878	0.381
2010.11	55238.00	1.631	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032
2010.11	55238.00	0.154	0.039	0.089	0.097	23.364	0.080
2010.18	55261.00	1.616	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062
2010.18	55261.00	0.386	0.040	0.091	0.099	23.587	0.056
2010.18	55261.00	0.033	0.118	0.498	0.512	13.357	0.273
2010.27	55296.00	2.951	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034
2010.27	55296.00	0.729	0.059	0.012	0.060	78.392	0.049
2010.27	55296.00	0.223	0.099	0.121	0.156	39.481	0.066
2010.27	55296.00	0.063	0.066	0.379	0.385	9.908	0.368
2010.38	55335.00	1.515	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
2010.38	55335.00	0.379	0.092	0.055	0.107	59.050	0.058
2010.38	55335.00	0.037	0.111	0.517	0.529	12.152	0.206
2010.45	55361.00	0.578	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.45	55361.00	0.281	0.050	0.024	0.055	64.099	0.022
2010.45	55361.00	0.016	0.158	0.674	0.692	13.209	0.229
2010.45	55361.00	0.178	0.108	0.092	0.142	49.716	0.063
2010.58	55409.00	1.124	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018
2010.58	55409.00	0.675	0.062	0.017	0.064	74.496	0.034
2010.58	55409.00	0.036	0.109	0.425	0.439	14.341	0.234
2010.58	55409.00	0.151	0.122	0.128	0.177	43.763	0.117
2010.64	55429.00	1.874	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2010.64	55429.00	0.410	0.083	0.035	0.090	67.264	0.063
2010.64	55429.00	0.073	0.111	0.354	0.371	17.386	0.448
2010.71	55457.00	2.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007
2010.71	55457.00	0.731	0.063	0.022	0.066	70.416	0.062
2010.71	55457.00	0.063	0.070	0.562	0.566	7.145	0.310
2010.71	55457.00	0.012	0.112	0.168	0.202	33.576	0.000
2010.81	55493.00	2.695	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
2010.81	55493.00	0.849	0.067	0.018	0.070	74.709	0.036
2010.81	55493.00	0.124	0.146	0.078	0.166	61.860	0.050
2010.81	55493.00	0.021	0.150	0.651	0.668	12.969	0.223
2010.85	55507.00	1.765	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038
2010.85	55507.00	0.590	0.070	0.008	0.071	83.256	0.000
2010.85	55507.00	0.215	0.131	0.050	0.140	68.965	0.100
2010.85	55507.00	0.026	0.119	0.335	0.355	19.531	0.200
2010.87	55513.00	1.181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023
2010.87	55513.00	0.907	0.052	0.009	0.053	80.676	0.030
2010.87	55513.00	0.202	0.133	0.050	0.142	69.550	0.081
2010.87	55513.00	0.031	0.142	0.236	0.276	31.111	0.207
2010.87	55513.00	0.014	0.175	0.661	0.684	14.813	0.294
2010.92	55534.00	0.855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
2010.92	55534.00	0.701	0.062	0.023	0.066	69.956	0.047
2010.92	55534.00	0.049	0.166	0.091	0.189	61.241	0.001
2010.92	55534.00	0.015	0.163	0.405	0.437	21.943	0.207
2010.92	55534.00	0.005	0.100	0.783	0.789	7.304	0.000
2010.92	55534.00	0.005	0.213	1.122	1.142	10.753	0.001
2011.00	55563.00	0.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
2011.00	55563.00	0.944	0.045	0.029	0.053	57.110	0.038
2011.00	55563.00	0.586	0.101	0.055	0.116	61.356	0.073
2011.00	55563.00	0.021	0.174	0.660	0.682	14.769	0.470
2011.10	55597.00	0.501	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.10	55597.00	0.380	0.036	0.038	0.052	43.382	0.050
2011.10	55597.00	0.289	0.144	0.113	0.183	51.869	0.090
2011.16	55621.00	1.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019
2011.16	55621.00	0.692	0.060	0.064	0.088	43.078	0.071
2011.16	55621.00	0.091	0.187	0.171	0.253	47.546	0.106
2011.16	55621.00	0.010	0.118	0.473	0.487	13.987	0.000
2011.30	55672.00	1.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.30	55672.00	0.386	0.061	0.082	0.102	36.748	0.050
2011.30	55672.00	0.203	0.216	0.250	0.331	40.823	0.167
2011.39	55703.00	1.643	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.39	55703.00	1.346	0.025	0.046	0.052	28.703	0.047
2011.39	55703.00	1.306	0.080	0.150	0.170	28.213	0.053
2011.39	55703.00	0.105	-0.236	0.259	0.351	-42.348	0.207
2011.39	55703.00	0.048	-0.032	0.794	0.795	-2.339	0.173
2011.39	55703.00	0.306	0.184	0.288	0.341	32.557	0.292
2011.44	55724.00	1.971	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
2011.44	55724.00	0.883	0.032	0.039	0.050	38.986	0.000
2011.44	55724.00	0.390	0.083	0.141	0.163	30.524	0.046
2011.44	55724.00	0.170	0.230	0.386	0.449	30.805	0.184
2011.55	55763.00	1.884	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014
2011.55	55763.00	0.802	0.031	0.027	0.041	48.965	0.000
2011.55	55763.00	0.049	0.247	0.393	0.464	32.150	0.108
2011.55	55763.00	0.126	0.113	0.139	0.180	39.102	0.084
2011.55	55763.00	0.098	0.308	0.579	0.656	28.011	0.262
2011.64	55796.00	1.883	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.64	55796.00	0.716	0.037	0.025	0.044	56.250	0.000
2011.64	55796.00	0.210	0.099	0.126	0.160	38.186	0.095
2011.64	55796.00	0.024	0.267	0.404	0.484	33.454	0.001
2011.64	55796.00	0.087	0.349	0.650	0.738	28.251	0.309
2011.71	55820.00	1.606	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.71	55820.00	0.513	0.031	0.031	0.044	45.345	0.026
2011.71	55820.00	0.152	0.107	0.131	0.169	39.184	0.052
2011.71	55820.00	0.035	0.260	0.385	0.465	34.056	0.186
2011.71	55820.00	0.040	0.380	0.705	0.801	28.315	0.290
2011.79	55850.00	1.216	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.79	55850.00	0.776	0.027	0.041	0.050	33.427	0.029
2011.79	55850.00	0.147	0.118	0.146	0.188	38.937	0.101
2011.79	55850.00	0.044	0.243	0.361	0.435	33.925	0.193
2011.79	55850.00	0.051	0.395	0.767	0.863	27.235	0.353
2011.92	55897.00	1.792	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014
2011.92	55897.00	0.709	0.033	0.021	0.039	57.720	0.000
2011.92	55897.00	0.279	0.072	0.102	0.125	35.116	0.061
2011.92	55897.00	0.046	0.220	0.409	0.465	28.263	0.193
2011.92	55897.00	0.024	0.408	0.798	0.896	27.065	0.322
2012.07	55953.00	0.629	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032
2012.07	55953.00	0.154	0.074	0.081	0.110	42.228	0.076
2012.07	55953.00	0.042	0.136	0.312	0.340	23.603	0.118
2012.07	55953.00	0.040	0.357	0.658	0.749	28.453	0.339
2012.17	55991.00	0.970	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037
2012.17	55991.00	0.393	0.060	0.067	0.090	42.043	0.057
2012.17	55991.00	0.022	0.210	0.434	0.482	25.864	0.223
2012.17	55991.00	0.027	0.388	0.852	0.936	24.514	0.363
2012.25	56019.00	1.338	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027
2012.25	56019.00	0.631	0.064	0.075	0.098	40.459	0.096
2012.25	56019.00	0.007	0.336	1.176	1.223	15.944	0.000
2012.25	56019.00	0.021	0.227	0.491	0.541	24.813	0.180
2012.40	56073.00	0.456	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023
2012.40	56073.00	0.143	0.060	0.098	0.115	31.713	0.055
2012.40	56073.00	0.089	0.163	0.350	0.386	24.882	0.195
2012.40	56073.00	0.019	0.317	0.564	0.647	29.382	0.231

Продолжение таб.Б.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2012.40	56073.00	0.007	0.310	0.942	0.991	18.230	0.000

