

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

На правах рукописи
УДК 524.7-1/-8

Лисаков Михаил Михайлович

Исследование вспышечной активности квазара
3С 273 на наземных и космических телескопах

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная
астрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН)

Научный руководитель:

Ковалев Юрий Юрьевич, чл.-корр. РАН, профессор РАН доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией внегалактической радиоастрономии АКЦ ФИАН.

Официальные оппоненты:

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

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

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Защита состоится xx xxxxxx 2017 года в xx:xx на заседании Диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

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

Автореферат разослан xx xxxx 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ковалев Ю. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Несмотря на то, что открытие квазаров, как внегалактических радиоисточников, отметило свой 50-летний юбилей [1], этот класс объектов всё ещё преподносит сюрпризы. Так, например, после запуска космической обсерватории *Fermi* с широкоугольным гамма-телескопом LAT [2] на борту выяснилось, что сотни квазаров являются очень сильными и переменными объектами в гамма-диапазоне [3, 4], а из наблюдений на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон [5] стало ясно, что в квазарах существуют настолько компактные детали, что их можно наблюдать на интерферометрических базах вплоть до 200 000 км [A3], [A6].

Широкополосный спектр квазаров имеет характерный вид с двумя широкими горбами [6, 7]: низкочастотный объясняется синхротронным излучением электронов, а высокочастотный обычно приписывается обратному комптоновскому рассеянию низкоэнергичных затравочных фотонов на релятивистских электронах. Источниками таких фотонов могут быть собственные синхротронные фотоны струи, реликтовое излучение, фотоны от аккреционного диска, тора и области широких эмиссионных линий. Доминирующий источник фотонов определяется тем, в какой области генерируется высокочастотное излучение. Однако, на вопрос об области образования гамма-излучения до сих пор нет однозначного ответа. Существует по крайней мере 2 возможных сценария. Во-первых, гамма-излучение может образовываться вблизи центральной чёрной дыры [8, 9, 10], [A1]. В пользу этой возможности говорят быстрая переменность и спектр гамма-излучения [10, 11], а также задержка радио-излучения относительно гамма [9, 12, 13]. Очевидным преимуществом такого сценария является наличие большого количества затравочных фотонов от аккреционного диска [14] или области широких эмиссионных линий [15]. В то же время, модели области широких эмиссионных линий предполагают, что в данном сценарии гамма-фотоны с энергией выше ~ 20 ГэВ должны полностью поглощаться [16, 17, 18]. Тем не менее, от некоторых источников такие высокоэнергичные фотоны всё же были обнаружены [19, 20].

Другой сценарий предполагает, что гамма-излучение образуется в областях, лежащих ниже по струе и уже прозрачных для радиоизлучения — в видимом начале струи или даже ниже [21, 22, 23, 24, 25]. В этом случае легко объяснить появление фотонов с экстремально высокими энергиями, зато приходится вводить некоторые предположения о поперечной структуре струи [26] для того, чтобы объяснить быструю переменность. Кроме того, в областях, далёких от центральной чёрной дыры гораздо меньше внешних низкоэнергичных фотонов, необходимых для обратного комптоновского рассеяния.

Совместное использование РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) данных и мониторинга в гамма-диапазоне позволяет ответить на важные вопросы о формировании высокоэнергетичного излучения, локализации области гамма-излучения в структуре струи на парсековых масштабах и определить, какой наиболее вероятный источник затравочных фотоном для обратного комптоновского рассеяния. Особенно эффективно использовать совместно данные РСБД мониторинга на высоких частотах, чтобы следить за изменениями потока и структуры источника, а также многочастотные РСДБ данные, чтобы по смещению видимого начала струи оценить расстояние от видимого начала струи до её истоков вблизи центральной чёрной дыры.

Подробное исследование вспышек позволяет изучать релятивистские струи в экстремальных условиях. Считается, что типичные внутренние яркостные температуры в ядрах квазаров имеют верхний предел $10^{11.5}$ К [27, 28], связанный с быстрыми потерями энергии на обратное комптоновское рассеяние, т.н. “Комптоновская катастрофа”. В то же время, при условии равнораспределения плотности энергии между частицами и магнитным полем яркостная температура в системе отсчёта излучающей плазмы должна стремиться к характерному значению $10^{10.5}$ К [28]. Максимальная яркостная температура, которая может быть измерена с помощью РСДБ, зависит от максимальной длины проекции базы, выраженной в физических единицах [29], и для размеров Земли ограничена $\sim 10^{12}$ К в типичных наблюдениях. Поэтому только увеличив длину проекции базы можно в проекте наземно-космического интерферометра РадиоАстрон проекции базы могут достигать 350 000 км, что

позволяет измерять яркостные температуры вплоть до 10^{15} К.

