

Что мы знаем и что нам предстоит узнать о квазарах

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

Михаил Лисаков

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Научный руководитель д.ф.-м.н.
Юрий Юрьевич Ковалев

▪ Считается, что в радиодиапазоне излучают релятивистские электроны в магнитном поле. А высокоэнергетичное излучение появляется за счёт обратного комптоновского рассеяния на этих электронах.

Однако, какие фотоны рассеиваются? Набор вариантов зависит от того, в какой области генерируется гамма-излучение: вблизи истоков струи или значительно ниже по течению.

▪ Мы не можем использовать супер-разрешение радиоинтерферометров для того, чтобы заглянуть в самое начало струи из-за непрозрачности вещества. Лучшее, что нам доступно – видимое начало струи.

Что это? Стоячая ударная волна? Область с оптической толщиной $\tau=1$?

▪ Модели струи с излучением релятивистских электронов предсказывают наличие предела на яркостную температуру излучающего вещества. С поверхности Земли проверить это невозможно.

Так ли это при взгляде из космоса? Правильно ли наше представление о синхротронном излучении струй?

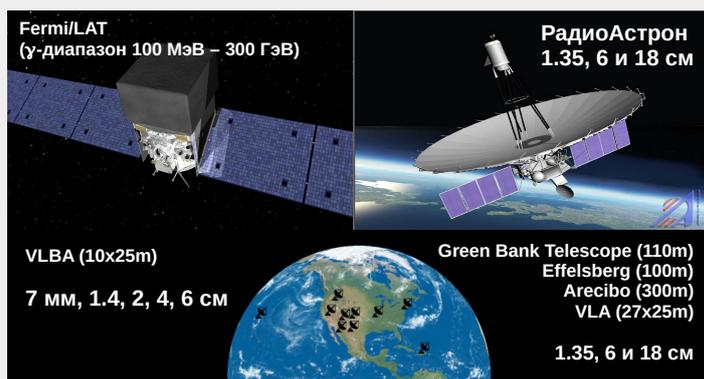
1 АКЦ ФИАН 10 ноября 2017 г.

2

Содержание

- Введение
- Глава 1
Результаты наблюдений 3C 273
- Глава 2
Локализация области гамма-излучения в струе 3C 273
- Глава 3
Обнаружение экстремальных яркостных температур и субструктуры рефракционного рассеяния в 3C 273
- Глава 4
Спектральные свойства струи 3C 273
- Заключение

Глава 1: Наблюдательные данные

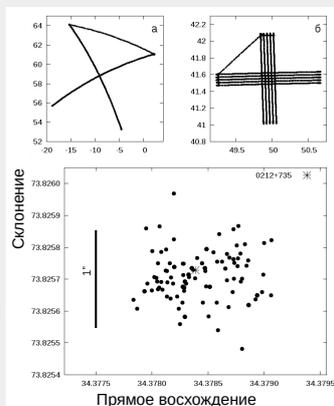


3

4 Глава 1

Юстировка и определение параметров КРТ

- Поправка наведения КРТ на источник 2.5' → улучшение чувствительности КРТ в 2 раза
- Точность сопровождения источника лучше 2''
Лисаков+ 2014
- Подтверждена согласованность значения эквивалентной температуры шумов системы во время калибровочных и интерференционных наблюдений 2011 – 2013 гг
Ковалев+ 2014



Глава 2: Локализация области γ -излучения в струе 3C 273

Синхротронные фотоны струи, внешние – реликтовое излучение

Синхротронные фотоны струи, внешние – реликтовое излучение, тор, аккреционный диск, BLR

- Много фотонов
- Быстрая переменность
- Излом спектра
- Задержка радио-гамма

- Одновременность вспышек в гамма и оптическом диапазоне
- ТэВ фотоны от некоторых источников
- Совпадение вспышек в гамма-диапазоне с изменением поляризационных свойств

- Фотоны >20 ГэВ не должны покидать область BLR
- Мало фотонов
- Быстрая переменность
- Излом спектра

5 Глава 1

6 Глава 2: Локализация области γ -излучения

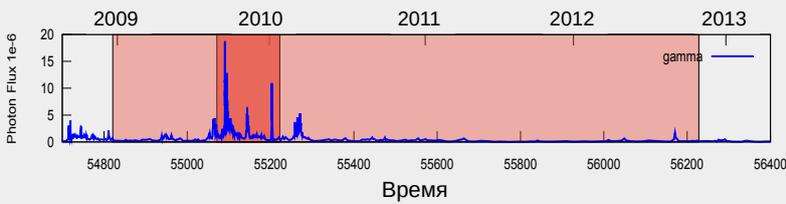
Наблюдательные данные

- Fermi 100 МэВ – 300 ГэВ

- Многочастотные VLBA наблюдения

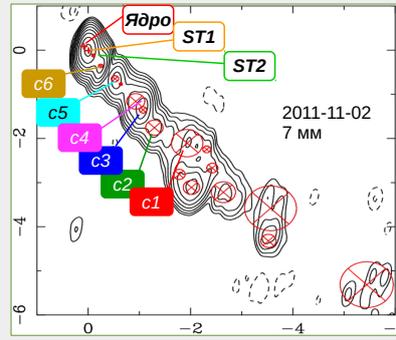
4.6	5.0	8.1	8.4	15.4	23.8	43.2	ГГц
6.5	6.0	3.7	3.6	2	1.3	0.7	см

