

Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений их полных выборок

Александр Попков
МФТИ, АКЦ ФИАН

Научный руководитель:
Юрий Юрьевич Ковалев
д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

28 сентября 2022 г.

Предмет и методы исследования

- Радиогромкие активные ядра галактик (АЯГ). Релятивистские струи (джеты) вследствие аккреции на сверхмассивную чёрную дыру ($\sim 10^6$ - $10^{10} M_{\odot}$).
- Лоренц-фактор частиц – до $\sim 10^8$ (Blandford et al. 2019). Лоренц-фактор струи $\Gamma \sim 10$ (Lister et al., 2019) => сильный эффект Доплера.
- В радиодиапазоне – синхротронное излучение джета.
- Излучение во всех диапазонах э/м волн. Вероятные источники нейтрино.
- Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ) позволяет изучать АЯГ с угловым разрешением до десятков μas .
- Многолетние наблюдения => полная по плотности потока выборка компактных источников.
- Широкополосные радиоспектры АЯГ: форма и переменность связаны со структурой. Массово наблюдаются PATAH-600 и другими инструментами.



NASA/JPL



NRAO/AUI/NSF
nrao.edu



aboutspacejournal.net

Цель работы

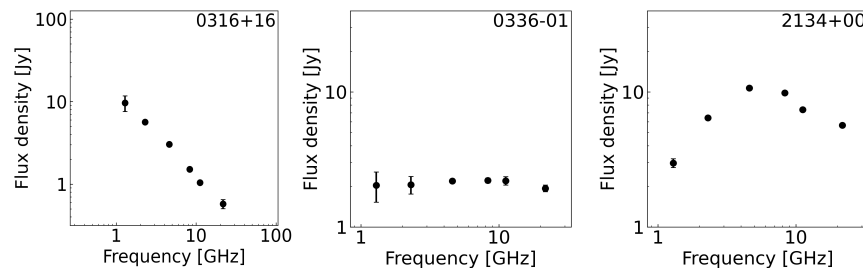
Исследование свойств популяции компактных джетов АЯГ и физики происходящих в них процессов с помощью анализа РСДБ-наблюдений с высоким угловым разрешением и широкополосных радиоспектров для статистически полных выборок АЯГ.

Задачи работы

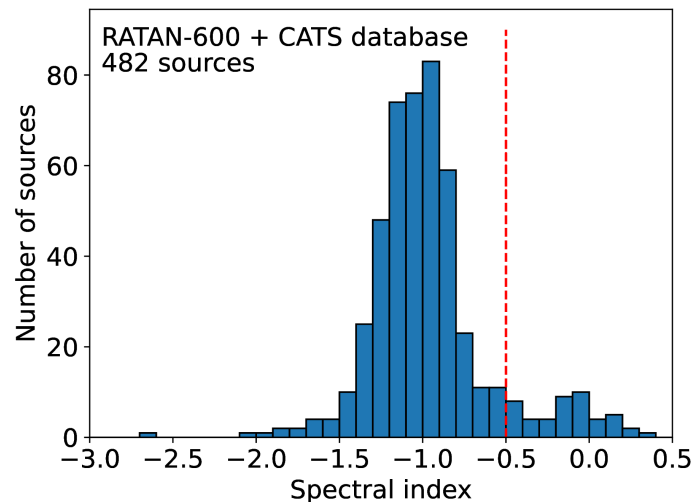
- На основе анализа наблюдений полной по интегральной плотности радиопотока выборки 482 активных ядер галактик определить количество и исследовать свойства РСДБ-компактных объектов с крутым и плоским радиоспектром.
- Изучить особенности активности блазара TXS 0506+056 — кандидата в источники нейтрино высоких энергий — и сравнить его характеристики в радиодиапазоне с характеристиками других источников полной выборки блазаров.
- Получить несмещённые оценки Доплер-факторов джетов АЯГ путём сравнения значений, определённых по РСДБ-наблюдениям яркостной температуры радиоядра для полной по плотности РСДБ-потока выборки, со значениями, даваемыми другими методами.