Цель работы

Целью представленной диссертации является определение физических параметров струи, установление их зависимости от активности в широком диапазоне электромагнитного спектра, исследование механизма генерации гамма-излучения, а также проверка предсказаний модели синхротронного излучения релятивистских электронов на примере архетипического квазара 3C 273. Конкретными целями работы являются:

- локализация области генерации гамма-излучения в струе 3C 273. В частности, одной из целей работы было проверить, лежит ли область генерации гамма излучения вблизи истоков струи или ниже по течению относительно видимого начала струи на длине волны 7 мм;
- установление зависимости параметров начала струи от времени в течение мощной вспышки, а именно, свойств синхротронного самопоглощения, напряжённости магнитного поля, плотности частиц, а также яркостной температуры;
- проверка корректности описания видимого начала струи областью с оптической толщиной для радиоизлучения $\tau \approx 1$;
- проверка предположения о равномерном распределении плотностей энергии магнитного поля и частиц. Тестирование возможностей существенного и продолжительного превышения яркостной температуры над предельным значением, предсказанным в модели синхротронного излучения релятивистских электронов и предполагающим катастрофические потери энергии электронов на обратное комптоновское рассеяние.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Область гамма-излучения 3C 273 локализована вблизи истинного начала релятивистской струи, на расстоянии 2 – 7 пк выше по течению струи относительно видимого начала на длине волны 7 мм. Это указывает на значительный вклад низкоэнергичных фотонов от аккреционного диска, тора или об-

ласти широких эмиссионных линий в гамма-излучение при обратном комптоновском рассеянии на релятивистских электронах. Самые мощные вспышки в гамма- и радиодиапазонах ассоциированы с одним возмущением, распространяющимся вниз по релятивистской племзе струи. Измерено смещение видимого начала струи на 4.4 пк во время вспышки на длине волны 7 мм.

2. Обнаружено нарушение предсказанного предела, связанного с катастрофическими потерями энергии электронов на обратное комптоновское рассеяние. Существующая модель излучения релятивистских струй требует пересмотра, чтобы объяснить наблюдаемые яркостные температуры компактной детали в струе 3C 273, которые превышают 10^{13} К на протяжении по крайней мере нескольких месяцев. Показано, что равномерное распределение между плотностями энергии частиц и магнитного поля однозначно нарушается. Для повышенных значений плотности частиц оценена напряжённость магнитного поля $B \lesssim 0.1$ Гс в видимом начале струи. Прямая и косвенная оценка видимой скорости движения плазмы в струе на уровне $8c - 12c$ не подтверждает экстремально высокого релятивистского усиления, необходимого для объяснения наблюдаемой экстремальной яркости 3C 273.
3. В наблюдениях на длине волны 18 см с РадиоАстроном обнаружена субструктура рефракционного рассеяния – впервые для внегалактического источника. Показано, что с учётом субструктуры рассеяния яркостная температура на длине волны 18 см не может быть существенно ниже 7×10^{12} К.
4. Показано, что область перехода от оптически-толстого к оптически-тонкому излучению в 3C 273 имеет протяжённость 7 пк вдоль струи для частот 43–24 ГГц. В протяжённой структуре струи на масштабах десятков угловых миллисекунд измерено укрупнение спектра 0.001 пк $^{-1}$ с расстоянием вдоль струи, одинаковое на частотах 15–8 ГГц и 8–5 ГГц, что говорит в пользу доминирования адиабатических потерь над радиационными в этой области.

Научная новизна и практическая значимость работы

В диссертации использованы данные, полученные с помощью уникального

наземно-космического интерферометра РадиоАстрон [5]. Обращаясь по орбите с высотой апогея ~ 350000 км, РадиоАстрон позволяет достичь углового разрешения вплоть до 7 микросекунд дуги. Благодаря этому на длинах волн 1.35, 6 и 18 см в компактной детали струи ЗС 273 были обнаружены экстремальные яркостные температуры, которые поддерживались на уровне $\gtrsim 10^{13}$ К по крайней мере на протяжении нескольких месяцев. С этим выводом согласуются результаты анализа яркостной температуры по наземным наблюдениям на длине волны 7 мм. Измеренные значения более чем на два порядка превосходят значения, характерные для равномерного распределения плотностей энергии магнитного поля и частиц. В этом случае плотность энергии частиц должна доминировать. Длительное превышение наблюдаемой яркостной температуры над пределом “Комптовской катастрофы” требует пересмотра модели излучения струй, как некогерентного синхротронного излучения релятивистских электронов. Кроме того, впервые с высокой вероятностью была обнаружена субструктура рассеяния излучения протяжённого внегалактического источника на межзвёздной среде, которая может приводить к ошибочной интерпретации детектирования интерференционного сигнала на наземно-космических базах, как истинного излучения источника, на длинах волн больше 6 см. Результаты, полученные для источника ЗС 273, могут быть обобщены и использованы для квазаров, как класса.

Один из открытых фундаментальных вопросов физики релятивистских выбросов в активных галактических ядрах – связь излучения в разных диапазонах электромагнитного спектра. Выбор между моделями генерации высокоэнергетичного излучения зависит от того, из которой части струи это излучение приходит. Данная работа позволяет ответить на вопрос о локализации области гамма-излучения в парсековой структуре релятивистского выброса на примере близкого квазара, а также указать наиболее вероятные источники затравочных фотонов, участвующих в обратном комптоновском рассеянии. Методами многочастотного РСДБ такой анализ для ЗС 273 проводится впервые.