- Данные РСДБ мониторинга на длине волны 7 мм

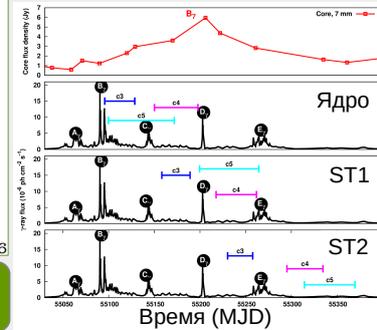


7 Глава 2: Локализация области у-излучения

Эволюция структуры струи



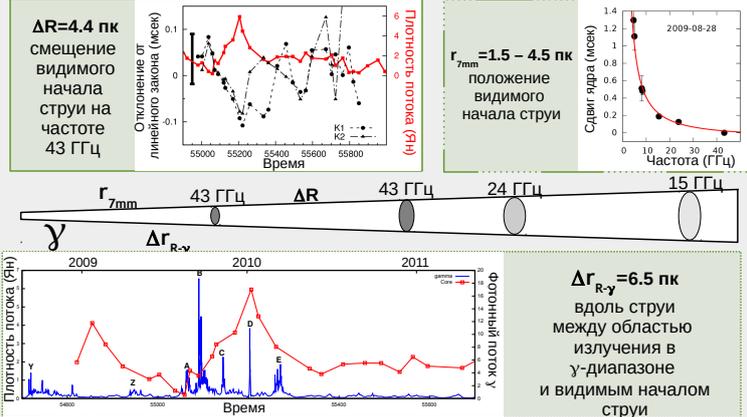
$\beta_{app} = 8c$
 $\beta_{app} = 12c$
По вспышкам



Не обнаружено связи между параметрами деталей протяженной структуры и вспышками в гамма-диапазоне

8 Глава 2: Локализация области у-излучения

Локализация области у-излучения в струе ЗС 273



9 Глава 2: Локализация области у-излучения

Основные выводы по главе 2

- Область у-излучения ЗС 273 локализована вблизи основания струи на расстоянии 2 – 7 пк выше по течению от видимого начала. Гамма- и радиовспышки связаны с одним и тем же возмущением, распространяющимся по струе
- Обнаружено смещение положения видимого начала струи на длине волны 7 мм во время вспышки в радиодиапазоне
- По кривым блеска измерена скорость движения вещества струи вблизи видимого начала в 1.5 раза выше, чем оценивается по кинематике компонент

10 Глава 2: Локализация области у-излучения

Глава 3: Обнаружение экстремальных яркостных температур и субструктуры рефракционного рассеяния в ЗС 273

$$I(\nu, T_b) = \frac{2\pi k T_b}{c^2} \nu^2$$

Равнораспределение
 $T_{eq} \sim 10^{10.5}$ К

Комптоновская катастрофа
 $T_c \sim 10^{11.5}$ К

$$T_b = T_{int} \cdot \delta$$

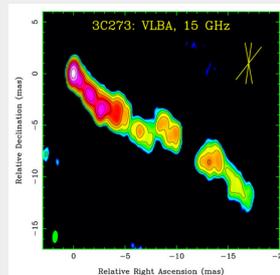
$$T_b^{max} \sim (D [KM])^2$$

РСДБ позволяет проводить прямые измерения яркостных температур, что необходимо для проверки механизма генерации излучения в релятивистских струях квазаров

11 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

Наблюдательные данные, РадиоАстрон

λ (см)	Дата	Наземные телескопы	B (10 ³ км)	B (Мл)	P.A.
1.35	2013-02-02	Green Bank, VLA	103	7.6	-7
6.2	2012-12-30	Arecibo, Effelsberg	90	1.45	10
6.2	2013-02-02	Arecibo	103	1.69	-8
18	2013-01-08	Green Bank	157	0.87	-32
18	2013-01-25	Arecibo, Green Bank	171	0.95	-38

