

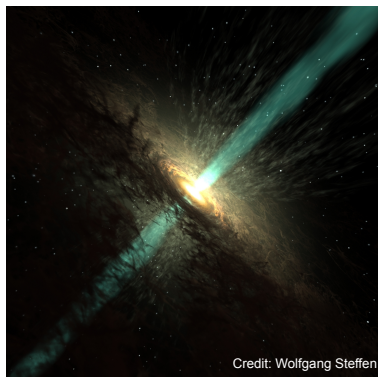
Исследование центральных областей активных ядер галактик с экстремальным угловым разрешением

Пётр Андреевич Войцик

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

Научный руководитель: Ю. Ю. Ковалев

АКЦ ФИАН — 7 апреля 2022 г.

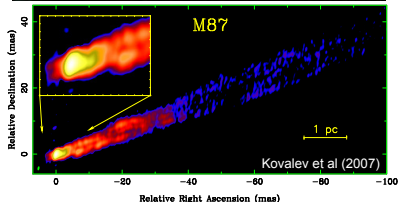


Предмет исследования

Внутренние области релятивистских выбросов:
1–100 пк (10^4 – $10^6 R_g$ для $10^9 M_\odot$) от центральной машины

Цели и методы:

- Физические условия и свойства синхротронного самопоглощения: многочастотных РСДБ наблюдения
- Угловые размеры и яркостные температуры для уточнения механизма излучения: наземно-космический интерферометр
- Оценка Допплер-фактора по кинематика струй: многолетние ряды РСДБ наблюдений



- **Введение**

- **Глава 1**

Частотный сдвиг положения ядра в ультракомпактных радиоисточниках.

- **Глава 2**

Обзор активных ядер галактик на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон».

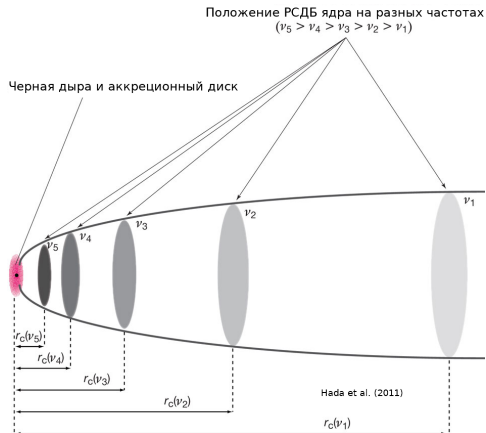
- **Глава 3**

Кинематика релятивистских струй.

- **Заключение**

Глава 1: Видимый сдвиг положения ядра с частотой

РСДБ ядро — наиболее яркая и компактная деталь на картах внегалактических релятивистских струй, соответствует поверхности с оптической толщиной $\tau \approx 1$.



Модель конической струи Blandford и Königl (1979)

$$r_c(\nu) \sim \nu^{-1/k_r}$$

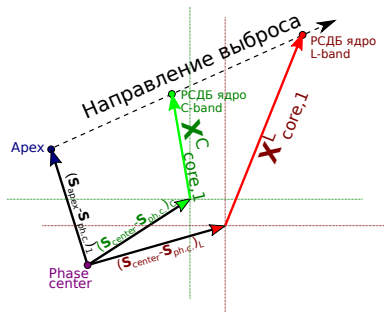
Сдвиг ядра:

- Астрофизика — магнитное поле, плотность частиц, геометрия
- **Астрометрия** — инерциальная система отсчёта (ICRF)

Сдвиг ядра с помощью относительной астрометрии

- Наблюдались 8 компактных радиоисточников из набора реперов международной системы астрономических координат (ICRF)
- Для каждого объекта были подобраны 2 фазовых калибратора на угловом расстоянии $< 4^\circ$
- Наблюдения на Европейской РСДБ сети (EVN): 1.7 (L), 2.3 (S), 5.0 (C) и 8.4 ГГц (X)
- Впервые телескопы сети «Квазар-КВО» (Светлое, Зеленчукская, Бадары) участвовали в наблюдениях как часть EVN
- И исследуемый объект, и калибраторы подвержены эффекту примерно в равной степени

Разработана методика измерения сдвига ядра с использованием информации о направлении струй.