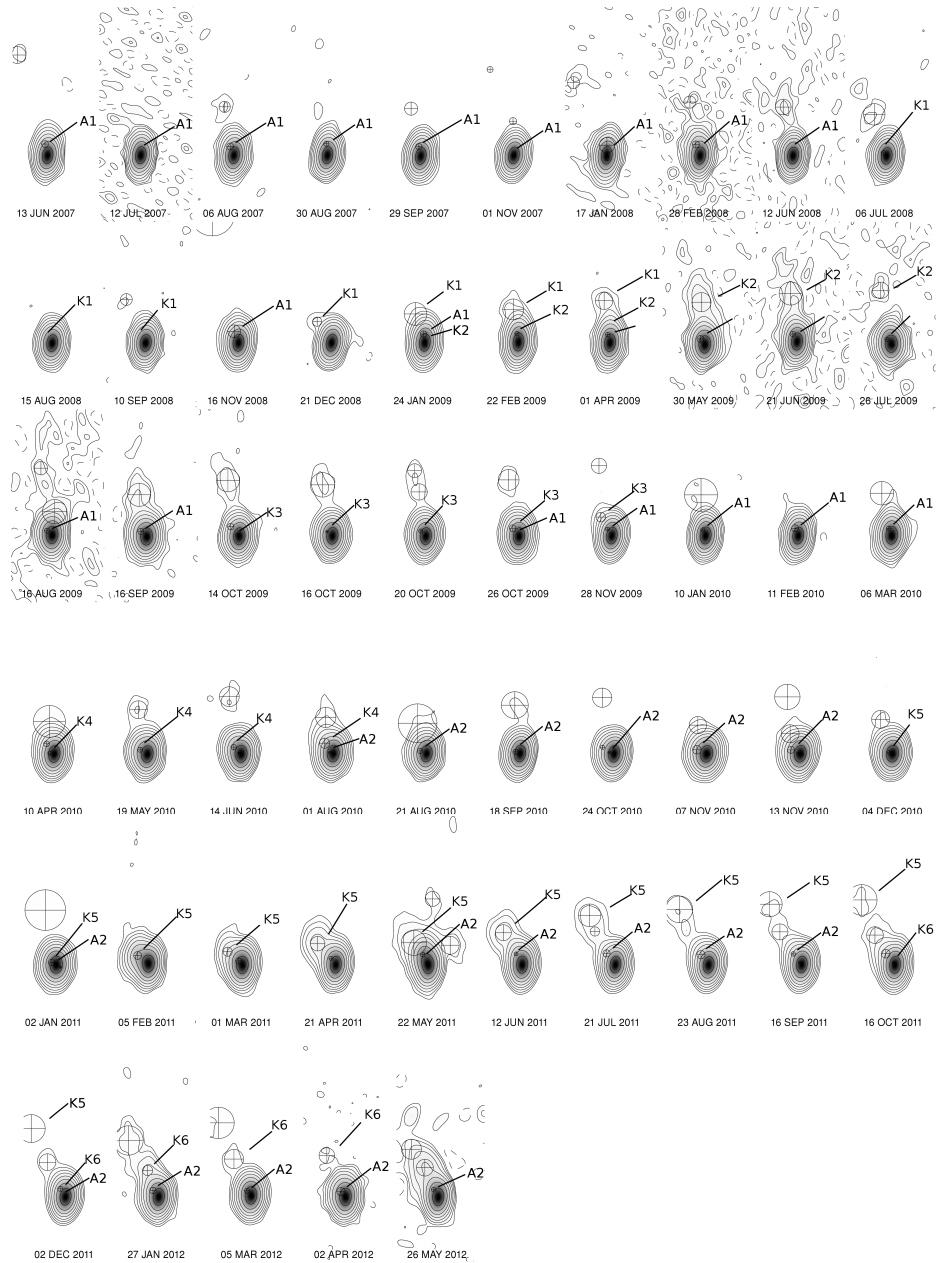


Рис. Б.1. Изображения в полном потоке с наложенным движением компонент для всех эпох. Контурсы соответствуют 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 % от пиковой интенсивности, главный лепесток диаграммы направленности $0.24 \times 0.15, -10^\circ$.