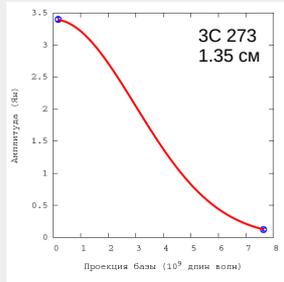


12 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

T_b по наблюдениям с РадиоАстроном

λ (см)	Дата	S _c (МЯН)	θ (мсек)	T _b (10 ¹² К)	T _b min (10 ¹² К)
1.35	2013-02-02	125	26	14	5.3
6.2	2012-12-30	125	142	13	4.5
6.2	2013-02-02	123	122	17	5.2
18	2013-01-08	42	275	34	4.0
18	2013-01-25	52	246	42	6.3

$$T_b = \frac{2 \ln(2)}{\pi k} \frac{S \lambda^2 (1+z)}{\theta_{maj} \theta_{min}}$$



T_b > 10¹³ К дольше 1 месяца

Механизмы генерации и поддержания экстремальных яркостных температур

Релятивистское усиление на самом деле больше, чем мы считаем

- Не подтверждается для 3C 273 по вспышкам и кинематике на 7 мм, сложно объяснить диапазон изменения T_b: 10¹⁰ – 10¹³ К

Непрерывный вброс в струю частиц с экстремальными энергиями или их постоянное реускорение на расстоянии ~10 – 40 пк от истоков струи (по данным измерения смещения видимого начала струи)

- Не наблюдается предсказываемый постоянный высокий уровень гамма-излучения, вспышки в радиодиапазоне редки

- Возможно, активность в рентгеновском диапазоне

Излучение релятивистских протонов

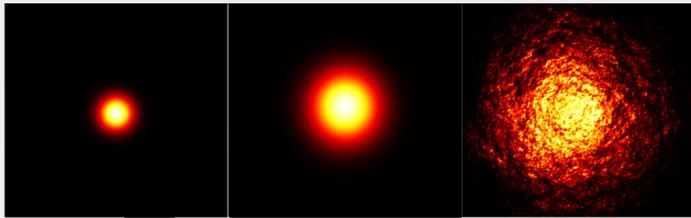
- Требует магнитных полей >10 Гс, нет наблюдательных указаний

- Возможно, удастся согласовать при использовании модели e⁻-p⁺ плазмы

13 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

14 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

Рассеяние на МЗС

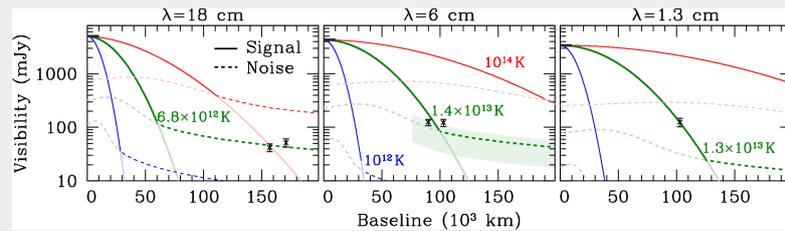


Истинное изображение

Изображение, искажённое рассеянием

Изображение, искажённое рассеянием с учётом субструктуры

T_b с учётом субструктуры рассеяния



$$T_{18} = 6.8 \cdot 10^{12} \text{ К}$$

$$T_6 = 1.4 \cdot 10^{13} \text{ К}$$

$$T_{1.3} = 1.3 \cdot 10^{13} \text{ К}$$

Учёт возможного влияния субструктуры рассеяния не меняет кардинально оценки T_b

15 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

16 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

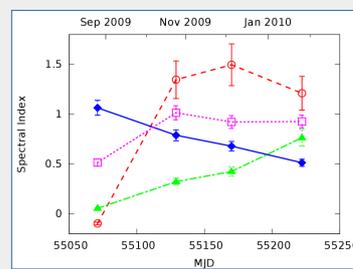
Основные выводы по главе 3

- Обнаружено нарушение предела комптоновской катастрофы в течение по крайней мере нескольких месяцев (T_b > 10¹³ К). Требуется объяснение, выходящее за рамки современного представления о физике струй. Возможны излучение релятивистских протонов и более экзотические процессы.

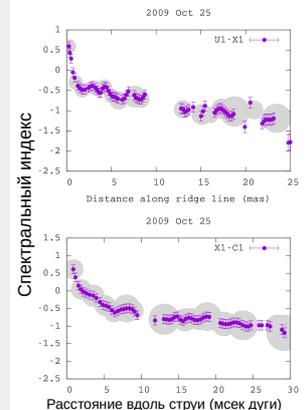
- В наблюдениях на 18 см с РадиоАстроном обнаружена субструктура рефракционного рассеяния – впервые для внегалактического источника. Вклад субструктуры рассеяния не может объяснить экстремальные яркостные температуры на длинах волн 6 и 1.35 см.

- Оценено магнитное поле на уровне B ≤ 0.1 Гс в видимом ядре на длине волны 7 мм на расстоянии 2-7 пк от основания струи.