Глава 1. Свойства на парсековых масштабах внегалактических источников с крутым и плоским широкополосными радиоспектрами

- Форма спектра: $S \sim \nu^\alpha$, α – спектральный индекс.
- Типы спектра:
 - 1) $\alpha < -0.5$ – крутой спектр (оптически тонкий);
 - 2) $\alpha > -0.5$ – плоский спектр (оптически толстый);
 - 3) спектр с пиком.
- РСДБ чувствительна только к компактным ($< \sim 0.1''$) источникам.
- Источники с плоским спектром считаются компактными (Blandford & Königl, 1979; Pearson & Readhead, 1988). $\Rightarrow$ предпочтительно отбирались для РСДБ-обзоров.
- Источники с крутым спектром в большинстве протяжённые. Но и среди них найдены компактные (Fanti et al., 1990).
Какова их доля? Каковы их свойства?
- Мы наблюдали на VLBA на 2 и 8 ГГц статистически полную выборку 482 радиоисточников с $S_{1.4\text{ГГц}} \geq 0.2$ Ян по каталогу NVSS и склонением $> +75^\circ$.
- Использовали ранее опубликованные широкополосные радиоспектры, полученные на РАТАН-600 (Мингалиев и др., 2007) и других антеннах: 90% - крутой спектр, 9% - плоский спектр, 1% - спектр с пиком.



Примеры спектров АЯГ, полученных на РАТАН-600



Связь спектра и структуры

Компактные структуры ($<0.1''$) продетектированы у 41/42 источников с плоским спектром,
5/5 — с пиковым спектром, 116/435 — с круто падающим спектром.

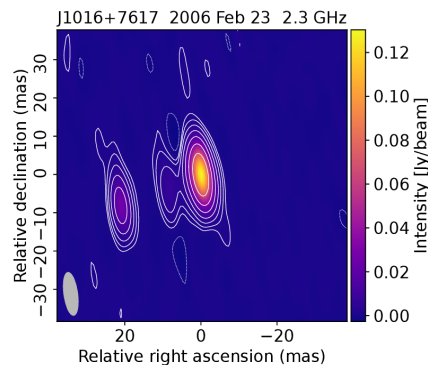
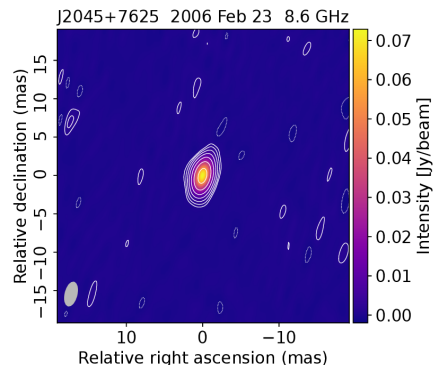
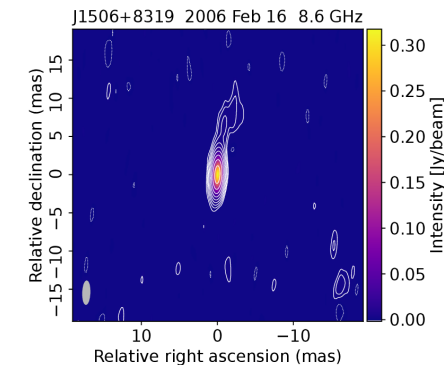
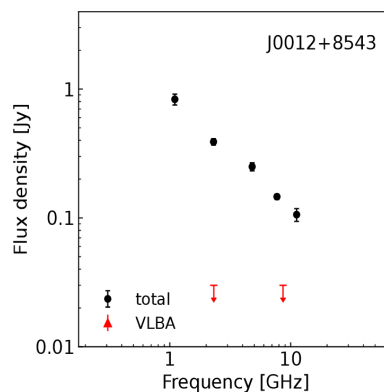
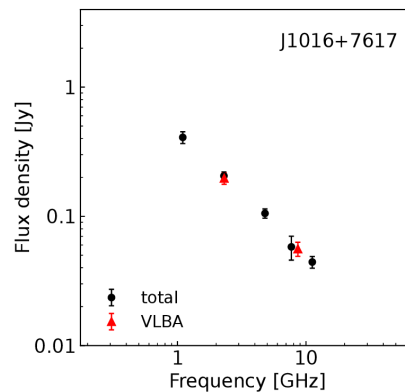
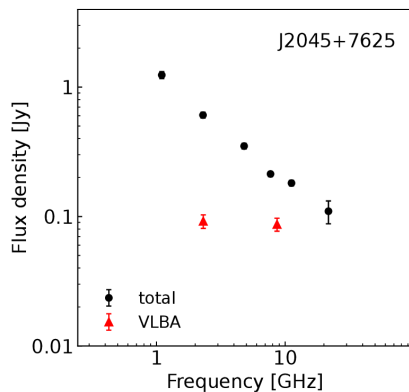
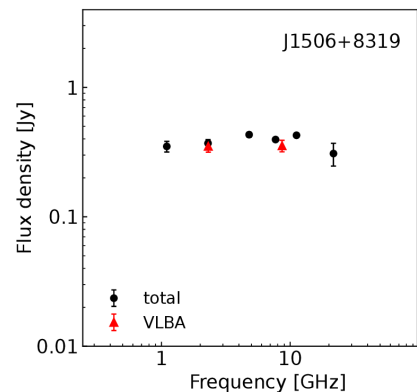
Состав полной выборки:

8% - плоские полный и
РСДБ спектры

7% - крутой или пиковый
полный спектр, плоский
РСДБ-спектр

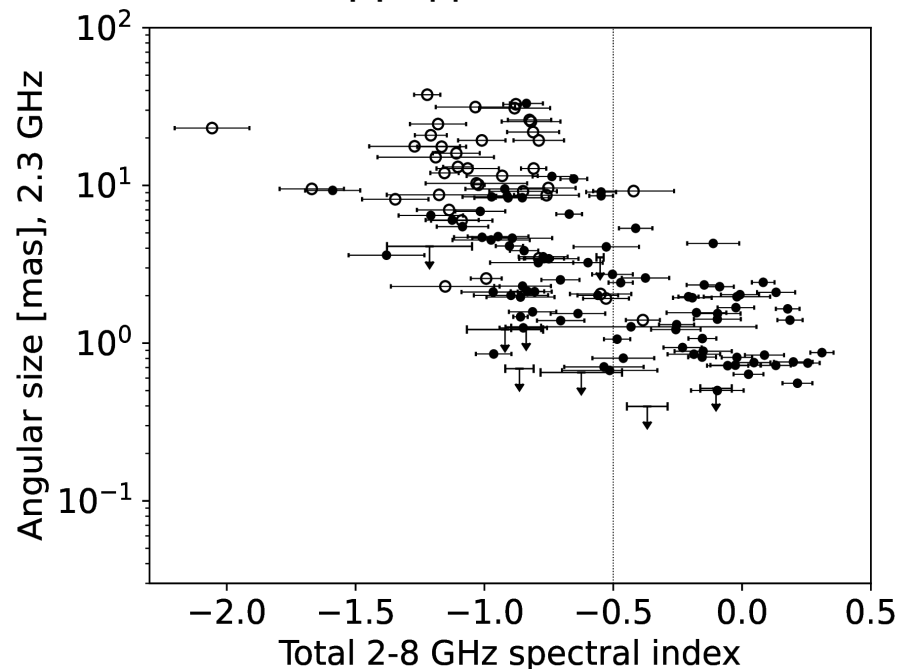
17% - компактные источники
с крутым спектром