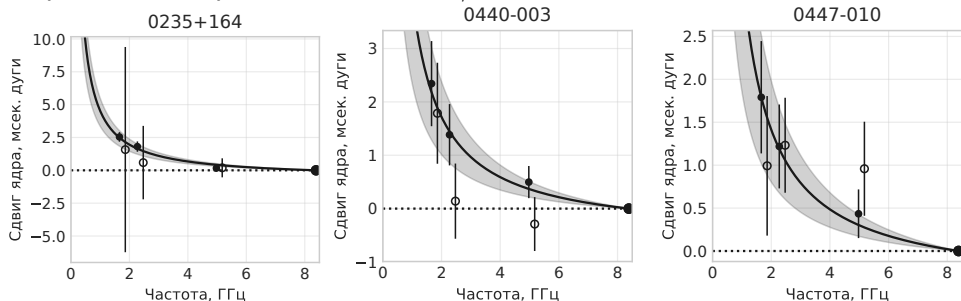
$$\mathbf{X}_{\text{core},i}^j = ((\mathbf{S}_{\text{apex}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})_i + \Delta r_{\text{core},i}^j \mathbf{d}_i) - (\mathbf{S}_{\text{center}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})^j,$$

где $i \in \{1, 2, 3\}$ — номер источника,
 $j \in \{L, S, C, X\}$ — частотный диапазон.

Получены оценки сдвига ядра с частотой для 24 исследованных объектов. У 9 из них измеренный эффект значим.

Требуются РСДБ наблюдения с хорошим покрытием плоскости пространственных частот, высокой чувствительностью и угловым разрешением.

Примеры подгонки кривой $\Delta r_{\text{core}} = a + b/\nu$



Войцик и др. 2018

- Разработан подход, который позволяет измерить эффект видимого сдвига ядер квазаров с частотой для каждого объекта в группе близких источников, связанных одним фазовым решением методом относительной РСДБ-астрометрии.
- Получены значимые величины сдвига ядра для 9 объектов: медианное значение на частоте 1.7, 2.3 и 5.0 ГГц относительно 8.4 ГГц составило величину 1.79, 1.22 и 0.18 мсек дуги, соответственно.
- Из 9 источников со значимо измеренным эффектом 5 входят в список «определяющих» объектов ICRF: 0133+476, 0202+319, 0235+164, 0440-003 и 0446+112. Это необходимо учитывать при решении высокоточных астрометрических задач.
- Типичное расстояние от центральной машины до 8 ГГц-ядра составило величину около 0.3 мсек дуги или 2 пк в проекции на небо. Это соответствует истинному расстоянию ~ 20 пк.
- Магнитное поле на расстоянии 1 пк от истинного начала струи около 1 Гс.

Глава 2: Обзор активных ядер на Радиоастроне: задача

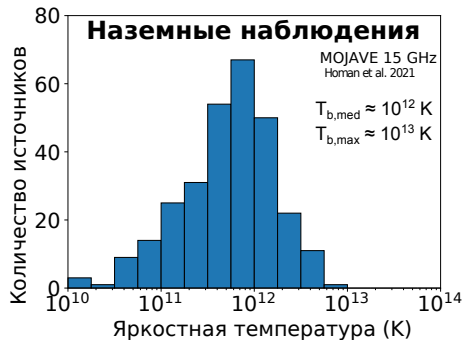
Задача обзора:

Измерить и исследовать яркостную температуру ядер квазаров с целью лучше понять физику их излучения.

Наземные РСДБ измерения не противоречат комптоновскому пределу яркостной температуры в $10^{11.5}$ К (Readhead, 1994), если учесть типичное доплеровское усиление $\delta \sim 10$ (Глава 3).

Только наблюдения с базой много больше диаметра Земли позволили проверить эти пределы.

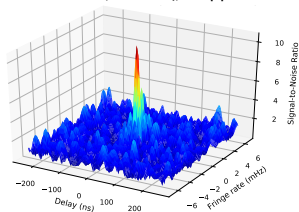
Наземно-космический интерферометр «Радиоастрон» чувствителен к $T_{b,max}$ до 10^{15} – 10^{16} К.