С помощью разработанного диссертантом метода измерения параметров

кинематики по группе компонент впервые удалось измерить значимое видимое смещение положения ядра во время вспышки, используя данные наблюдений без привязки абсолютного значения фазы, что может существенно упростить обнаружение данного эффекта в других источниках. Впервые измерена протяжённость области, в которой происходит просветление вещества струи для радиоизлучения вблизи видимого начала релятивистской струи. Кроме того, скорость видимого движения вещества струи была независимо измерена по последовательным вспышкам в стационарных деталях струи ЗС 273 на длине волны 7 мм. Оценённая таким образом скорость оказалась в 1.5 раза выше видимой скорости движения компонент, что может указывать на недооценку величины релятивистского усиления.

По результатам юстировочных наблюдений КРТ была обнаружена систематическая погрешность наведения КРТ, равная 2.5'. Коррекция этого отклонения в виде постоянной поправки ко всем последующим наведениям КРТ позволила повысить чувствительность интерферометра РадиоАстрон в 1.5 раза на длине волны 1.35 см. Было показано, что построение ориентации по звёздным датчикам происходит с точностью лучше 1.5'' и не зависит от количества используемых астродатчиков, а поддержание ориентации сохраняется на уровне 0.2'' за время типичного интерферометрического наблюдения.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах и отчетных сессиях Астрокосмического Центра ФИАН, а также на следующих научных мероприятиях:

- *Всероссийская астрономическая конференция «От эпохи Галилея до наших дней»*, САО РАН, п. Нижний Архыз, 13–18 сентября 2010,
- *Симпозиум Ферми (Fermi Symposium)*, Рим, Италия, 9-12 мая 2011,
- *XXVIII конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии»*, ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, 19–21 апреля 2011 г.,

- XXIX конференция, «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, 17–19 апреля 2012 г.,
- 11-й Симпозиум европейской РСДБ сети (11th European VLBI Network Symposium), Бордо, Франция, 2012,
- Конференция «Самые внутренние области релятивистских струй и их магнитные поля» («The Innermost Regions of Relativistic Jets and Their Magnetic Fields»), Гранада, Испания, 10-14 июня 2013,
- Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная», Санкт-Петербург, 23-27 сентября 2013,
- 43-я конференция молодых европейских радиоастрономов (Young European Radioastronomers Conference), Билефельд, Германия, 2013,
- Симпозиум Международного астрономического союза (IAU Symposium), Галапагосские острова, Эквадор, 2015,
- Конференция «Рассекая Вселенную» (Dissecting Universe), Бонн, Германия, 2015,
- 13-й Симпозиум европейской РСДБ сети (13th European VLBI Network Symposium), Санкт-Петербург, 2016,
- 46-я конференция молодых европейских радиоастрономов (Young European Radioastronomers Conference), Бонн, Германия, 2016.

Публикации по теме диссертации: Все результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Всего имеется XXX научных публикаций, в том числе 6 статей А1–А6 с основными результатами, выносимыми на защиту, в журналах, входящих в список Web of Science Core Collection и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Министерстве образования и науки РФ. Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1** Lisakov, M. M. and Kovalev, Y. Y. and Savolainen, T. and Hovatta, T. and Kutkin, A. M., A connection between gamma-ray and parsec-scale radio flares in the blazar 3C 273, MNRAS, 468, 4478-4493 (2017)
- A2** Johnson, M. D., Kovalev, Y. Y., Gwinn, C. R., Gurvits, L. I., Narayan, R., Macquart, J.-P., Jauncey, D. L., Voitsik, P. A., Anderson, J. M., Sokolovsky, K. V., and Lisakov, M. M., Extreme Brightness Temperatures and Refractive Substructure in 3C273 with RadioAstron, ApJ, 820, L10, 6 страниц (2016)
- A3** Kovalev, Y. Y., Kardashev, N. S., Kellermann, K. I., Lobanov, A. P., Johnson, M. D., Gurvits, L. I., Voitsik, P. A., Zensus, J. A., Anderson, J. M., Bach, U., Jauncey, D. L., Ghigo, F., Ghosh, T., Kraus, A., Kovalev, Yu. A., Lisakov, M. M., Petrov, L. Yu., Romney, J. D., Salter, C. J., and Sokolovsky, K. V., RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit, ApJ, 820, L9, 6 страниц (2016)
- A4** Лисаков М. М., Войнаков С. М., Сыров А. С., Соколов В. Н., Добрынин Д. А., Шатский М. А., Камальдинова Р. А., Сосновцев В.В., Рябогин Н. В., Вьюнитская Т. Б., Филиппова Е. Н., Работа системы ориентации космического аппарата “СПЕКТР-Р”, Космические исследования, 52, 399-407 (2014)
- A5** Ковалев Ю. А., Васильков В. И., Попов М. В., Согласнов В. А., Войцик П. А. Лисаков М. М., Кутькин А. М., Николаев Н. Я., Нижельский Н. А., Жеканис Г. В., Цыбулев П. Г., Проект “РАДИОАСТРОН”. Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011-2013 ГГ., Космические исследования, 52, 430-439 (2014)
- A6** Кардашев Н. С., Алакоз А. В., (всего 39 соавторов, включая Лисакова М. М.), РадиоАстрон: итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета, Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 4-24 (2016)