66% - протяжённые
источники



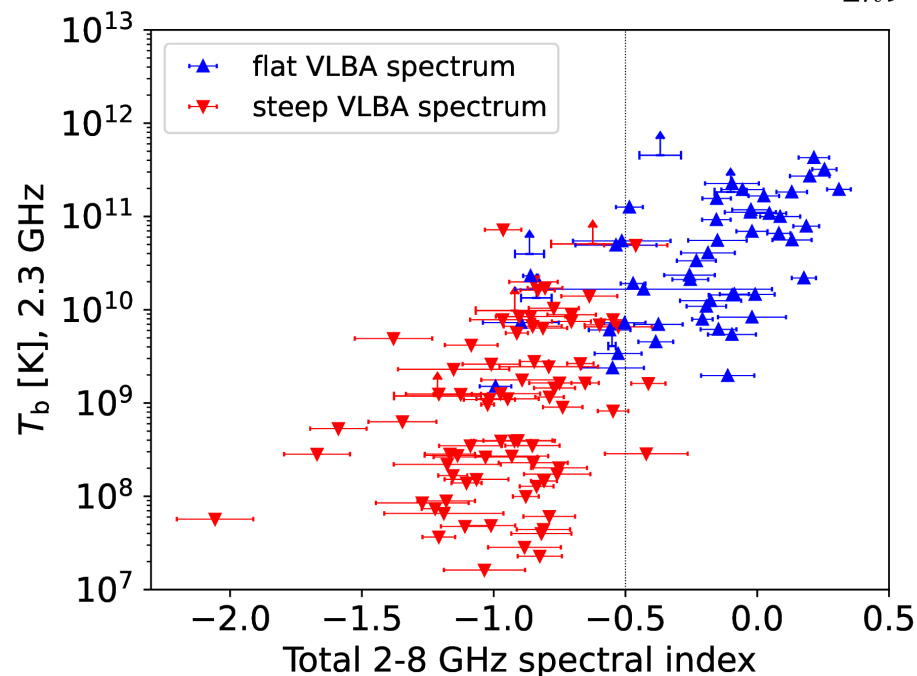
Корреляции со спектральным индексом

Угловой размер доминирующей
РСДБ-детали



$$\tau_{\text{Kendall}} = -0.47 \pm 0.06, p \approx 10^{-15}$$

Её яркостная температура $T_b \equiv \frac{c^2}{2k\nu^2} I_\nu$



$$\tau_{\text{Kendall}} = 0.51 \pm 0.06, p \approx 10^{-18}$$

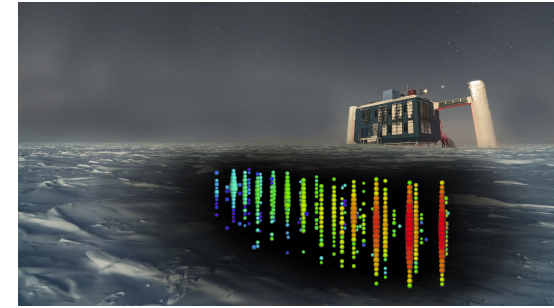
Чем сильнее доминирует ядро, тем более плоский спектр, меньше размер и выше T_b