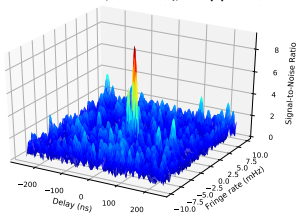
Обзор активных ядер на Радиоастроне: описание

- Проведены наблюдения 248 радиоярких АЯГ
- Даты проведения обзора: февраль 2012 — июнь 2018
- Диапазоны наблюдения: 18 см (1.7 ГГц, L-band), 6 см (4.8 ГГц, C-band) и 1.35 см (22 ГГц, K-band)
- Обработано 3234 наблюдательная сессия, значимый сигнал получен от 167 источников в 1129 сессиях на проекциях базы интерферометра до 345 000 км (27 диаметров Земли)

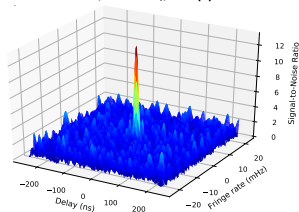
0048-097, 1.7 ГГц, 27 ДЗ



0235+164, 4.8 ГГц, 26 ДЗ

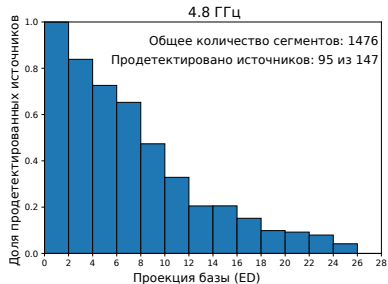
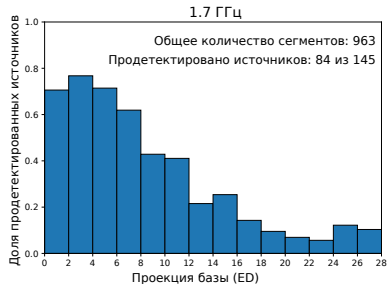


OJ 287, 22 ГГц, 15 ДЗ

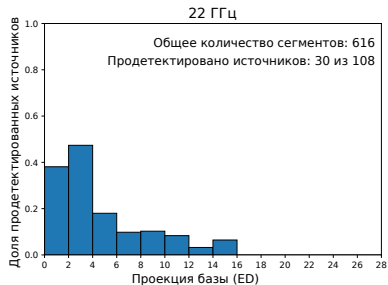


Kovalev et al. 2020

Статистика детектирования источников



Самые компактные: OJ 287,
0235+164, 0716+714, 3C 279

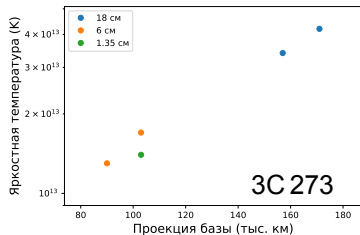


Оценка яркостной температуры

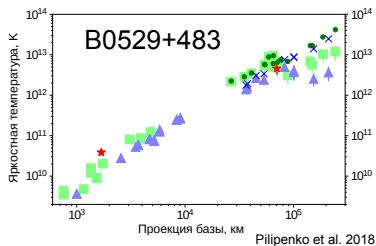
Простая модель: излучающая область имеет форму круглой гауссианы.

$$T_{b,est} = \frac{\pi}{2k} \frac{B^2 V_{ground}}{\ln(V_{ground}/V_{space})}$$

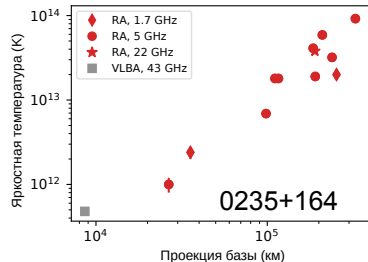
Примеры подробно исследованных объектов в обзоре АЯГ на «Радиоастроне»