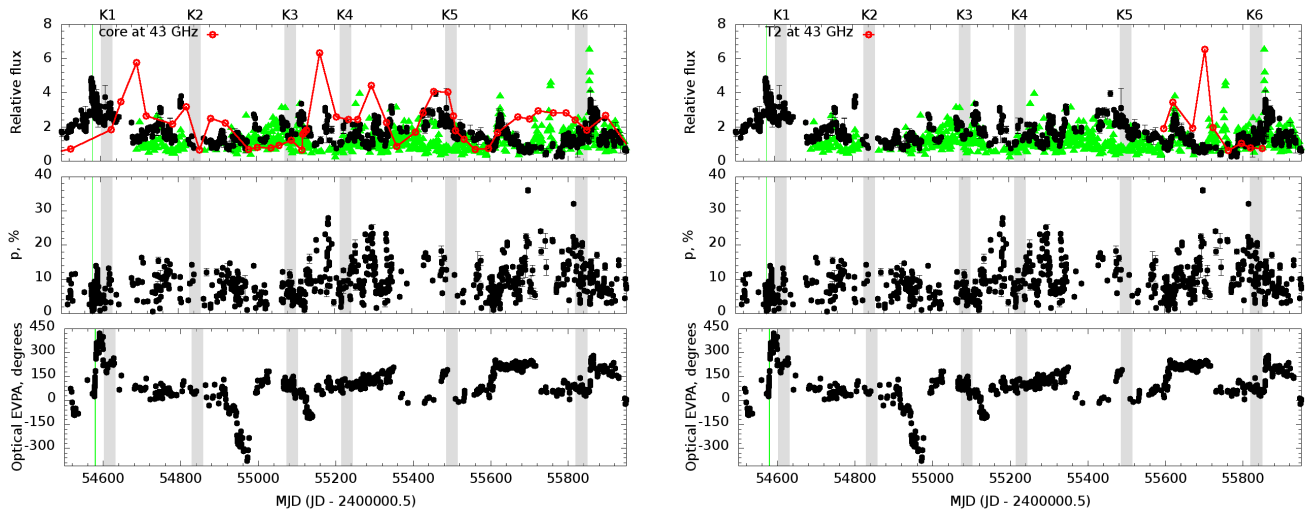


Рис. Б.2. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации

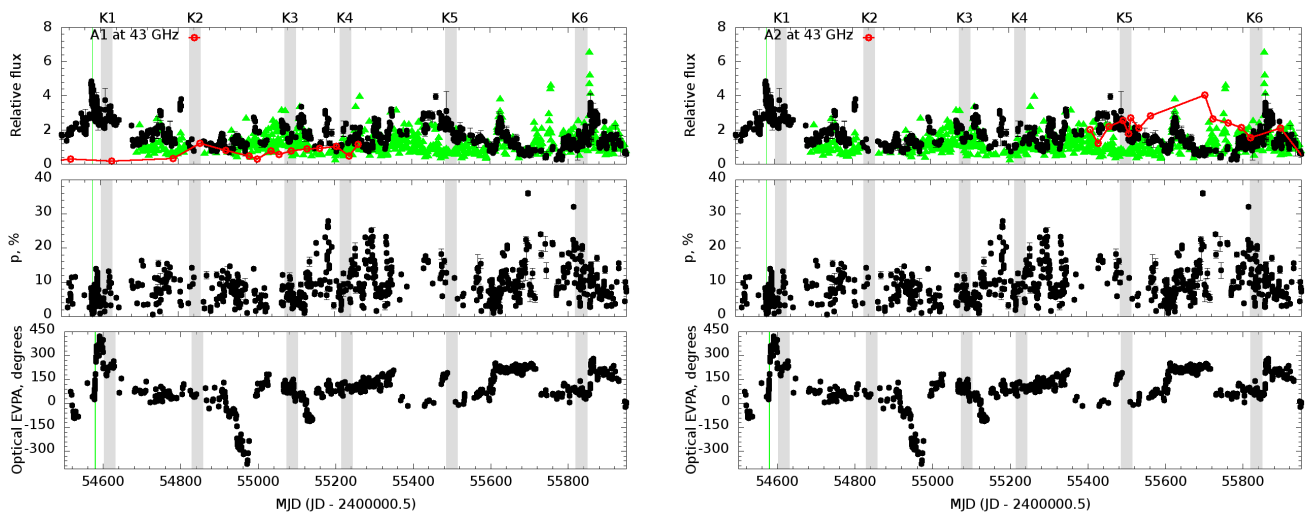


Рис. Б.3. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации

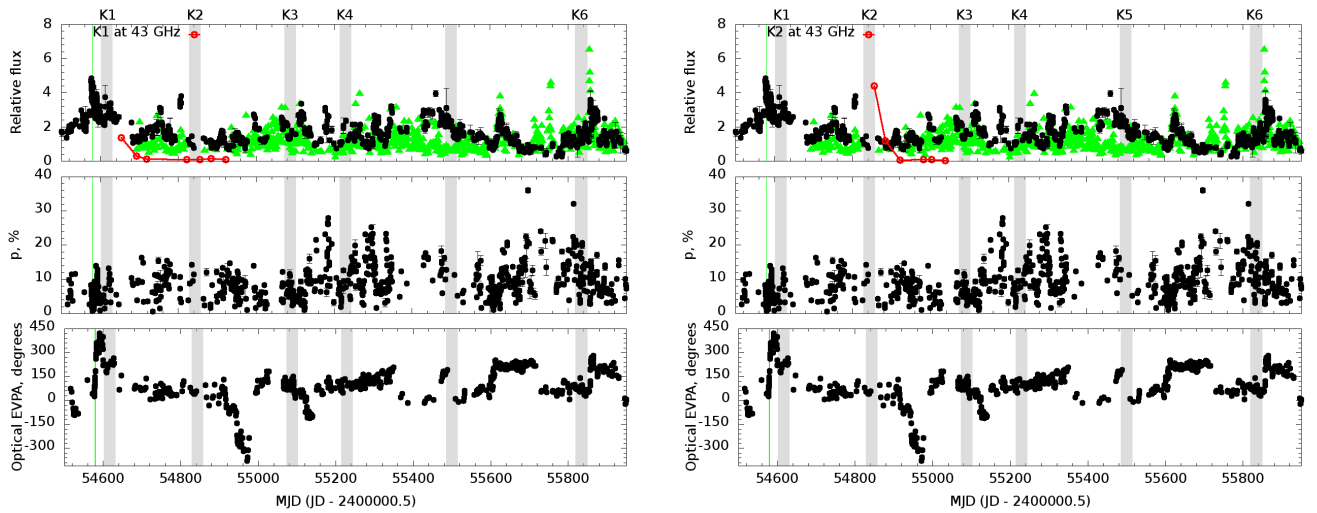


Рис. Б.4. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации

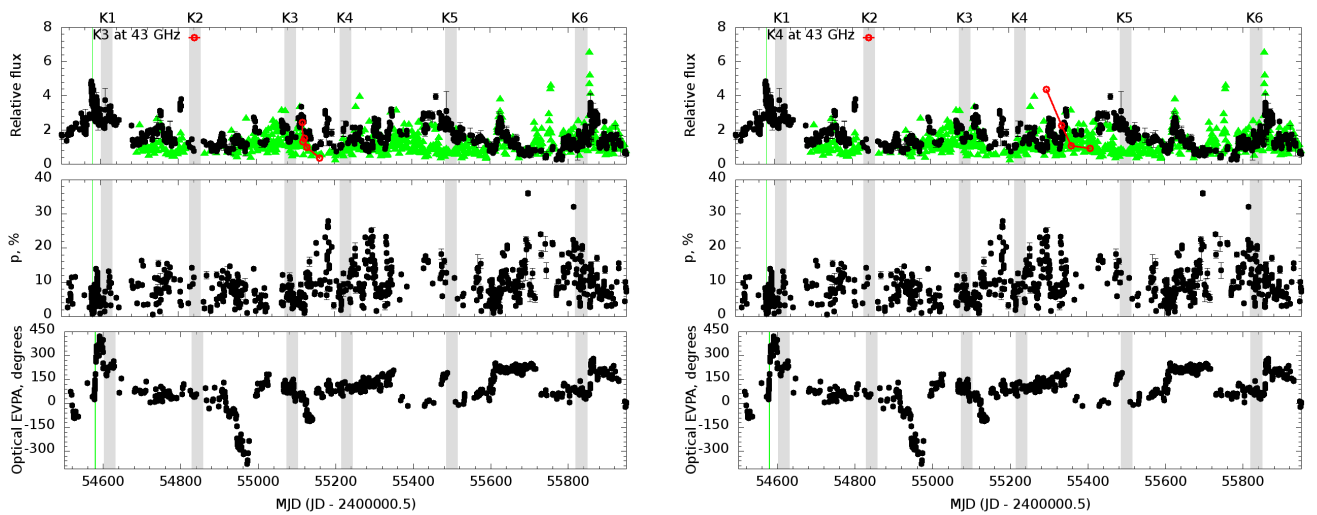


Рис. Б.5. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации

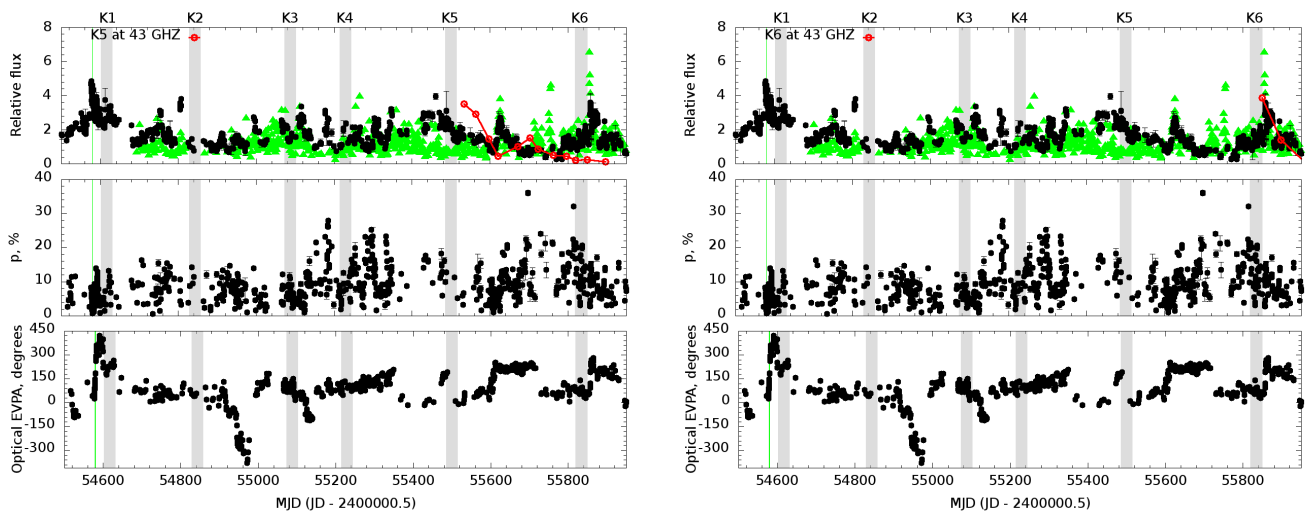


Рис. Б.6. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой блеска на частоте 43 ГГц ; кривая степени оптической поляризации; позиционный угол оптической поляризации

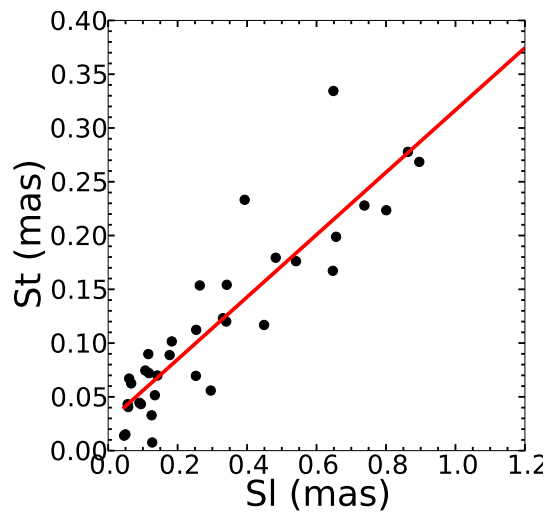


Рис. Б.7. Соотношение между видимым размером s_t джета и видимым расстоянием по долготе s_l компонент для объекта S5 0716+071

Приложение В

PKS 1510-089

Таблица В.1. Модели структуры джета объекта PKS 1510-089.

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2008.62	54694.00	1.457	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088
2008.62	54694.00	0.984	-0.141	0.182	0.230	-37.682	0.110
2008.69	54720.00	1.428	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2008.69	54720.00	0.618	-0.110	0.105	0.152	-46.303	0.054
2008.69	54720.00	0.672	-0.193	0.274	0.335	-35.226	0.119
2008.87	54787.00	1.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.061
2008.87	54787.00	0.284	-0.175	0.220	0.281	-38.456	0.095
2008.87	54787.00	0.356	-0.238	0.388	0.456	-31.556	0.193
2008.87	54787.00	0.025	-0.580	0.975	1.135	-30.736	0.862
2008.97	54822.00	0.821	0.000	0.000	0.000	0.000	0.076
2008.97	54822.00	0.173	-0.187	0.238	0.303	-38.192	0.080
2008.97	54822.00	0.258	-0.288	0.430	0.517	-33.793	0.236
2009.06	54856.00	1.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046
2009.06	54856.00	0.227	-0.184	0.248	0.309	-36.593	0.150
2009.06	54856.00	0.181	-0.341	0.542	0.641	-32.195	0.375
2009.15	54886.00	0.915	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055
2009.15	54886.00	0.184	-0.154	0.138	0.207	-48.255	0.170
2009.15	54886.00	0.167	-0.380	0.658	0.760	-30.026	0.336
2009.25	54924.00	0.409	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2009.25	54924.00	1.192	-0.036	0.071	0.080	-26.840	0.031
2009.25	54924.00	0.127	-0.221	0.254	0.337	-40.979	0.134
2009.25	54924.00	0.093	-0.275	0.450	0.527	-31.378	0.146
2009.25	54924.00	0.134	-0.491	0.827	0.962	-30.711	0.564
2009.25	54924.00	0.014	-1.021	2.441	2.646	-22.702	0.102
2009.41	54983.00	1.764	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2009.41	54983.00	2.040	-0.036	0.049	0.061	-36.108	0.055
2009.41	54983.00	0.115	-0.246	0.276	0.370	-41.753	0.074
2009.41	54983.00	0.051	-0.296	0.475	0.560	-31.948	0.119
2009.41	54983.00	0.096	-0.517	0.924	1.058	-29.229	0.690
2009.47	55005.00	1.539	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018
2009.47	55005.00	1.104	-0.068	0.096	0.118	-35.557	0.076
2009.47	55005.00	0.087	-0.275	0.355	0.449	-37.743	0.117
2009.47	55005.00	0.033	-0.258	0.829	0.869	-17.292	0.169
2009.47	55005.00	0.029	-0.526	1.234	1.342	-23.091	0.166
2009.57	55040.00	1.395	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048
2009.57	55040.00	0.908	-0.087	0.157	0.179	-28.962	0.101
2009.57	55040.00	0.089	-0.273	0.317	0.418	-40.694	0.169
2009.57	55040.00	0.026	-0.381	1.131	1.194	-18.637	0.100
2009.62	55060.00	1.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
2009.62	55060.00	0.829	-0.120	0.221	0.251	-28.443	0.088
2009.62	55060.00	0.060	-0.259	0.312	0.405	-39.719	0.000
2009.62	55060.00	0.052	-0.440	0.702	0.828	-32.060	0.490
2009.71	55091.00	0.672	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047
2009.71	55091.00	0.415	-0.121	0.177	0.214	-34.332	0.070
2009.71	55091.00	0.496	-0.206	0.320	0.381	-32.679	0.135
2009.71	55091.00	0.069	-0.477	0.692	0.840	-34.582	0.514
2009.79	55121.00	1.275	0.000	0.000	0.000	0.000	0.082
2009.79	55121.00	0.440	-0.231	0.348	0.418	-33.533	0.151
2009.79	55121.00	0.058	-0.466	0.787	0.915	-30.633	0.369
2009.91	55164.00	1.888	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
2009.91	55164.00	0.132	-0.264	0.365	0.450	-35.853	0.066
2009.91	55164.00	0.124	-0.399	0.674	0.783	-30.614	0.340
2010.02	55207.00	1.581	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047
2010.02	55207.00	0.238	-0.108	0.121	0.162	-41.797	0.092
2010.02	55207.00	0.063	-0.568	0.753	0.943	-37.034	0.252

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2010.02	55207.00	0.058	-0.337	0.471	0.579	-35.612	0.148
2010.02	55207.00	0.008	-0.169	1.498	1.507	-6.451	0.102
2010.02	55207.00	0.021	-0.441	1.058	1.147	-22.629	0.143
2010.11	55239.00	1.561	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
2010.11	55239.00	0.212	-0.152	0.201	0.252	-37.071	0.054
2010.11	55239.00	0.126	-0.250	0.356	0.435	-35.125	0.098
2010.11	55239.00	0.040	-0.596	0.758	0.964	-38.179	0.068
2010.11	55239.00	0.036	-0.493	1.118	1.222	-23.779	0.154
2010.18	55262.00	1.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.060
2010.18	55262.00	0.120	-0.181	0.161	0.243	-48.401	0.000
2010.18	55262.00	0.266	-0.217	0.314	0.381	-34.666	0.117
2010.18	55262.00	0.070	-0.554	1.141	1.269	-25.908	0.342
2010.18	55262.00	0.048	-0.585	0.671	0.890	-41.078	0.370
2010.18	55262.00	0.010	-1.493	1.774	2.319	-40.094	0.305
2010.38	55336.00	1.176	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019
2010.38	55336.00	0.488	-0.047	0.065	0.080	-35.793	0.039
2010.38	55336.00	0.055	-0.190	0.212	0.285	-41.799	0.122
2010.38	55336.00	0.057	-0.288	0.375	0.473	-37.521	0.167
2010.38	55336.00	0.064	-0.457	0.540	0.708	-40.237	0.207
2010.38	55336.00	0.065	-0.686	1.219	1.399	-29.346	0.599
2010.45	55363.00	0.194	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
2010.45	55363.00	0.742	-0.037	0.081	0.089	-24.730	0.010
2010.45	55363.00	0.122	-0.156	0.230	0.278	-34.180	0.046
2010.45	55363.00	0.029	-0.321	0.437	0.542	-36.278	0.075
2010.45	55363.00	0.045	-0.524	0.638	0.825	-39.368	0.272
2010.45	55363.00	0.011	-0.522	1.146	1.259	-24.503	0.143
2010.45	55363.00	0.019	-0.819	1.432	1.650	-29.764	0.385
2010.58	55410.00	0.482	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.58	55410.00	1.214	-0.036	0.036	0.051	-44.365	0.012
2010.58	55410.00	0.038	-0.181	0.212	0.278	-40.463	0.103