Выводы по Главе 1

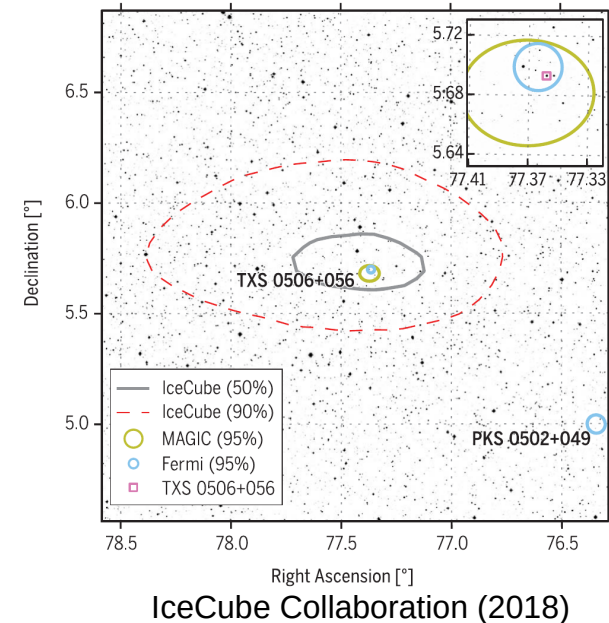
- Наблюдения статистически полной выборки подтвердили компактность практически всех источников с плоским и пиковым спектрами и показали, что $\sim 1/4$ источников с крутым спектром также имеют компактные структуры.
- 82 кандидата в компактные источники с крутым спектром – примерно половина компактных источников выборки.
- Найдены статистически значимые корреляции между параметрами структуры источников и их спектральным индексом – следствия перехода от плоского к крутому спектру при переходе от доминирования радиоядра джета в структуре к доминированию оптически тонких областей джетов и/или «мини-радиоушей» парсековых масштабов.
- Большое количество компактных источников с крутым спектром в выборке говорит о неполноте РСДБ-каталогов, построенных только по обзорам источников с плоским спектром: полнота 80% на уровне 200 мЯн, $< 80\%$ для более слабых источников.

Глава 2. Исследование нейтрино-ассоциированного блазара TXS 0506+056 в рамках мониторинга выборки блазаров на РАТАН-600

- IceCube – детектор нейтрино высоких энергий во льду под Южным полюсом.
- 22 сентября 2017 г. – нейтрино с энергией ≈ 290 ТэВ. Блазар TXS 0506+056: 0.1° от направления прихода, вспышка в гамма (IceCube Collaboration, 2018a).
- Анализ архивных данных: в 2014-2015 гг. 13 ± 5 событий выше фона. Значимость 3.5σ (IceCube Collaboration, 2018b).
- Но популяция гамма-ярких блазаров может объяснить только малую часть полного потока нейтрино (Murase et al., 2018; Yuan et al., 2019).
- TXS 0506+056 – исключение?