Личный вклад автора

Все работы представляют собой результаты и анализ наблюдений, выполне-

ны в соавторстве. Во всех работах вклад диссертанта – основной или равный вкладу других соавторов и включает участие в постановке задачи, выборе источников, сборе и систематизации наблюдательных данных, разработке программного обеспечения, обсуждении, формулировании выводов и подготовке публикаций. В работах **A1, A2, A3, A6** диссертант также принимал участие в моделировании структуры струи 3C 273, анализе кинематики компонент, построении и анализе карт спектрального индекса, проведении моделирования и расчетов параметров источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения, содержит XXX таблицы, XXX рисунков и библиографический список из XXX наименований. Общий объем рукописи составляет XXX страниц.

Во введении приведено общее описание работы, отражены основные современные представления о релятивистских струях в квазарах, а также перечислены основные открытые вопросы. Обсуждаются механизмы генерации высокоэнергичного излучения, локализация излучающих областей в парсековой структуре релятивистских выбросов, а также приводится описание исследуемого квазара 3C 273. Особое место во введении уделено описанию целей работы, полученных научных результатов, а также степени их достоверности – приведён список опубликованных работ и докладов на научных конференциях.

Первая глава посвящена описанию наблюдательных данных, использованных в работе. Наблюдения в гамма-диапазоне получены с помощью телескопа LAT на борту космической гамма-обсерватории Fermi. Мы использовали адаптивное усреднение данных в гамма-диапазоне [30], чтобы ошибки каждой результирующей точки были бы одинаковыми и равными 20 %. Такой подход позволил получить кривую блеска с одинаковыми ошибками всех точек и лучшей скважностью во время вспышек, когда отношение сигнала к шуму было выше. Типичная скважность измерений составила ~ 10 часов во время мощных вспышек и несколько дней в спокойные периоды.

Многочастотные РСДБ наблюдения проведены на системе апертурного

синтеза VLBA (Very Long Baseline Array – Антенная решётка со сверхдлинными базами) в пяти частотных полосах: 6, 4, 2, 1.3 и 0.7 см. При обработке данных был применён двухэтапный подход, позволивший улучшить точность амплитудной калибровки [31]. На первом этапе в результате гибридного картографирования определялись поправки амплитудной калибровки для каждого телескопа. Поправки применялись к данным, если их величина превышала 10 %. После применения поправок снова проводилось гибридное картографирование. Описанная процедура позволила уменьшить ошибки калибровки плотности потока до 10 % в диапазонах 1.3 и 0.7 см и до 5 % в остальных. Кроме того для улучшения частотного покрытия диапазоны 6 см и 4 см были разбиты на 2 поддиапазона каждый, так что итоговые данные содержали независимые измерения на 7 частотах. Всего было проанализировано 4 многочастотных VLBA наблюдений, проведённых в течение полугода после вспышки в гамма-диапазоне: с 28 августа 2009 до 26 января 2010. Для изучения кинематики струи 3C 273 были использованы данные РСДБ мониторинга на 7 мм с 2008 по 2014 годы, полученные группой Бостонского университета¹, анализ которых был проведён диссертантом.

Также в первой главе приведено описание данных, полученных с помощью наземно-космического интерферометра РадиоАстрон. Наблюдения 3C 273 на базах между космическим радиотелескопом (КРТ) и наземными телескопами (телескоп Грин Бэнк 110 м, телескоп Эффельсберг 100 м, Аресибо 305 м, фазированная система апертурного синтеза VLA) были проведены на рубеже 2012–2013 годов. Интерференционные лепестки были протестированы на всех использованных длинах волн, 1.35, 6 и 18 см, на базах вплоть до 170 000 км. Калибровка амплитуды интерференционного сигнала на наземно-космических базах была проведена с использованием измерений параметров КРТ в наблюдениях за период 2011–2013 гг [32], [A5]. В первой главе также приводятся результаты анализа точности наведения КРТ на источник и работы системы стабилизации. Во время юстировочных наблюдений было обнаружено отклонение максимума чувствительности диаграммы направленности

¹<http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>

КРТ от номинального положения на $2.5'$. Это отклонение было скомпенсировано с 2012 года, что позволило повысить чувствительность КРТ в ~ 2 раза [32], [A4] ($\sim \sqrt{2}$ раза в интерферометрическом режиме). По результатам интерферометрических наблюдений было показано, что точность наведения КРТ на источник находится на уровне $0.2''$, лучше заявленной. При этом не обнаружено зависимости от количества звёздных датчиков, используемых для построения ориентации. Заданная ориентация КРТ во время интерферометрических наблюдений продолжительностью 1 час поддерживается на уровне лучше $1.5''$.

Вторая глава посвящена определению положения области генерации гамма-излучения в парсековой структуре струи 3C 273 [A1], а также исследованию вспышки на радиочастотах. В этой главе использованы три типа анализа данных, необходимых для решения поставленной задачи: кросс-корреляция кривых блеска гамма-излучения и плотности потока отдельных компонент модели, изучение кинематики компонент, а также измерение сдвига видимого начала струи с частотой. Кросс-корреляция, совместно с анализом видимого положения ядра, позволяет оценить положение области гамма-излучения не только относительно области радиоизлучения, но и относительно истинного начала релятивистской струи.