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2010.58	55410.00	0.112	-0.277	0.362	0.456	-37.383	0.107
2010.58	55410.00	0.041	-0.627	0.554	0.837	-48.550	0.142
2010.58	55410.00	0.013	-0.995	1.683	1.955	-30.602	0.153
2010.58	55410.00	0.041	-0.614	1.188	1.337	-27.322	0.405
2010.71	55458.00	0.651	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.71	55458.00	1.545	-0.033	0.073	0.080	-23.903	0.037
2010.71	55458.00	0.139	-0.201	0.321	0.379	-32.093	0.103
2010.71	55458.00	0.106	-0.555	0.676	0.875	-39.377	0.435
2010.71	55458.00	0.014	-1.276	2.120	2.474	-31.037	0.108
2010.71	55458.00	0.038	-0.954	1.561	1.829	-31.437	0.233
2010.71	55458.00	0.022	-0.739	1.281	1.479	-29.983	0.084
2010.81	55494.00	0.654	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.81	55494.00	1.339	-0.039	0.077	0.086	-26.930	0.037
2010.81	55494.00	0.118	-0.179	0.199	0.268	-41.917	0.072
2010.81	55494.00	0.066	-0.323	0.481	0.579	-33.874	0.121
2010.81	55494.00	0.030	-0.688	0.844	1.089	-39.178	0.192
2010.81	55494.00	0.013	-0.935	1.007	1.374	-42.878	0.128
2010.81	55494.00	0.012	-1.489	1.584	2.173	-43.227	0.309
2010.92	55535.00	0.386	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.92	55535.00	1.274	-0.019	0.039	0.044	-25.850	0.040
2010.92	55535.00	0.049	-0.207	0.204	0.291	-45.411	0.100
2010.92	55535.00	0.088	-0.301	0.387	0.490	-37.812	0.144
2010.92	55535.00	0.030	-0.576	0.703	0.909	-39.334	0.280
2010.92	55535.00	0.026	-0.893	1.116	1.429	-38.658	0.259
2010.92	55535.00	0.005	-1.489	1.499	2.113	-44.794	0.114
2010.92	55535.00	0.003	-1.570	1.019	1.872	-57.030	0.073
2011.00	55564.00	0.401	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050
2011.00	55564.00	2.126	-0.026	0.080	0.084	-17.905	0.046
2011.00	55564.00	0.066	-0.351	0.415	0.544	-40.288	0.078
2011.00	55564.00	0.039	-0.966	1.277	1.601	-37.104	0.446

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.00	55564.00	0.009	-1.653	1.933	2.544	-40.528	0.031
2011.00	55564.00	0.018	-0.306	0.792	0.849	-21.146	0.097
2011.00	55564.00	0.031	-0.666	0.789	1.033	-40.162	0.232
2011.10	55598.00	0.333	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
2011.10	55598.00	1.857	-0.029	0.080	0.085	-19.696	0.041
2011.10	55598.00	0.052	-0.512	0.569	0.766	-42.005	0.299
2011.10	55598.00	0.102	-0.121	0.211	0.244	-29.823	0.160
2011.10	55598.00	0.053	-1.078	1.783	2.083	-31.160	0.964
2011.10	55598.00	0.004	-0.353	1.360	1.405	-14.534	0.000
2011.16	55622.00	1.733	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
2011.16	55622.00	0.575	0.004	0.080	0.081	2.876	0.001
2011.16	55622.00	0.031	-0.621	0.685	0.924	-42.196	0.249
2011.16	55622.00	0.008	-1.380	2.106	2.518	-33.233	0.119
2011.16	55622.00	0.030	-1.036	1.195	1.582	-40.927	0.416
2011.16	55622.00	0.011	-0.177	0.236	0.295	-36.904	0.000
2011.16	55622.00	0.041	-0.300	0.366	0.473	-39.285	0.157
2011.39	55705.00	1.449	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.39	55705.00	0.329	-0.031	0.114	0.119	-15.256	0.114
2011.39	55705.00	0.062	-0.199	0.269	0.335	-36.508	0.139
2011.39	55705.00	0.023	-1.141	1.529	1.908	-36.723	0.247
2011.39	55705.00	0.023	-0.743	0.602	0.956	-51.001	0.577
2011.39	55705.00	0.007	-0.599	1.219	1.358	-26.190	0.125
2011.55	55765.00	0.579	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011
2011.55	55765.00	1.522	-0.022	0.063	0.067	-18.816	0.031
2011.55	55765.00	0.046	-0.180	0.202	0.271	-41.800	0.050
2011.55	55765.00	0.056	-1.275	1.736	2.154	-36.293	1.164
2011.55	55765.00	0.019	-0.337	0.411	0.531	-39.394	0.080
2011.64	55797.00	0.844	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034
2011.64	55797.00	1.845	-0.017	0.074	0.076	-12.917	0.000
2011.64	55797.00	0.083	-0.080	0.191	0.207	-22.649	0.061

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.64	55797.00	0.024	-0.271	0.436	0.513	-31.835	0.000
2011.64	55797.00	0.013	-0.744	1.098	1.326	-34.136	0.625
2011.64	55797.00	0.033	-1.462	1.693	2.237	-40.815	0.593
2011.64	55797.00	0.007	-1.686	2.840	3.302	-30.696	0.176
2011.64	55797.00	0.007	-1.805	3.391	3.841	-28.024	0.114
2011.71	55821.00	0.832	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034
2011.71	55821.00	2.103	-0.028	0.064	0.070	-23.708	0.020
2011.71	55821.00	0.085	-0.090	0.192	0.212	-25.232	0.094
2011.71	55821.00	0.017	-0.367	0.429	0.564	-40.544	0.137
2011.71	55821.00	0.046	-1.332	1.806	2.244	-36.417	0.996
2011.71	55821.00	0.005	-2.081	2.746	3.445	-37.155	0.000
2011.71	55821.00	0.005	-1.924	3.230	3.759	-30.775	0.034
2011.79	55851.00	5.106	0.000	0.000	0.000	0.000	0.060
2011.79	55851.00	0.739	-0.004	0.075	0.075	-2.991	0.000
2011.79	55851.00	0.033	-0.905	1.474	1.730	-31.543	0.171
2011.79	55851.00	0.030	-1.714	1.575	2.328	-47.411	0.109
2011.79	55851.00	0.137	-0.048	0.237	0.242	-11.428	0.281
2011.79	55851.00	0.027	-0.346	0.844	0.912	-22.267	0.125
2011.92	55898.00	2.151	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051
2011.92	55898.00	2.813	-0.022	0.104	0.106	-11.839	0.091
2011.92	55898.00	0.015	-0.364	0.254	0.444	-55.119	0.102
2011.92	55898.00	0.013	-0.479	1.131	1.229	-22.967	0.153
2011.92	55898.00	0.031	0.075	0.281	0.291	14.891	0.000
2011.92	55898.00	0.012	-1.125	1.223	1.661	-42.615	0.175
2012.07	55954.00	1.628	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038
2012.07	55954.00	2.664	-0.072	0.214	0.226	-18.650	0.146
2012.07	55954.00	0.025	-0.170	0.674	0.695	-14.123	0.000
2012.07	55954.00	0.019	-0.612	0.582	0.845	-46.456	0.000
2012.17	55992.00	2.230	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065
2012.17	55992.00	1.667	-0.119	0.287	0.310	-22.471	0.182

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2012.25	56021.00	2.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045
2012.25	56021.00	0.781	-0.053	0.194	0.201	-15.372	0.115
2012.25	56021.00	1.164	-0.156	0.386	0.416	-21.960	0.199
2012.40	56075.00	1.939	0.000	0.000	0.000	0.000	0.078
2012.40	56075.00	2.054	-0.129	0.177	0.219	-35.973	0.115
2012.40	56075.00	0.791	-0.215	0.463	0.510	-24.875	0.270
2012.51	56114.00	0.946	0.000	0.000	0.000	0.000	0.079
2012.51	56114.00	0.758	-0.197	0.255	0.322	-37.649	0.114
2012.51	56114.00	0.886	-0.182	0.453	0.488	-21.898	0.318
2012.51	56114.00	0.562	-0.009	0.130	0.130	-3.770	0.050
2012.51	56114.00	0.045	-0.487	-0.033	0.489	-93.840	0.137
2012.51	56114.00	0.071	-0.382	0.899	0.977	-23.025	0.139
2012.61	56153.00	1.233	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062
2012.61	56153.00	0.757	-0.275	0.367	0.459	-36.808	0.221
2012.61	56153.00	0.099	0.007	0.361	0.362	1.141	0.000
2012.61	56153.00	0.038	-0.352	1.108	1.162	-17.633	0.000
2012.61	56153.00	0.032	-0.681	0.699	0.976	-44.261	0.073
2012.61	56153.00	0.056	-0.808	1.565	1.761	-27.299	0.422
2012.61	56153.00	0.034	-1.718	1.666	2.393	-45.883	0.325
2012.82	56229.00	1.623	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040
2012.82	56229.00	0.754	-0.050	0.095	0.107	-27.667	0.090
2012.82	56229.00	0.233	-0.228	0.334	0.404	-34.339	0.158
2012.82	56229.00	0.286	-0.240	0.562	0.611	-23.152	0.266
2012.82	56229.00	0.051	-0.600	0.485	0.771	-51.045	0.121
2012.82	56229.00	0.081	-0.544	0.821	0.985	-33.523	0.334
2012.97	56283.00	1.946	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2012.97	56283.00	0.198	-0.341	0.634	0.719	-28.280	0.068
2012.97	56283.00	0.282	-0.075	0.129	0.149	-30.204	0.138
2012.97	56283.00	0.055	-0.684	1.159	1.345	-30.540	0.066
2013.04	56308.00	0.795	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038