Kovalev et al. 2016



Pilipenko et al. 2018

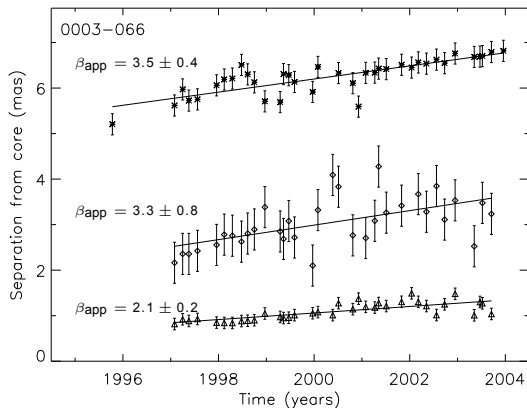
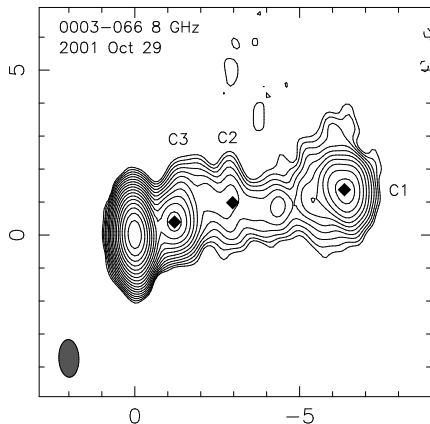


Kutkin et al. 2018

- Проведена обработка данных обзора активных ядер галактик в проекте «Радиоастрон». Интерференционный отклик на наземно-космических базах получен от 2/3 источников на проекциях баз до 345 000 км (27 диаметров Земли).
- Для детально исследованных источников 3C 273, B0529+483 и 0235+164 по результатам обзора измерены яркостные температуры во всех частотных диапазонах. Все три источника показывают значения $\gtrsim 10^{13}$ К, что на порядок больше типичных яркостных температур по наземным измерениям. В то же время экстремальные яркости на уровне $10^{15} - 10^{16}$ К напрямую не обнаружены.
- Полученные яркостные температуры противоречат предположению о равномерном распределении энергии частиц и магнитного поля в джетах блазаров на парсековых масштабах (см. главу 1). Более того, полученные яркости превышают комптоновский предел даже с учётом релятивистского усиления. Высокие яркостные температуры могут быть объяснены такими механизмами, как постоянное ре-ускорение частиц, магнитные пересоединения, релятивистские протоны или когерентное излучение.

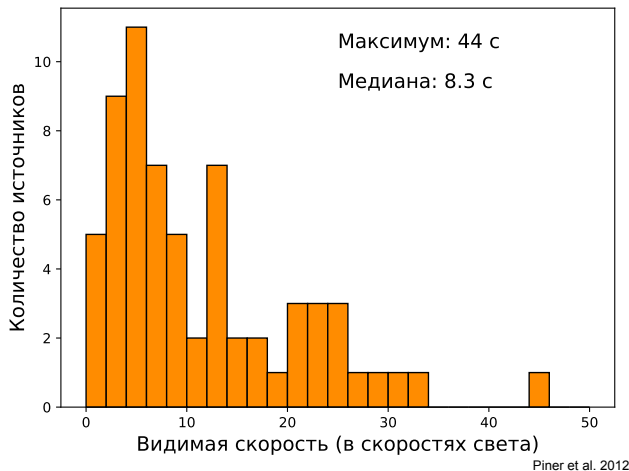
Глава 3: Кинематика релятивистских струй

- Использовались данные астрометрического/геодезического обзора на VLBA+ на 8 ГГц
- 68 внегалактических радиоисточников (преимущественно квазары)
- 50 РСДБ экспериментов в течение 10 лет: 1994–2003 гг. В среднем 43 эпохи наблюдения на источник.



Кинематика релятивистских струй: результаты

Распределение видимых скоростей самых быстрых деталей релятивистских струй



Для критического угла ($\cos \theta_c = \beta$): $\delta \approx \beta_{\text{app}} \Rightarrow \delta \sim 5-10$

- Измерена максимальная видимая скорость движения деталей в выборке 66 внегалактических релятивистских струй. Получено медианное значение скорости $8.3c$, максимальное $44c$.
- Типичное значение релятивистского усиления излучения $\delta \sim 5-10$, максимальное < 100 . Этого не достаточно для объяснения высокой яркостной температуры, полученной в обзоре активных ядер на «Радиоастроне».