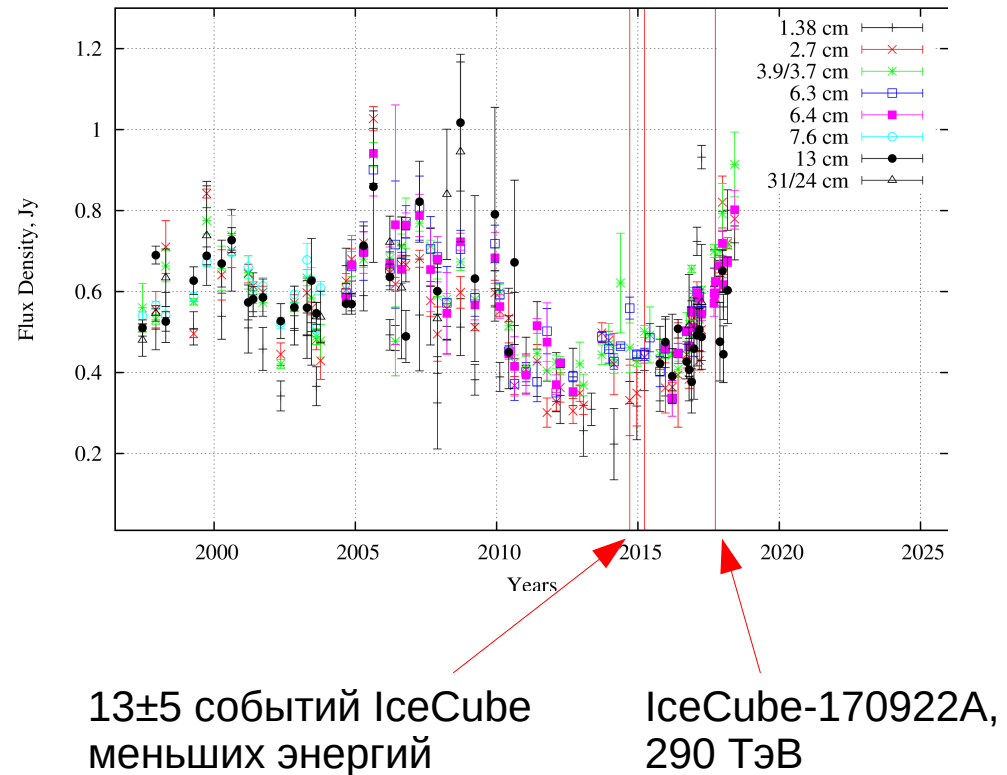
www.esa.int



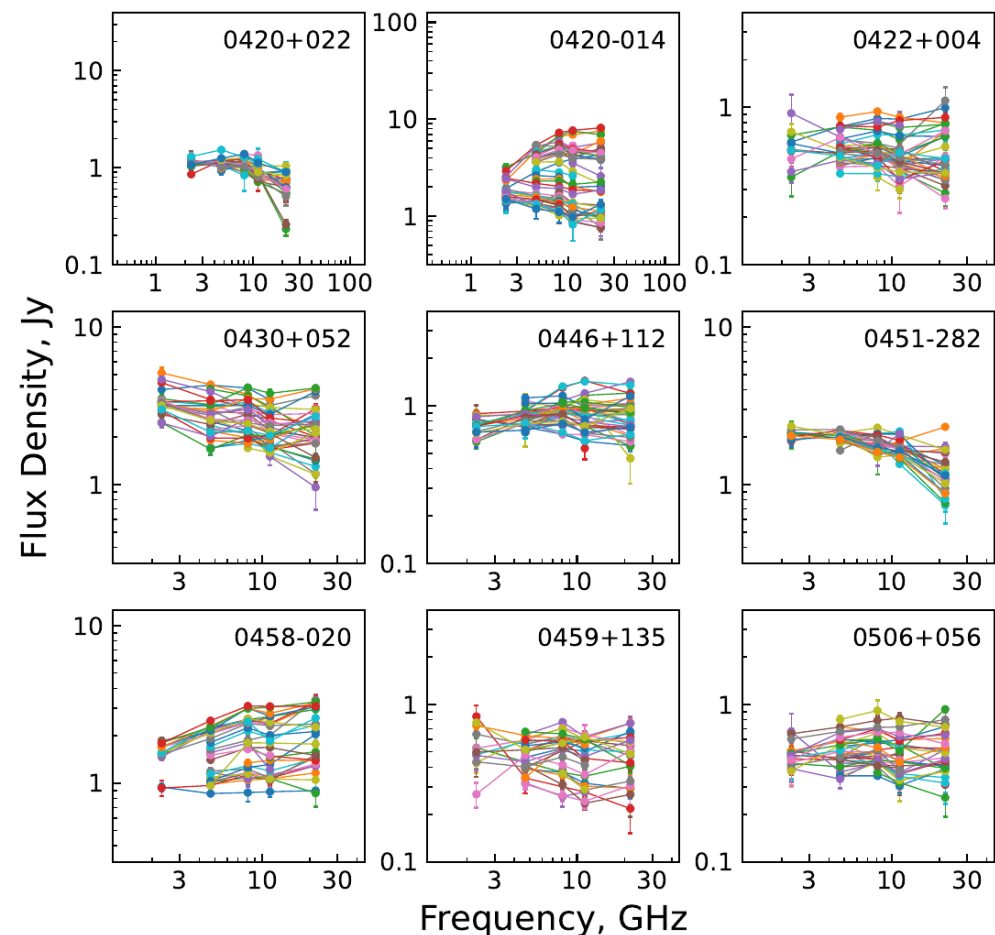
IceCube Collaboration (2018)

Наблюдения TXS 0506+056 на RATAN-600

- TXS 0506+056 наблюдается в рамках мониторинга на RATAN-600.
- Выборка: около 700 компактных АЯГ, полна до плотностей РСДБ-потока около 0.4 Ян.
- 4-6 частот от 1 до 22 ГГц, 68 эпох с 1997 по 2018 гг.
- Моменты прихода нейтрино соответствуют началу и развитию мощной вспышки – с 0.4 Ян в 2013 г. до 2 Ян в 2020 г.