Продолжение таб.В.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2013.04	56308.00	0.956	0.023	0.100	0.103	12.733	0.036
2013.04	56308.00	0.139	-0.229	0.311	0.386	-36.372	0.098
2013.04	56308.00	0.182	-0.487	0.834	0.965	-30.302	0.565
2013.15	56350.00	1.573	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051
2013.15	56350.00	0.808	0.012	0.133	0.133	5.347	0.098
2013.15	56350.00	0.191	-0.568	0.957	1.113	-30.708	0.638
2013.15	56350.00	0.049	-0.262	0.331	0.422	-38.335	0.000
2013.29	56400.00	0.740	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019
2013.29	56400.00	1.390	-0.072	0.225	0.236	-17.756	0.144
2013.29	56400.00	0.073	-0.532	1.079	1.203	-26.261	0.285
2013.29	56400.00	0.050	-0.986	1.134	1.503	-40.993	0.366
2013.41	56444.00	0.825	0.000	0.000	0.000	0.000	0.094
2013.41	56444.00	0.583	-0.016	0.147	0.148	-6.088	0.000
2013.41	56444.00	1.357	-0.088	0.363	0.374	-13.646	0.203
2013.41	56444.00	0.049	-0.612	1.124	1.279	-28.561	0.200
2013.41	56444.00	0.060	-0.911	1.353	1.631	-33.960	0.326
2013.41	56445.00	0.471	0.000	0.000	0.000	0.000	0.103
2013.41	56445.00	0.613	-0.037	0.136	0.141	-15.025	0.029
2013.41	56445.00	0.595	-0.120	0.425	0.442	-15.746	0.275
2013.41	56445.00	0.049	-0.635	1.340	1.483	-25.373	0.134

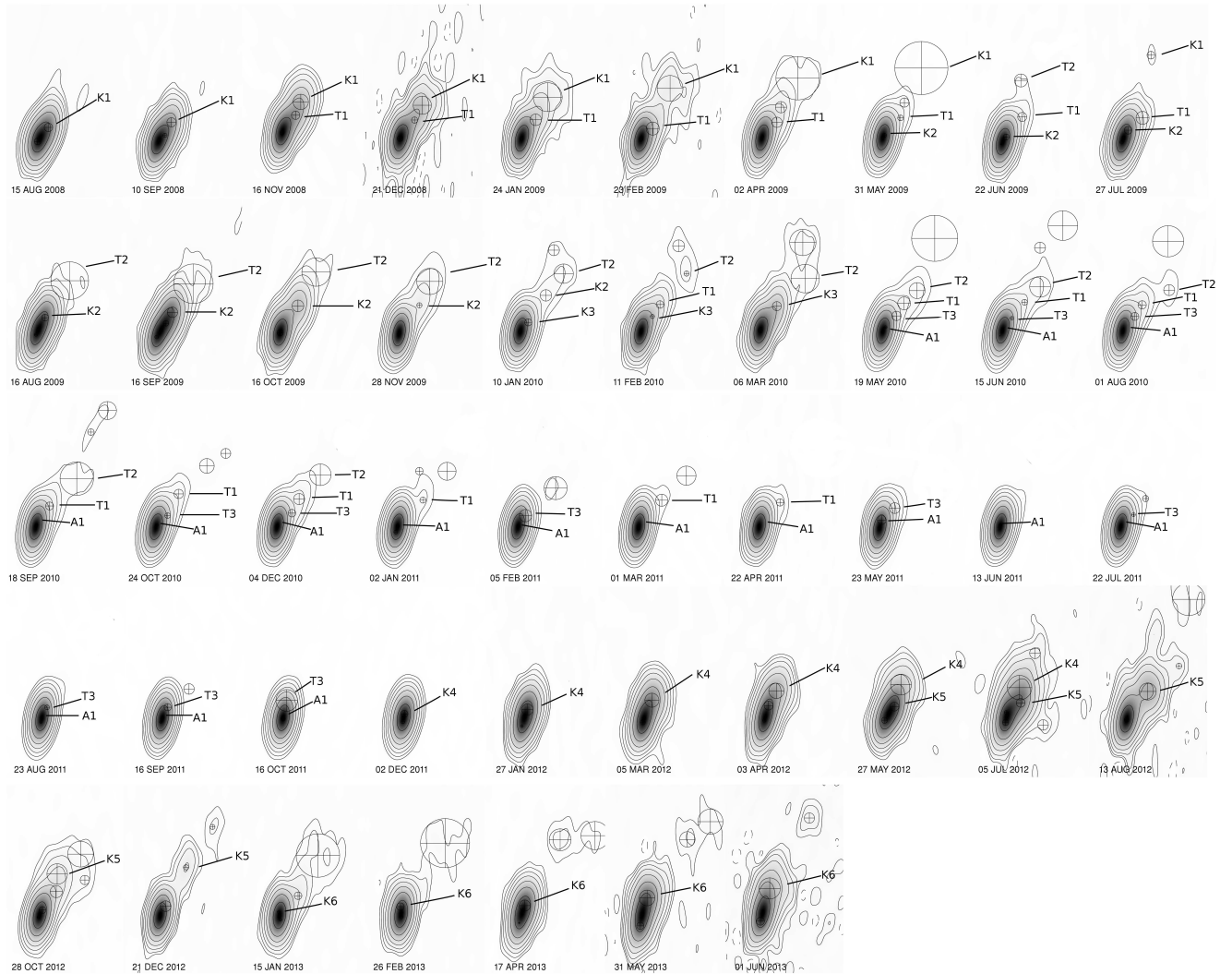


Рис. В.1. Изображения в полном потоке с наложенным движением компонент для всех эпох. Контуры соответствуют 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 % от пиковой интенсивности, главный лепесток диаграммы направленности $0.41 \times 0.19, -10^\circ$.

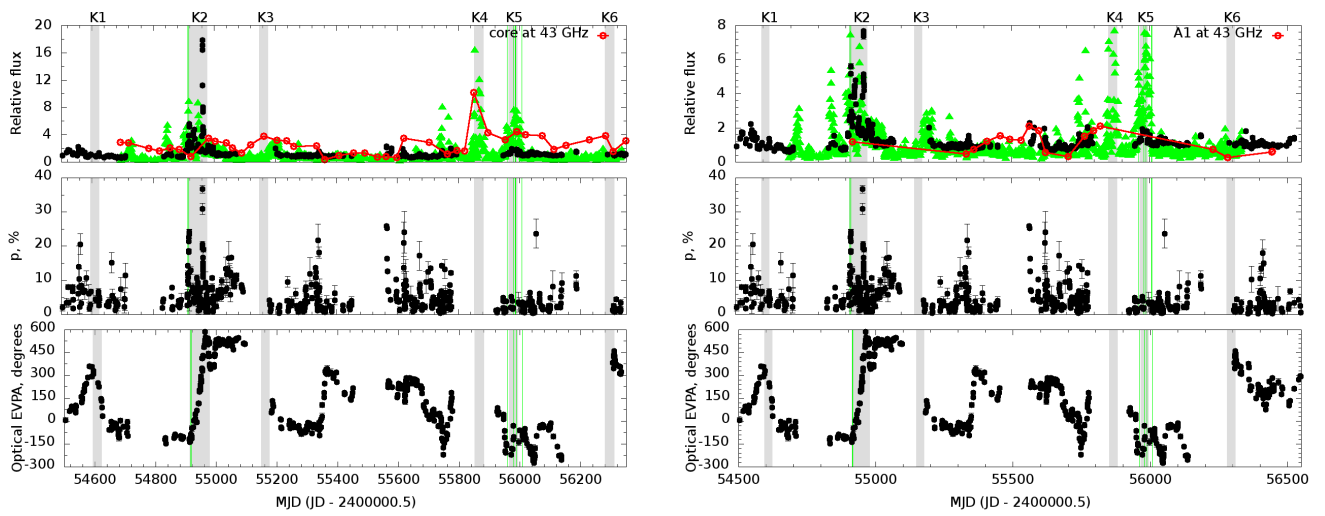


Рис. В.2. Оптическая кривая блеска в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

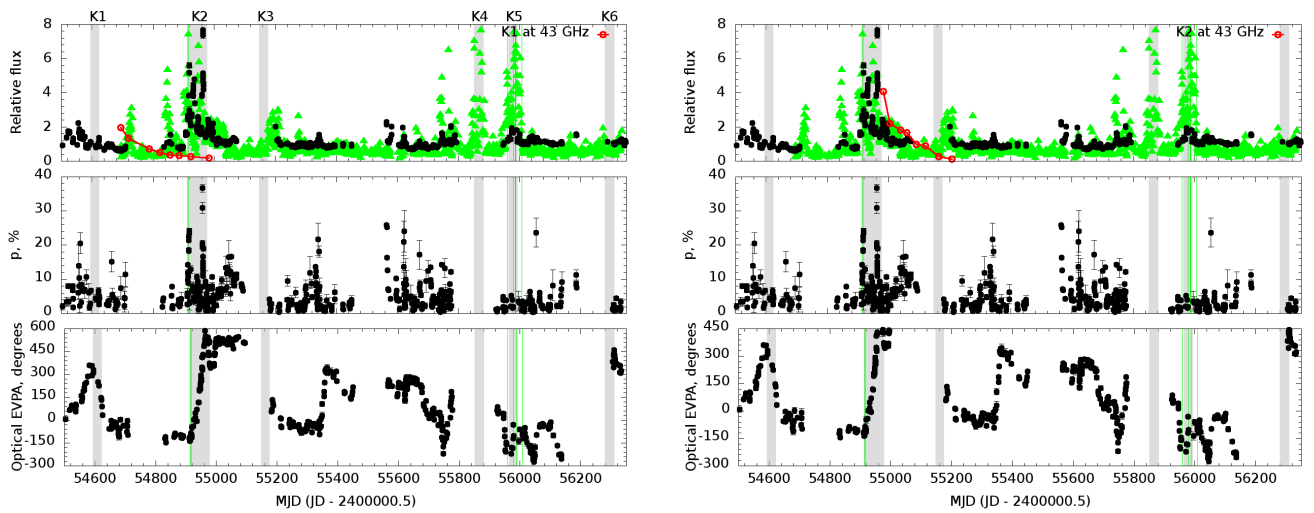


Рис. В.3. Оптическая кривая блеска в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