Была обнаружена задержка между вспышками в гамма-диапазоне и в видимом ядре на длине волны 7 мм. В работе показано, что такая задержка не может быть объяснена исключительно различными размерами излучающих областей. Естественным объяснением наличия задержки может быть следующее: гамма-излучение генерируется некоторым возмущением в областях струи, непрозрачных для радиоизлучения. Возмущение движется по направлению струи со скоростью βc , близкой к скорости света. Как только возмущение достигает области с оптической толщиной для радиоизлучения $\tau \approx 1$, плотность потока видимого начала струи увеличивается. Из-за того, что скорость βc меньше скорости света, а также из-за наклона струи к лучу зрения возникает задержка между вспышками в гамма и радиодиапазонах [9].

В стационарном джете [33] видимое начало релятивистской струи на раз-

ных частотах расположено на разном расстоянии от истинных истоков струи. Этот эффект называется сдвигом ядра с частотой и, в предположении, что видимое начало струи – это поверхность единичной оптической толщи, объясняется зависимостью поглощения излучения веществом струи от частоты [34, 35]. Измерения сдвига ядра для широкого диапазона частот позволяют в предположении равномерного распределения плотности энергии частиц и магнитного поля определить напряжённость магнитного поля, плотность частиц, а также расстояние от видимого начала струи до истоков джета [35].

Также во второй главе предложен метод оценки скорости движения видимого начала струи. Смещение ядра измеряется относительно кластеров, состоящих из 2–6 компонент. Это делает оценки положения более устойчивыми к малым изменениям структуры кластера и инструментальным эффектам. По результатам анализа кинематики двух независимых кластеров на длине волны 7 мм, расположенных на расстоянии 2 мсек дуги друг от друга, было обнаружено смещение видимого начала струи на 4.4 пк за 5 месяцев. Более того, была обнаружена корреляция с плотностью потока ядра: чем она выше, тем ядро располагается ниже по струе. Такое поведение может быть объяснено тем, что повышенная плотность электронов, вызывающая увеличение плотности потока ядра на длине волны 7 мм, также приводит к увеличению непрозрачности вещества струи так, что просветление до $\tau \sim 1$ происходит ниже по течению.

Измеренные величины сдвига ядра, а также данные кросс-корреляции гамма и радио кривых блеска позволяют с уверенностью утверждать, что область гамма-излучения в 3С 273 лежит на 2 – 7 пк выше по струе от видимого ядра на длине волны 7 мм, вблизи истинного начала релятивистской струи.

В описанной выше схеме можно ожидать, что после вспышек в гамма и радиодиапазонах в парсековой структуре выброса может появиться компонента – уярчение,двигающееся вниз по струе [23, 36]. В анализируемый период 2008–2012 гг. в структуре струи появилось 6 новых компонент. Мы провели анализ кинематики для этих компонент с целью определения времени пролёта их через видимое начало струи. Для одной из компонент время пролёта через ядро совпало с пиком вспышки на длине волны 7 мм. Таким образом

можно связать эту компоненту как с радиовспышкой в ядре на длине волны 7 мм, так и с предшествующей гамма-вспышкой.

Представленная картина подтверждается анализом быстрой переменности гамма-излучения [37], наличием излома спектра в гамма-диапазоне [37, 17], а также, ввиду лучшего углового разрешения, позволяет уточнить результаты многочастотных наблюдений в радиодиапазоне на одиночных антеннах [13, 11]. Локализация области гамма-излучения вблизи истоков струи указывает на доминирующий вклад в обратное комптоновское рассеяние затрафочных фотонов от аккреционного диска, тора и области широких эмиссионных линий.

Третья глава посвящена анализу яркостной температуры компактных областей квазара 3C 273 по результатам интерферометрических наблюдений с наземными и наземно-космическими базами. Наземные измерения были проведены на длине волны 7 мм и охватывают период с 2008 по 2014 годы [A1]. Наземно-космические данные получены с помощью космического телескопа РадиоАстрон совместно с крупнейшими наземными телескопами на длинах волн 1.3, 6 и 18 см [A3].

Яркостная температура зависит от соотношения плотности энергии частиц и магнитного поля и может быть ключом к пониманию физики релятивистских струй. Теоретические модели некогерентного синхротронного излучения электронов в релятивистских джетах активных галактик предсказывают, что существует предел $10^{11.5}$ К на яркостную температуру в системе отсчёта излучающей плазмы [27, 28], обусловленный катастрофическими потерями энергии электронов в процессе обратного комптоновского рассеяния. Во время вспышек яркостная температура может кратковременно (на время от нескольких часов до нескольких суток) повышаться [38, 28]. Интересно, что размер Земли и типичные чувствительности, достигаемые в наземных РСДБ наблюдениях не позволяли детектировать яркостные температуры существенно выше 10^{12} К. Космическая обсерватория РадиоАстрон [5] может проводить наблюдения на базах до 28 диаметров Земли, что позволяет детектировать яркостные температуры вплоть до 10^{15} К.