TXS 0506+056 — типичный переменный блазар



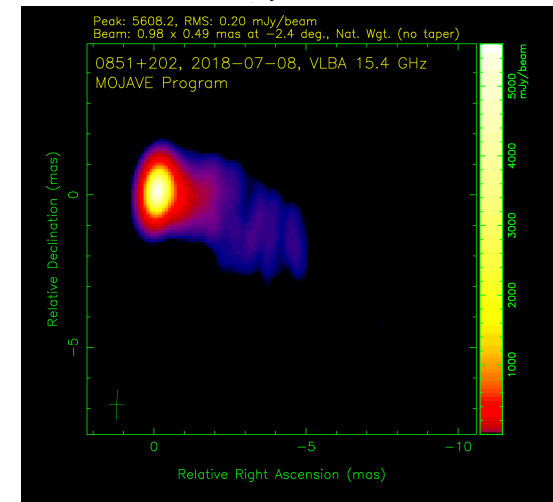
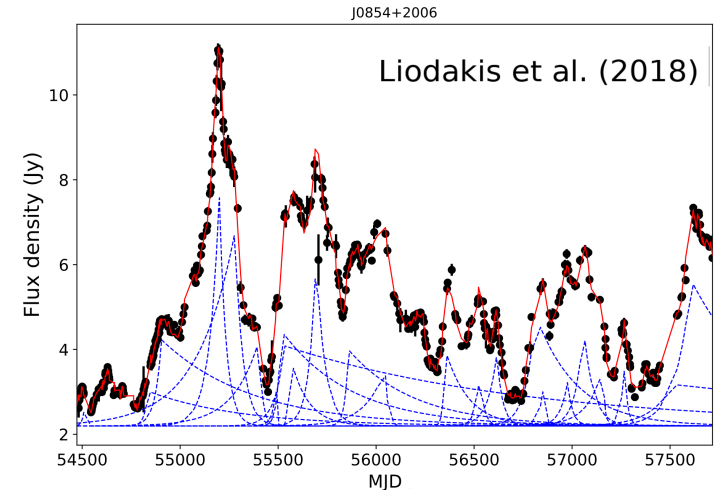
- Слева – примеры широкополосных спектров АЯГ, полученных на РАТАН-600 в 2009-2018 гг.
- Спектр TXS 0506+056 относится к классу суперплоских: $|\alpha| \leq 0.1$ на высоких частотах в большинство эпох.
- К этому классу относятся также спектры 20% из 700 источников выборки => типичный спектр.
- Переменность также типична.
- Следовательно, источниками нейтрино могут быть и другие блазары (см. Plavin et al., 2020, 2021; Novatta et al., 2021).
- Рождение нейтрино: реакция $p+\gamma$. Блазары должны ускорять протоны до релятивистских энергий. Синхротронное излучение протонов?

Выводы по Главе 2

- Нейтринные события в 2014-2015 и в 2017 годах, отождествлённые с блазаром TXS 0506+056, пришлись на период развития сильной вспышки в нём на сантиметровых длинах волн. Подтверждение ассоциации с нейтрино.
- Спектр источника является типичным для переменных АЯГ. Блазары могут давать существенный вклад в поток нейтрино высоких энергий.
- Указание на связь процессов генерации нейтрино и вспышек синхротронного радиоизлучения в ядрах блазаров. Необходимы релятивистские протоны в джете.