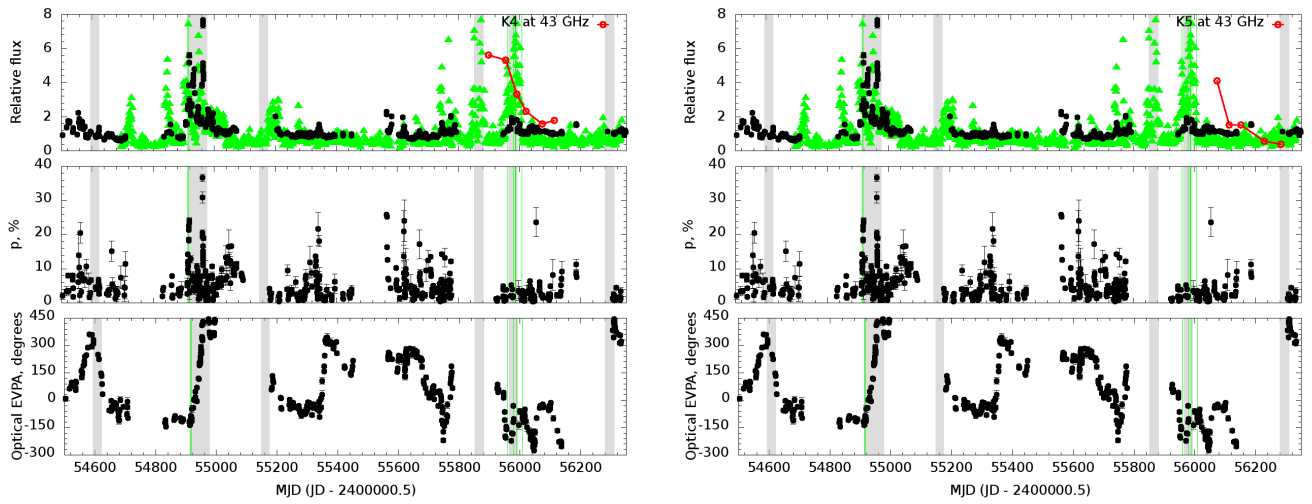


Рис. В.4. Оптическая кривая блеска в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

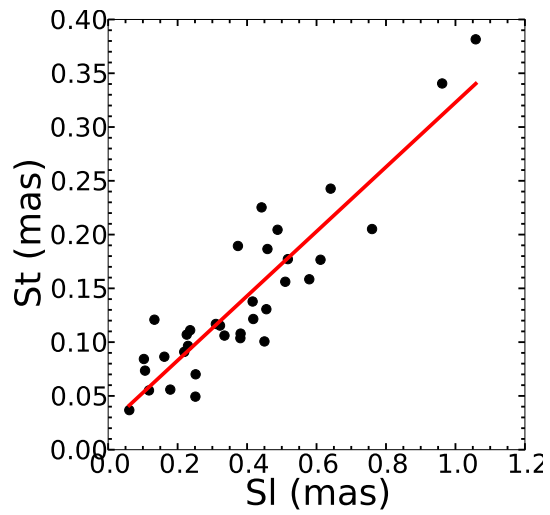


Рис. В.5. Соотношение между видимым размером s_t джета и видимым расстоянием по долготе s_l компонент для объекта PKS 1510-089

Приложение Г

PKS 1222+216

Таблица Г.1. Модели структуры джета объекта PKS 1222+216.

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2008.62	54694.00	0.249	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059
2008.62	54694.00	0.179	-0.007	0.136	0.136	-2.945	0.055
2008.62	54694.00	0.024	0.038	0.398	0.399	5.439	0.183
2008.69	54720.00	0.156	0.000	0.000	0.000	0.000	0.054
2008.69	54720.00	0.221	-0.017	0.151	0.152	-6.309	0.049
2008.69	54720.00	0.028	-0.039	0.416	0.418	-5.390	0.137
2008.69	54720.00	0.010	0.378	1.460	1.508	14.514	0.128
2008.88	54789.00	0.188	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036
2008.88	54789.00	0.181	0.021	0.169	0.170	7.128	0.044
2008.88	54789.00	0.046	-0.026	0.342	0.343	-4.348	0.134
2008.88	54789.00	0.008	-0.161	0.990	1.003	-9.224	0.185
2008.97	54822.00	0.130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041
2008.97	54822.00	0.117	-0.002	0.223	0.223	-0.423	0.055
2008.97	54822.00	0.007	-0.886	1.315	1.586	-33.967	0.112
2008.97	54822.00	0.049	-0.044	0.492	0.494	-5.167	0.161
2009.06	54856.00	0.265	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
2009.06	54856.00	0.098	0.045	0.144	0.151	17.292	0.043
2009.06	54856.00	0.073	0.029	0.358	0.359	4.561	0.133
2009.06	54856.00	0.012	0.001	0.762	0.762	0.054	0.228
2009.15	54886.00	0.269	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026
2009.15	54886.00	0.096	0.018	0.147	0.149	6.902	0.081
2009.15	54886.00	0.044	0.016	0.393	0.393	2.280	0.136
2009.15	54886.00	0.014	-0.058	0.844	0.846	-3.922	0.298
2009.47	55004.00	0.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2009.47	55004.00	0.168	0.015	0.140	0.141	6.095	0.087

Продолжение таб.Г.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2009.47	55004.00	0.031	0.224	1.243	1.263	10.203	0.235
2009.62	55060.00	0.273	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021
2009.62	55060.00	0.073	0.023	0.196	0.197	6.754	0.017
2009.79	55121.00	0.639	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
2009.79	55121.00	0.171	0.015	0.128	0.129	6.742	0.043
2009.79	55121.00	0.015	0.017	0.905	0.906	1.097	0.147
2009.79	55121.00	0.036	0.041	0.341	0.343	6.935	0.113
2009.79	55121.00	0.007	0.180	1.317	1.329	7.781	0.256
2010.02	55207.00	0.843	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2010.02	55207.00	0.165	0.008	0.115	0.116	4.199	0.046
2010.02	55207.00	0.019	0.115	1.136	1.142	5.765	0.297
2010.18	55262.00	0.344	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
2010.18	55262.00	0.616	0.036	0.070	0.079	27.256	0.024
2010.18	55262.00	0.122	0.052	0.221	0.227	13.276	0.081
2010.18	55262.00	0.014	0.100	1.111	1.115	5.124	0.442
2010.18	55262.00	0.002	0.110	0.641	0.650	9.749	0.000
2010.26	55294.00	0.945	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050
2010.26	55294.00	0.553	0.028	0.108	0.112	14.642	0.000
2010.26	55294.00	0.079	0.052	0.303	0.307	9.804	0.200
2010.26	55294.00	0.015	0.060	1.061	1.062	3.241	0.410
2010.27	55297.00	1.065	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034
2010.27	55297.00	0.377	0.032	0.122	0.127	14.606	0.049
2010.27	55297.00	0.067	0.026	0.311	0.312	4.741	0.186
2010.29	55303.00	1.203	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045
2010.29	55303.00	0.368	0.022	0.165	0.166	7.461	0.077
2010.38	55336.00	0.994	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028
2010.38	55336.00	0.250	0.026	0.124	0.127	11.707	0.058
2010.38	55336.00	0.061	0.046	0.294	0.298	8.917	0.094
2010.38	55336.00	0.011	0.024	0.946	0.947	1.473	0.280
2010.45	55362.00	0.808	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Продолжение таб.Г.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2010.45	55362.00	0.556	0.031	0.058	0.066	28.127	0.008
2010.45	55362.00	0.127	0.060	0.230	0.237	14.521	0.081
2010.45	55362.00	0.010	0.219	1.495	1.511	8.351	0.213
2010.45	55362.00	0.016	0.121	0.503	0.518	13.546	0.063
2010.45	55362.00	0.013	-0.200	2.604	2.612	-4.398	0.186
2010.45	55362.00	0.009	-0.093	3.839	3.840	-1.383	0.090
2010.45	55362.00	0.004	0.173	1.013	1.028	9.688	0.074
2010.58	55410.00	1.299	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2010.58	55410.00	0.520	0.018	0.101	0.103	10.123	0.044
2010.58	55410.00	0.077	0.049	0.300	0.304	9.354	0.086
2010.58	55410.00	0.019	0.101	1.387	1.391	4.171	0.324
2010.58	55410.00	0.011	0.452	1.124	1.211	21.915	0.195
2010.64	55430.00	1.266	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017
2010.64	55430.00	0.420	0.022	0.121	0.123	10.465	0.035
2010.64	55430.00	0.039	0.067	0.369	0.375	10.251	0.064
2010.64	55430.00	0.028	0.147	1.297	1.305	6.472	0.587
2010.71	55458.00	1.582	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041
2010.71	55458.00	1.069	0.013	0.115	0.115	6.293	0.059
2010.71	55458.00	0.150	0.050	0.314	0.318	9.057	0.118
2010.71	55458.00	0.035	-0.013	0.968	0.968	-0.793	0.357
2010.81	55494.00	1.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026
2010.81	55494.00	0.399	0.025	0.143	0.145	9.826	0.051
2010.81	55494.00	0.046	0.053	0.385	0.389	7.768	0.116
2010.92	55535.00	1.321	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023
2010.92	55535.00	0.372	0.015	0.107	0.108	7.761	0.057
2010.92	55535.00	0.105	0.045	0.272	0.276	9.346	0.060
2010.92	55535.00	0.017	0.100	0.507	0.517	11.168	0.137
2011.00	55564.00	1.133	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2011.00	55564.00	0.483	0.004	0.104	0.104	2.373	0.057
2011.00	55564.00	0.108	0.053	0.288	0.293	10.343	0.072