Было обнаружено, что во время мощной вспышки в ядре 3C 273 на длине волны 7 мм яркостная температура поднимается по крайней мере до 10^{13} К [A1]. В то же время на наземно-космических базах с РадиоАстроном яркостные температуры выше 10^{13} К были обнаружены и вне каких-либо вспышек [A3]. Важно отметить, что экстремальные яркостные температуры поддерживались на уровне $> 5 \times 10^{12}$ К на протяжении нескольких месяцев, что сложно объяснить в рамках некогерентного синхротронного излучения электронов, как основного механизма излучения струй в радиодиапазоне. Типичное релятивистское усиление [39, 40, 41] в 3–60 раз меньше, чем необходимо для объяснения превышения измеренных значений яркостных температур над пределом комптоновской катастрофы. Ввиду наличия двух стационарных компонент в структуре струи на длине волны 7 мм, оказалось возможным измерить видимую скорость движения плазмы по пикам последовательных вспышек в стационарных деталях. Оценка видимой скорости оказалась $12c$, что в 1.5 раза выше скорости, оценённой по кинематике и может говорить о систематической недооценке величины релятивистского усиления. Тем не менее, такая величина релятивистского усиления всё равно недостаточна для объяснения экстремальных яркостных температур, наблюдавшихся в 3C 273. Сценарий постоянной инжекции релятивистских электронов в начале струи должен был бы приводить к постоянному уровню гамма-излучения [28], более высокому, чем наблюдаемый [37]. Для синхротронного излучения протонов требуются напряжённости магнитного поля $B > 10$ Гс. Наблюдательного подтверждения наличия такого сильного магнитного поля в 3C 273 нет. Также не имеется наблюдательных подтверждений наличия когерентного излучения или отклонения от теоретически предсказанного степенного спектра энергий электронов. Таким образом, текущее представление о физике излучения релятивистских электронов в выбросе квазара 3C 273 не может объяснить наблюдательные данные и должно быть пересмотрено.

Изучение смещения видимого начала струи с частотой позволяет определить важные физические параметры выброса: магнитное поле и плотность частиц. Однако, для этого необходимо вводить дополнительное предположе-

ние о соотношении между плотностями энергии частиц и магнитного поля. Обычно в случае стационарного выброса предполагается их равенство. Измерения яркостной температуры показали, что только во время первого из наших четырёх многочастотных наблюдений начало струи было в состоянии, близком к раснораспределению. Поэтому мы определили параметры струи в остальных наблюдениях относительно первого для относительного увеличения плотности частиц в 10, 100 и 1000 раз. Во всех случаях напряжённость магнитного поля в начале струи 3C 273 на длине волны 7 мм была $B \lesssim 0.1$ Гс.

При определении яркостной температуры по данным на низких частотах важно правильно учитывать рассеяние излучения на межзвёздной среде. Как было показано в нашей работе [A2], детектирование интерференционного лепестка на больших базах при наличии рассеяния может быть обусловлено вкладом рефракционного шума от субструктуры рефракционного рассеяния. Было показано, что в предположении о влиянии рассеяния на излучение от квазара 3C 273 детектирования на наземно-космических базах на длинах волн 1.35 и 6 см интерпретируются как истинное излучение источника, а на длине волны 18 см может быть интерпретировано, как вклад субструктуры рассеяния. При этом оценки яркостной температуры на длине волны 18 см уменьшаются до 7×10^{12} К, что, однако, не меняет выводов о превышении предела на комптоновскую катастрофу. Это стало первым обнаружением субструктуры рассеяния для разрешённого внегалактического источника. Формула определения минимума яркостной температуры по малому количеству измерений амплитуды функции видности на наземно-космических базах из работы [42] была обобщена для учёта вклада рефракционного шума [A2].

В четвёртой главе представлены результаты анализа распределения спектрального индекса в струе 3C 273. Спектральный индекс – это показатель степени α в зависимости плотности потока от частоты $S \propto \nu^\alpha$. Упрощённо ожидается, что положительный спектральный индекс соответствует излучению оптически-толстых областей, а отрицательный – оптически-тонких. Для построения карты спектрального индекса использовались специально подготовленные карты полной интенсивности на двух частотах. Оценка значимости

вариаций спектрального индекса вдоль струи проводилась с помощью искусственно генерированных данных. Спектральный индекс вычислялся на всех парах соседних частот (кроме поддиапазонов одного частотного диапазона): 43.2–23.8 ГГц, 23.8–15.4 ГГц, 15.4–8.4 ГГц и 8.1–5.0 ГГц. В работе [A1] исследовалась эволюция спектрального индекса во время вспышки в ядре, распределение спектрального индекса вдоль хребтовой линии струи, а также область перехода от оптически-толстого излучения к оптически-тонкому вблизи видимого начала струи.