Положения, выносимые на защиту

- 1 Разработан метод измерения видимого сдвига ядер квазаров с частотой по наблюдениям близких источников, связанных одним фазовым решением методом относительной РСДБ-астрометрии. Метод был применён к РСДБ наблюдениям 8 триплетов компактных внегалактических радиоисточников, в результате чего были получены оценки сдвига ядра с частотой для 24 объектов. У 9 из них измеренный эффект значим. Для этих источников медианное значение сдвига РСДБ-ядра на частоте наблюдения 1.7, 2.3 и 5.0 ГГц относительно самой высокой частоты 8.4 ГГц составило величину 1.79, 1.22 и 0.18 мсек дуги, соответственно.
- 2 По результатам обработки обзора активных ядер галактик в проекте «Радиоастрон» получен значимый интерферометрический сигнал от 2/3 объектов полной выборки 163 радиоисточников на проекциях наземно-космических баз до 345 000 км на частотах наблюдения 1.7, 4.8 и 22.2 ГГц. Яркостная температура многих продетектированных в обзоре источников значительно превышает предел на Комптоновскую катастрофу. Для большинства из них не выполняется предположение о равномерном распределении плотности энергии частиц и магнитного поля.
- 3 По результатам программы мониторинга АЯГ на системе апертурного синтеза VLBA на частоте 8 ГГц измерены видимые скорости движения деталей в 66 релятивистских струях. Распределение скоростей самых быстрых деталей в каждом источнике показывает максимум $44c$ и медианное значение $8.3c$. Полученные видимые скорости соответствуют типичному доплеровскому усилению $\delta \approx 5-10$, что не достаточно для объяснения высокой яркостной температуры ядер квазаров, полученной по результатам обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон».

- 1 **П. А. Войцик**, А. Б. Пушкарёв, Ю. Ю. Ковалёв, А. В. Плавин, А. П. Лобанов, А. В. Ипатов, *Сдвиг положения ядра с частотой в ультракомпактных квазарах* // 2018, *Астрономический журнал*, 95, 832–858
- 2 Y. Y. Kovalev, N. S. Kardashev, K. I. Kellermann, A. P. Lobanov, M. D. Johnson, L. I. Gurvits, **P. A. Voitsik**, J. A. Zensus, J. M. Anderson, U. Bach, D. L. Jauncey, F. Ghigo, T. Ghosh, A. Kraus, Y. A. Kovalev, M. M. Lisakov, L. Y. Petrov, J. D. Romney, C. J. Salter, K. V. Sokolovsky, *RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit* // 2016, *Astrophysical Journal Letters*, 820, L9
- 3 S. V. Pilipenko, Y. Y. Kovalev, A. S. Andrianov, U. Bach, S. Buttaccio, P. Cassaro, G. Cimò, P. G. Edwards, M. P. Gawroński, L. I. Gurvits, T. Hovatta, D. L. Jauncey, M. D. Johnson, Y. A. Kovalev, A. M. Kutkin, M. M. Lisakov, A. E. Melnikov, A. Orlati, A. G. Rudnitskiy, K. V. Sokolovsky, C. Stanghellini, P. de Vicente, **P. A. Voitsik**, P. Wolak, G. V. Zhekanis, *The high brightness temperature of B0529+483 revealed by RadioAstron and implications for interstellar scattering* // 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474, 3523–3534
- 4 A. M. Kutkin, I. N. Pashchenko, M. M. Lisakov, **P. A. Voitsik**, K. V. Sokolovsky, Y. Y. Kovalev, A. P. Lobanov, A. V. Ipatov, M. F. Aller, H. D. Aller, A. Lahteenmaki, M. Tornikoski, L. I. Gurvits, *The extreme blazar AO 0235+164 as seen by extensive ground and space radio observations* // 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 475, 4994–5009
- 5 Y. Y. Kovalev, N. S. Kardashev, K. V. Sokolovsky, **P. A. Voitsik**, T. An, et al., *Detection statistics of the RadioAstron AGN survey* // 2020, *Advances in Space Research*, 65, 705–711
- 6 B. G. Piner, A. B. Pushkarev, Y. Y. Kovalev, C. J. Marvin, J. G. Arenson, P. Charlot, A. L. Fey, A. Collioud, **P. A. Voitsik**, *Relativistic Jets in the Radio Reference Frame Image Database. II. Blazar Jet Accelerations from the First 10 Years of Data (1994-2003)* // 2012, *Astrophysical Journal*, 758, 84