Продолжение таб.Г.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.00	55564.00	0.021	0.075	0.653	0.657	6.585	0.195
2011.10	55598.00	1.661	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027
2011.10	55598.00	0.298	0.030	0.132	0.136	12.698	0.044
2011.10	55598.00	0.058	0.064	0.402	0.407	8.987	0.118
2011.16	55622.00	1.704	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2011.16	55622.00	0.625	0.017	0.076	0.077	12.332	0.064
2011.16	55622.00	0.096	0.053	0.305	0.309	9.933	0.098
2011.16	55622.00	0.020	0.113	0.558	0.569	11.449	0.080
2011.30	55674.00	0.281	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065
2011.30	55674.00	1.367	-0.013	0.078	0.079	-9.647	0.036
2011.30	55674.00	0.640	0.005	0.179	0.179	1.475	0.108
2011.30	55674.00	0.039	0.059	0.397	0.401	8.504	0.022
2011.30	55674.00	0.048	0.106	0.602	0.612	9.967	0.153
2011.39	55705.00	0.225	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2011.39	55705.00	1.462	-0.010	0.113	0.113	-5.313	0.045
2011.39	55705.00	0.365	0.012	0.257	0.258	2.775	0.133
2011.39	55705.00	0.049	0.094	0.619	0.626	8.669	0.155
2011.44	55725.00	0.946	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2011.44	55725.00	0.858	-0.011	0.107	0.108	-5.874	0.062
2011.44	55725.00	0.118	0.048	0.312	0.315	8.672	0.098
2011.44	55725.00	0.023	0.091	1.100	1.103	4.730	0.270
2011.44	55725.00	0.025	0.127	0.584	0.598	12.228	0.000
2011.55	55764.00	0.850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036
2011.55	55764.00	0.725	-0.018	0.133	0.135	-7.883	0.057
2011.55	55764.00	0.112	0.048	0.284	0.288	9.586	0.123
2011.55	55764.00	0.035	0.110	0.616	0.625	10.130	0.165
2011.64	55797.00	0.593	0.000	0.000	0.000	0.000	0.044
2011.64	55797.00	0.791	-0.012	0.181	0.181	-3.659	0.066
2011.64	55797.00	0.054	0.101	0.553	0.562	10.310	0.125
2011.64	55797.00	0.010	0.215	1.078	1.099	11.291	0.312

Продолжение таб.Г.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2011.64	55797.00	0.009	0.222	0.295	0.370	36.948	0.000
2011.64	55797.00	0.005	0.497	2.198	2.254	12.729	0.317
2011.71	55821.00	0.638	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049
2011.71	55821.00	0.129	0.017	0.308	0.309	3.182	0.117
2011.71	55821.00	0.547	-0.024	0.193	0.195	-7.183	0.056
2011.71	55821.00	0.035	0.112	0.630	0.640	10.075	0.190
2011.79	55851.00	0.433	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
2011.79	55851.00	0.767	-0.026	0.129	0.132	-11.372	0.062
2011.79	55851.00	0.473	-0.046	0.339	0.342	-7.678	0.062
2011.79	55851.00	0.024	0.105	0.262	0.282	21.759	0.056
2011.79	55851.00	0.008	-0.361	0.492	0.611	-36.275	0.000
2011.79	55851.00	0.052	0.033	0.434	0.435	4.410	0.093
2011.79	55851.00	0.054	0.105	0.733	0.740	8.188	0.248
2011.92	55898.00	0.712	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028
2011.92	55898.00	0.284	-0.032	0.142	0.145	-12.656	0.076
2011.92	55898.00	0.282	-0.042	0.360	0.362	-6.739	0.073
2011.92	55898.00	0.041	0.084	0.537	0.544	8.845	0.156
2011.92	55898.00	0.006	0.125	0.838	0.847	8.500	0.000
2011.92	55898.00	0.003	0.173	1.124	1.137	8.744	0.093
2012.07	55954.00	0.537	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
2012.07	55954.00	0.340	-0.023	0.146	0.147	-8.918	0.079
2012.07	55954.00	0.239	-0.056	0.429	0.432	-7.409	0.069
2012.07	55954.00	0.056	0.042	0.566	0.568	4.193	0.164
2012.07	55954.00	0.008	0.120	1.067	1.073	6.436	0.100
2012.17	55992.00	0.791	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047
2012.17	55992.00	0.419	-0.017	0.177	0.178	-5.468	0.109
2012.17	55992.00	0.315	-0.064	0.478	0.482	-7.688	0.101
2012.17	55992.00	0.064	0.073	0.714	0.718	5.835	0.245
2012.25	56021.00	0.691	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
2012.25	56021.00	0.257	-0.014	0.168	0.169	-4.876	0.071

Продолжение таб.Г.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2012.25	56021.00	0.157	-0.075	0.447	0.454	-9.473	0.095
2012.25	56021.00	0.149	-0.060	0.585	0.588	-5.827	0.099
2012.40	56074.00	0.815	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045
2012.40	56074.00	0.198	-0.007	0.209	0.209	-1.908	0.101
2012.40	56074.00	0.308	-0.068	0.564	0.568	-6.833	0.135
2012.40	56074.00	0.022	0.018	0.814	0.815	1.279	0.000
2012.51	56113.00	0.755	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
2012.51	56113.00	0.272	-0.017	0.147	0.148	-6.538	0.064
2012.51	56113.00	0.104	-0.040	0.459	0.461	-4.933	0.114
2012.51	56113.00	0.148	-0.088	0.636	0.642	-7.855	0.068
2012.51	56113.00	0.057	-0.031	0.769	0.770	-2.333	0.148
2012.61	56153.00	0.613	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040
2012.61	56153.00	0.221	-0.008	0.160	0.161	-2.818	0.070
2012.61	56153.00	0.084	-0.033	0.478	0.479	-3.945	0.144
2012.61	56153.00	0.141	-0.086	0.698	0.703	-6.989	0.098
2012.61	56153.00	0.033	0.028	0.850	0.851	1.876	0.249
2012.82	56229.00	0.981	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
2012.82	56229.00	0.250	-0.008	0.188	0.189	-2.367	0.081
2012.82	56229.00	0.095	-0.031	0.545	0.546	-3.281	0.147
2012.82	56229.00	0.179	-0.071	0.849	0.852	-4.779	0.150
2012.97	56284.00	1.343	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041
2012.97	56284.00	0.206	-0.027	0.197	0.199	-7.713	0.091
2012.97	56284.00	0.078	-0.035	0.577	0.578	-3.494	0.110
2012.97	56284.00	0.199	-0.084	0.925	0.929	-5.161	0.146
2013.04	56308.00	0.965	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036
2013.04	56308.00	0.200	-0.002	0.160	0.160	-0.747	0.059
2013.04	56308.00	0.081	-0.022	0.454	0.455	-2.769	0.132
2013.04	56308.00	0.128	-0.090	1.008	1.012	-5.110	0.132
2013.04	56308.00	0.077	-0.046	0.782	0.783	-3.385	0.146
2013.15	56350.00	0.317	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015

Продолжение таб.Г.1

Date	MJD	Flux	X	Y	Radius	Theta	Size
2013.15	56350.00	0.977	0.004	0.099	0.099	2.137	0.059
2013.15	56350.00	0.379	-0.024	0.292	0.293	-4.743	0.077
2013.15	56350.00	0.153	-0.088	1.145	1.148	-4.404	0.133
2013.15	56350.00	0.158	-0.041	0.943	0.944	-2.499	0.171
2013.15	56350.00	0.095	-0.026	0.589	0.589	-2.486	0.159
2013.29	56400.00	0.380	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
2013.29	56400.00	0.432	-0.000	0.115	0.115	-0.091	0.071
2013.29	56400.00	0.253	-0.028	0.359	0.360	-4.452	0.058
2013.29	56400.00	0.064	-0.099	1.236	1.240	-4.580	0.124
2013.29	56400.00	0.145	-0.046	1.042	1.043	-2.520	0.175
2013.29	56400.00	0.054	-0.022	0.674	0.674	-1.884	0.132
2013.41	56443.00	0.550	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026
2013.41	56443.00	0.301	0.006	0.141	0.141	2.395	0.066
2013.41	56443.00	0.227	-0.028	0.423	0.424	-3.735	0.052
2013.41	56443.00	0.100	-0.076	1.240	1.242	-3.495	0.141
2013.41	56443.00	0.091	-0.036	1.012	1.013	-2.042	0.186
2013.41	56443.00	0.052	-0.043	0.632	0.633	-3.869	0.174
2013.49	56474.00	0.951	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034
2013.49	56474.00	0.166	-0.004	0.209	0.209	-1.232	0.071
2013.49	56474.00	0.228	-0.034	0.458	0.459	-4.215	0.060
2013.49	56474.00	0.126	-0.080	1.249	1.251	-3.668	0.158
2013.49	56474.00	0.046	-0.023	1.006	1.006	-1.316	0.154
2013.49	56474.00	0.064	-0.062	0.683	0.686	-5.182	0.139