Смещение видимого положения начала релятивистской струи приводит к тому, что области с оптической толщиной порядка единицы расположены физически в разных местах – на более низких частотах вещество струи просветляется ниже по течению струи. Поэтому использование плотности потока компонентов, описывающих ядро на разных частотах, для нахождения спектрального индекса может давать сдвинутые результаты во время вспышек, когда параметры струи могут быстро меняться с расстоянием вдоль струи. Поэтому после учёта смещения видимого начала струи для каждой пары частот спектральный индекс ядра был вычислен, как усреднённое значение по 9 пикселям вокруг центра ядра на более низкой частоте. Во время вспышки на частоте 43 ГГц спектральный индекс 43–24 ГГц растёт с примерно нулевого значения до 1.5. Спектральный индекс 24–15 ГГц также растёт, но с некоторым запозданием, но в то же время на более низких частотах спектральный индекс либо не меняется существенно, либо, наоборот, уменьшается.

Исследование спектрального индекса вдоль струи позволяет оценить темп потерь энергии, которые могут быть вызваны, например, адиабатическим расширением и синхротронным излучением [43, 44]. При этом в случае существенных синхротронных потерь, скорость уменьшения спектрального индекса между разными парами частот будет разной. Мы обнаружили значимое спадание спектрального индекса с расстоянием вдоль струи на уровне 0.04 мсек^{-1} или 0.001 пк^{-1} вдоль струи. Однако значимых отличий между разными парами частот обнаружено не было, что указывает на доминирование адиабатических потерь.

В работе [44] были представлены указания на то, что частично-прозрачная область перехода от оптически-толстого к оптически-тонкому излучению вблизи видимого начала релятивистской струи может быть разрешена при наблюдениях на частоте 15 ГГц. Мы проверили это для спектральных индексов 43–24 ГГц и 15–8 ГГц (та же пара частот, что использовалась в работе [44]). Строился срез карты спектрального индекса вдоль направления выброса вблизи ядра. Мы сравнивали две модели перехода от оптически-толстого к оптически-тонкому излучению: резкий переход "ступенька" и линейный переход [A1]. С учётом поправки за количество параметров, модель с линейной – разрешённой – областью перехода во всех случаях оказывалась лучше модели с резким переходом. Протяжённость такого плавного перехода в ЗС 273 для частот 43–24 ГГц оценена в 7 парсек. Плавность изменения параметров вдоль струи указывает на правильность интерпретации видимого начала струи ЗС 273, как области с оптической толщиной для радиоизлучения $\tau \sim 1$.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, а также оценены перспективы дальнейших исследований.

Список цитированной литературы

- [1] M. Schmidt. ЗС 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift. *Nature*, 197:1040, March 1963.
- [2] W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, et al. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *ApJ*, 697:1071–1102, June 2009.
- [3] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al. Gamma-ray Light Curves and Variability of Bright Fermi-detected Blazars. *ApJ*, 722:520–542, October 2010.
- [4] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al. Fermi-Large Area Telescope Observations of the Exceptional Gamma-ray Outbursts of ЗС 273 in 2009 September. *ApJ*, 714:L73–L78, May 2010.
- [5] Н. С. Кардашев, В. В. Хартов, В. В. Абрамов, et al. “Радиоастрон” – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений. *Астрономический Журнал*, 90:179, March 2013.
- [6] G. Fossati, L. Maraschi, A. Celotti, A. Comastri, and G. Ghisellini. A unifying view of the spectral energy distributions of blazars. *MNRAS*, 299:433–448, September 1998.
- [7] A. A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, et al. The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars. *ApJ*, 716:30–70, June 2010.