Глава 4: Спектральные свойства струи 3C 273



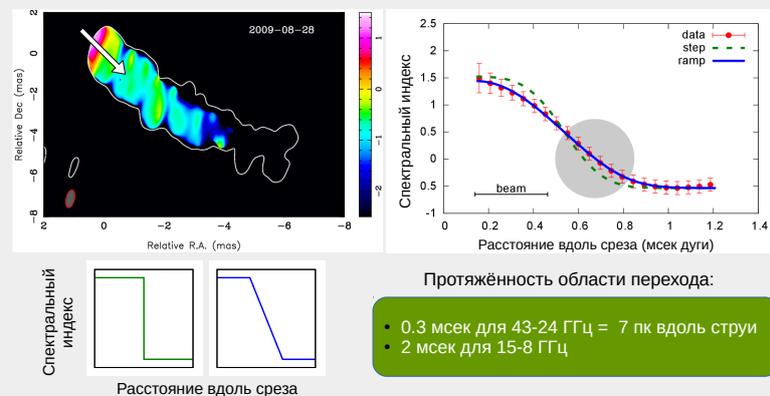
В струе на частотах 15-8 и 8-5 ГГц доминируют адиабатические потери



17 Глава 3: яркостные температуры и субструктура рассеяния

18 Глава 4: Спектральные характеристики 3C 273

Просветление начала струи



19 Глава 4: Спектральные характеристики 3C 273

Основные выводы по главе 4

- Спектральный индекс ядра на частотах 43–24 ГГц из плоского становится инвертированным во время нарастания вспышки на частоте 43 ГГц. Спектральный индекс ядра на частотах 24–15 ГГц начинает расти с некоторой задержкой. За время наших наблюдений возмущение, вызывающее вспышку, ещё не дошло до видимого начала струи на более низких частотах и поэтому не влияет на спектральный индекс ядра на низких частотах.
- На частотах 15–8 ГГц и 8–5 ГГц измерен одинаковый темп спада спектра индекса с расстоянием вдоль струи порядка 10^{-3} за каждый парсек расстояния вдоль струи, что говорит о доминировании **адиабатических** потерь в протяжённой части струи
- Показано, что частично прозрачная область перехода от оптически-толстого излучения в ядре к оптически-тонкому в протяжённой структуре струи разрешена и на частотах 43–24 ГГц, и на 15–8 ГГц. Изменение истинного спектрального индекса вдоль струи хорошо описывается линейным законом. При этом протяжённость переходной области составляет **0.3 мсек дуги** на 43–24 ГГц и **2 мсек дуги** на 15–8 ГГц. Плавность изменения параметров вдоль струи указывает на правильность интерпретации видимого начала струи 3C 273, как области с оптической толщиной для радиоизлучения $\tau \sim 1$.

20 Глава 4: Спектральные характеристики 3C 273

Положения, выносимые на защиту

- Область гамма излучения локализована вблизи истинного начала струи, на расстоянии **2–7 пк** выше по течению, чем видимое начало струи на 7 мм. Гамма-излучение наиболее вероятно объясняется обратным комптоновским рассеянием фотонов из внешних источников.
- Обнаружено нарушение предела комптоновской катастрофы в течение по крайней мере нескольких месяцев ($T_b > 10^{13}$ К). Требуется объяснение, выходящее за рамки современного представления о физике струй. Возможны излучение релятивистских протонов и более экзотические процессы.
- В наблюдениях на 18 см с РадиоАстроном **обнаружена** субструктура рефракционного рассеяния – впервые для внегалактического источника.
- Оценено магнитное поле на уровне **$B \leq 0.1$ Гс** в ядре на длине волны 7мм для плотности частиц, возрастающей в 10 и 100 раз. При этом ядро смещается вниз по струе на **4.4 пк**, следуя за увеличивающейся плотностью частиц.

21

Основные публикации по теме диссертации

- 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, 4, 4478 (2017)
- 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 (2016)
- 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 (2016)
- 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 (2014)
- Ковалев, Ю. А., Васильков, В. И., Попов, М. В., Согласнов, В. А., Войцки, 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 (2014)
- Кардашев Н. С. и др. (всего 39 соавторов, включая Лисакова М. М.), РадиоАстроном: итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета, Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 4-24 (2016)

23

Положения, выносимые на защиту

- Наблюдательные данные свидетельствуют в пользу плавного просветления вещества струи на протяжении **7 пк** на частотах 43–24 ГГц.
- В протяжённой структуре струи доминируют адиабатические потери.
- Скорость течения плазмы, измеренная по вспышкам в стационарных детекторах, **выше**, чем скорость, измеренная по движению компонент струи. Типичная величина релятивистского усиления может недооцениваться в **1.5 раза** при измерениях, основанных на кинематике РСДБ компонент.

22

Спасибо

24