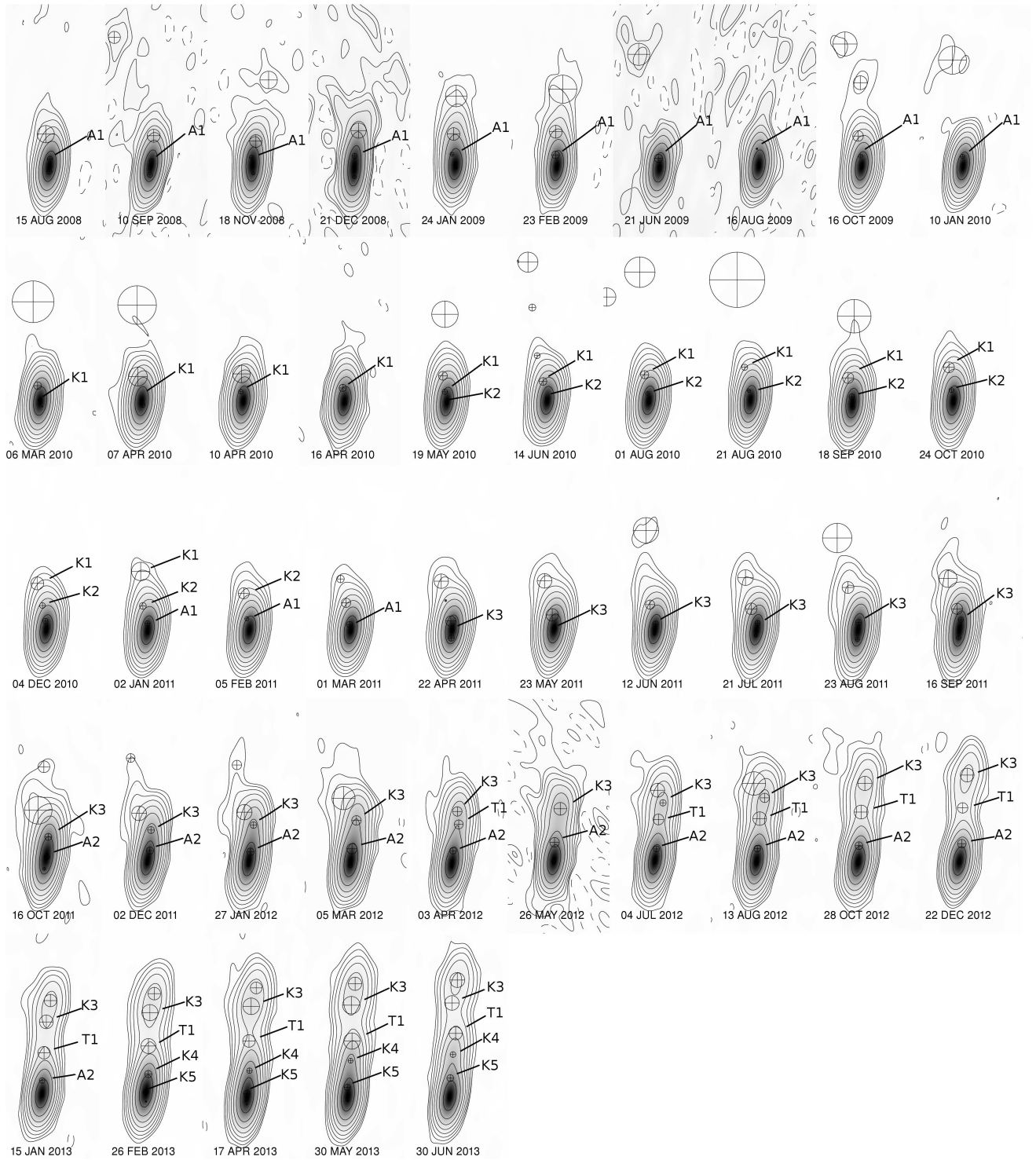


Рис. Г.1. Изображения в полном потоке с наложенным движением компонент для всех эпох. Контуры соответствуют 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 % от пиковой интенсивности, главный лепесток диаграммы направленности $0.36 \times 0.16, -10^\circ$.

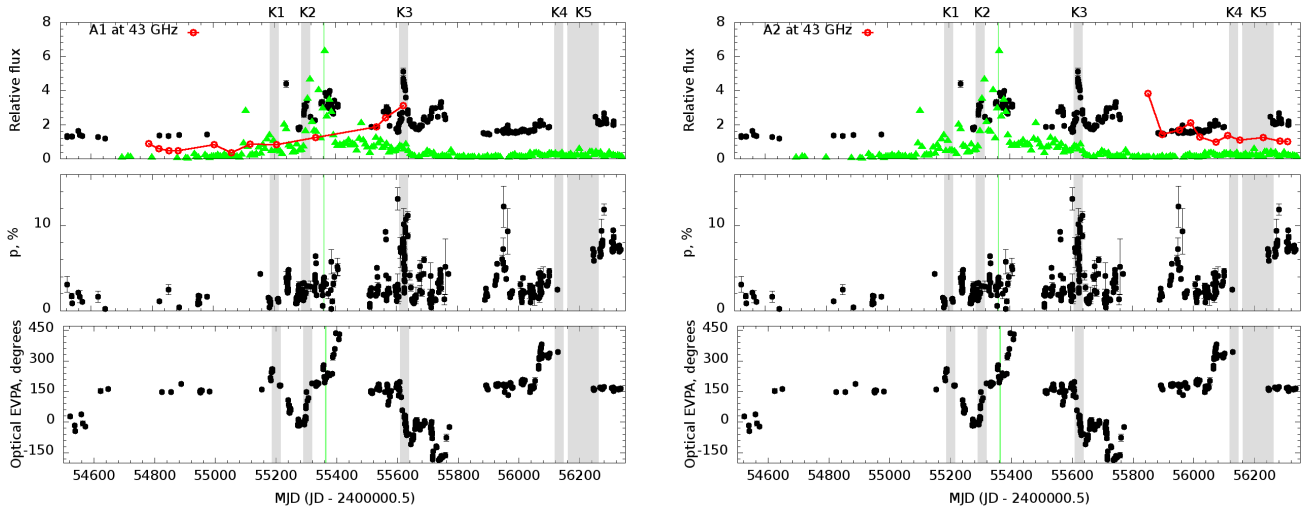


Рис. Г.2. Сверху вниз: оптическая кривая блеска (полоса R) с наложенной кривой блеска в гамма-диапазоне и кривой компоненты A1 (слева) и компоненты A2 (справа) на частоте 43 ГГц ; кривая уровня оптической поляризации с наложенной кривой уровня поляризации на частоте 43 ГГц; позиционный угол оптической поляризации с наложенным позиционным углом поляризации радиоядра на частоте 43 ГГц

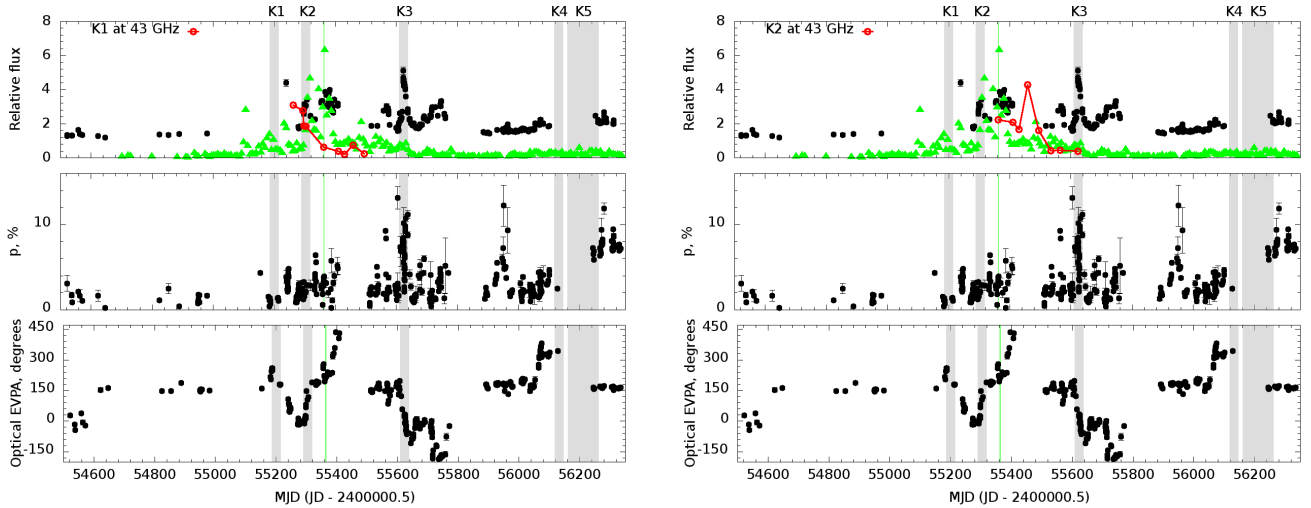


Рис. Г.3. Оптическая кривая блеска в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

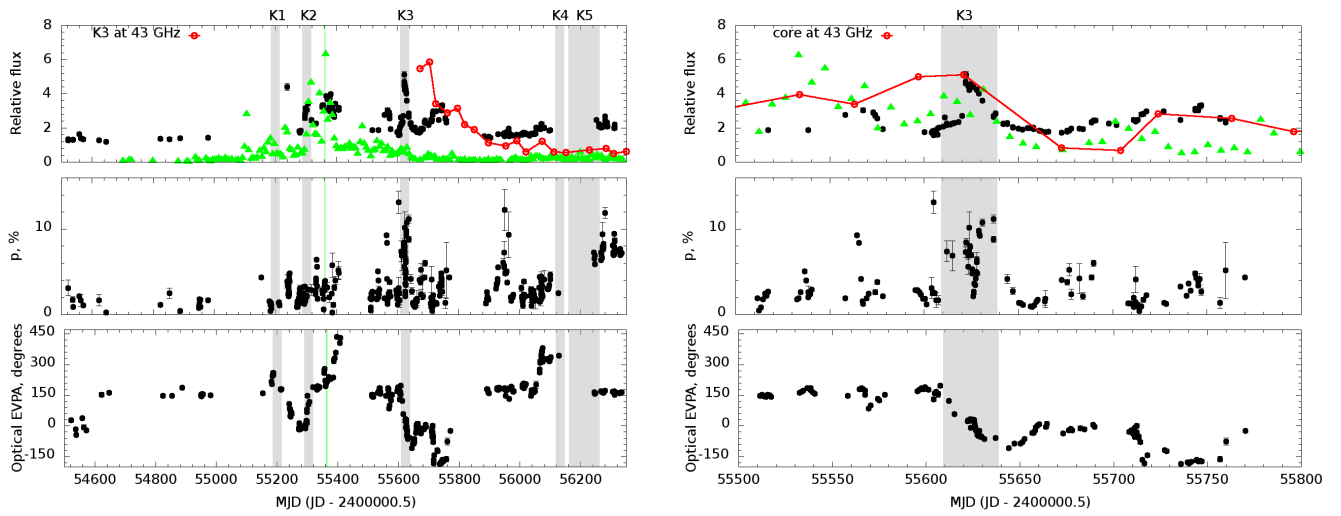


Рис. Г.4. Оптическая кривая блеска в полосе R с наложенными гамма-кривой блеска и кривой блеска на частоте 43 ГГц и кривые оптических поляризационных параметров.

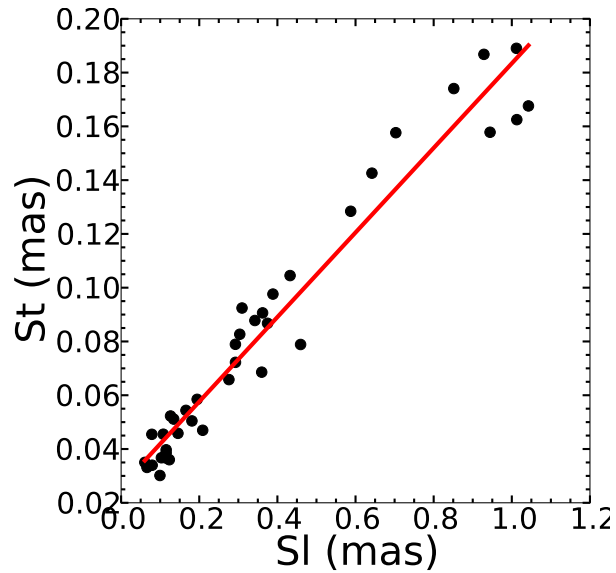


Рис. Г.5. Соотношение между видимым размером s_t джета и видимым расстоянием по длине s_l компонент для объекта PKS 1222+216