- [8] F. Tavecchio, G. Ghisellini, G. Bonnoli, and G. Ghirlanda. Constraining the location of the emitting region in Fermi blazars through rapid γ -ray variability. *MNRAS*, 405:L94–L98, June 2010.
- [9] A. B. Pushkarev, Y. Y. Kovalev, and M. L. Lister. Radio/Gamma-ray Time Delay in the Parsec-scale Cores of Active Galactic Nuclei. *ApJ*, 722:L7–L11, October 2010.
- [10] B. Rani, T. P. Krichbaum, A. P. Marscher, et al. Jet outflow and gamma-ray emission correlations in S5 0716+714. *A&A*, 571:L2, November 2014.
- [11] C. Chidiac, B. Rani, T. P. Krichbaum, et al. Exploring the nature of the broadband variability in the flat spectrum radio quasar 3C 273. *A&A*, 590:A61, May 2016.
- [12] L. Fuhrmann, S. Larsson, J. Chiang, et al. Detection of significant cm to sub-mm band radio and γ -ray correlated variability in Fermi bright blazars. *MNRAS*, 441:1899–1909, July 2014.
- [13] V. Ramakrishnan, T. Hovatta, E. Nieppola, et al. Locating the γ -ray emission site in Fermi/LAT blazars from correlation analysis between 37 GHz radio and γ -ray light curves. *MNRAS*, 452:1280–1294, September 2015.
- [14] C. D. Dermer and R. Schlickeiser. Model for the High-Energy Emission from Blazars. *ApJ*, 416:458, October 1993.
- [15] M. Sikora. High-energy radiation from active galactic nuclei. *ApJS*, 90:923–928, February 1994.
- [16] A. C. Donea. Absorption of GeV and TeV g-Rays in M87 and 3C 273. *International Cosmic Ray Conference*, 5:2671, July 2003.
- [17] J. Poutanen and B. Stern. GeV Breaks in Blazars as a Result of Gamma-ray Absorption Within the Broad-line Region. *ApJ*, 717:L118–L121, July 2010.
- [18] B. E. Stern and J. Poutanen. Variation of the $\gamma\gamma$ opacity by the He II Lyman continuum constrains the location of the γ -ray emission region in the blazar 3C 454.3. *MNRAS*, 417:L11–L15, October 2011.
- [19] J. Aleksić, L. A. Antonelli, P. Antoranz, et al. MAGIC Observations and multiwavelength properties of the quasar 3C 279 in 2007 and 2009. *A&A*, 530:A4, June 2011.
- [20] T. Armstrong, A. M. Brown, P. M. Chadwick, and S. J. Nolan. The detection of Fermi AGN above 100 GeV using clustering analysis. *MNRAS*, 452:3159–3166, September 2015.
- [21] G. Ghisellini and P. Madau. On the origin of the gamma-ray emission in blazars. *MNRAS*, 280:67–76, May 1996.
- [22] G. Ghisellini and F. Tavecchio. Rapid variability in TeV blazars: the case of PKS2155-304. *MNRAS*, 386:L28–L32, May 2008.
- [23] I. Agudo, A. P. Marscher, S. G. Jorstad, 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. *ApJ*, 735:L10, July 2011.
- [24] S. G. Jorstad, A. P. Marscher, I. Agudo, and B. Harrison. Analysis of Parsec-Scale Jet Behavior of a Sample of Blazars during High Gamma-Ray States. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts 218*, page 327.06, May 2011.
- [25] F. K. Schinzel, A. P. Lobanov, G. B. Taylor, et al. Relativistic outflow drives γ -ray emission in 3C 345. *A&A*, 537:A70, January 2012.
- [26] A. P. Marscher. Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars. *ApJ*, 780:87, January 2014.
- [27] K. I. Kellermann and I. I. K. Pauliny-Toth. The Spectra of Opaque Radio Sources. *ApJ*, 155:L71, February 1969.
- [28] A. C. S. Readhead. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe. *ApJ*, 426:51–59, May 1994.
- [29] Y. Y. Kovalev, K. I. Kellermann, M. L. Lister, et al. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure. *AJ*, 130:2473–2505, December 2005.
- [30] B. Lott, L. Escande, S. Larsson, and J. Ballet. An adaptive-binning method for generating constant-uncertainty/constant-significance light curves with Fermi-LAT data. *A&A*, 544:A6, August 2012.
- [31] K. V. Sokolovsky, Y. Y. Kovalev, A. B. Pushkarev, and A. P. Lobanov. A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. I. Evidence of dominating synchrotron opacity. *A&A*, 532:A38, August 2011.
- [32] N. S. Kardashev, V. V. Khartov, V. V. Abramov, et al. "RadioAstron"-A telescope with a size of 300 000 km: Main parameters and first observational results. *Astronomy Reports*, 57:153–194, March 2013.
- [33] R. D. Blandford and A. Königl. Relativistic jets as compact radio sources. *ApJ*, 232:34–48, August 1979.
- [34] J. M. Marcaide and I. I. Shapiro. VLBI study of 1038 + 528 A and B - Discovery of wavelength dependence of peak brightness location. *ApJ*, 276:56–59, January 1984.
- [35] A. P. Lobanov. Ultracompact jets in active galactic nuclei. *A&A*, 330:79–89, February 1998.
- [36] S. G. Jorstad, A. P. Marscher, P. S. Smith, et al. A Tight Connection between Gamma-Ray Outbursts and Parsec-scale Jet Activity in the Quasar 3C 454.3. *ApJ*, 773:147, August 2013.
- [37] B. Rani, B. Lott, T. P. Krichbaum, L. Fuhrmann, and J. A. Zensus. Constraining the location of rapid gamma-ray flares in the flat spectrum radio quasar 3C 273. *A&A*, 557:A71, September 2013.

- [38] V. I. Slysh. The synchro-Compton limit of the brightness temperature of nonstationary radio sources. *ApJ*, 391:453–455, June 1992.
- [39] S. G. Jorstad, A. P. Marscher, M. L. Lister, et al. Polarimetric Observations of 15 Active Galactic Nuclei at High Frequencies: Jet Kinematics from Bimonthly Monitoring with the Very Long Baseline Array. *AJ*, 130:1418–1465, October 2005.
- [40] T. Hovatta, E. Valtaoja, M. Tornikoski, and A. Lähteenmäki. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies. *A&A*, 494:527–537, February 2009.
- [41] T. Savolainen, D. C. Homan, T. Hovatta, et al. Relativistic beaming and gamma-ray brightness of blazars. *A&A*, 512:A24, March 2010.
- [42] A. Lobanov. Brightness temperature constraints from interferometric visibilities. *A&A*, 574:A84, February 2015.
- [43] C. M. Fromm, E. Ros, M. Perucho, et al. Catching the radio flare in CTA 102. III. Core-shift and spectral analysis. *A&A*, 557:A105, September 2013.
- [44] T. Hovatta, M. F. Aller, H. D. Aller, et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XI. Spectral Distributions. *AJ*, 147:143, June 2014.