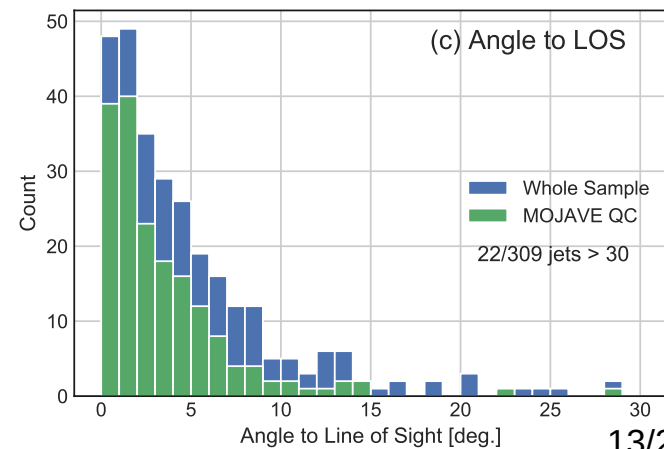
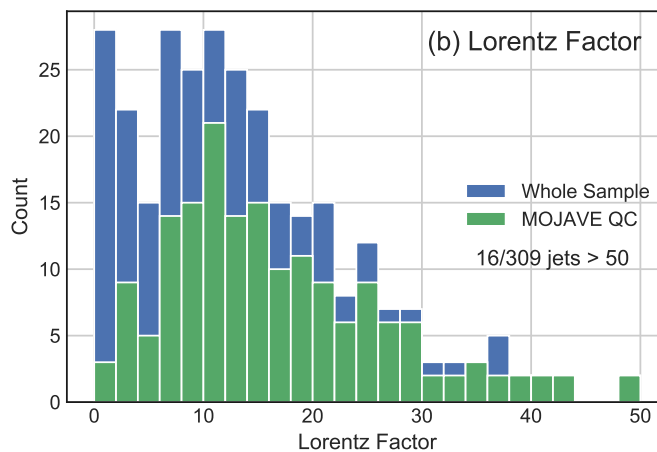
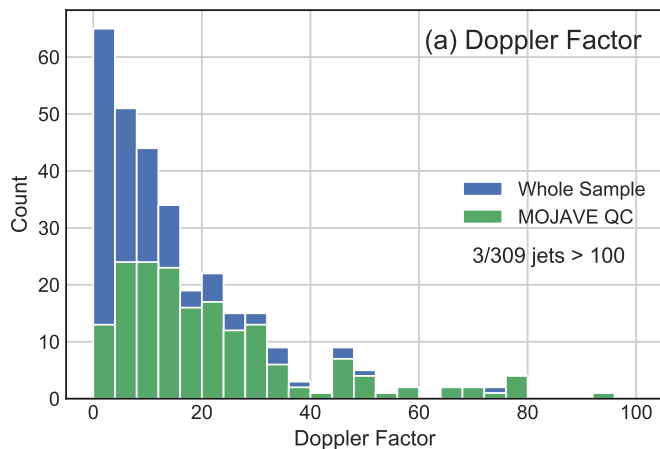
Глава 3. Оценка Доплер-фактора джетов по РСДБ-измерениям яркостной температуры для полной по плотности потока выборки АЯГ

- Доплер-фактор: $\delta = 1/[\Gamma(1 - \beta \cos\theta)]$,
Лоренц-фактор: $\Gamma=(1-\beta^2)^{-1/2}$, $\beta=v/c$
- Джеты АЯГ – синхротронный континуум, прямое измерение невозможно.
- Косвенные методы:
 - по яркостной температуре из характерного времени переменности (Hovatta et al. 2009; Liodakis et al. 2017, 2018)
 - по времени угасания «сверхсветовых» РСДБ-компонент джета (Jorstad et al., 2017)
 - по яркостной температуре из РСДБ (эта работа)
 - другие: отношение джет/контрджет, отношение рентген/радио, популяционный синтез
- Ранее: значительные расхождения между методами. Какие значения истинные?



Измерение яркостной температуры в проекте MOJAVE

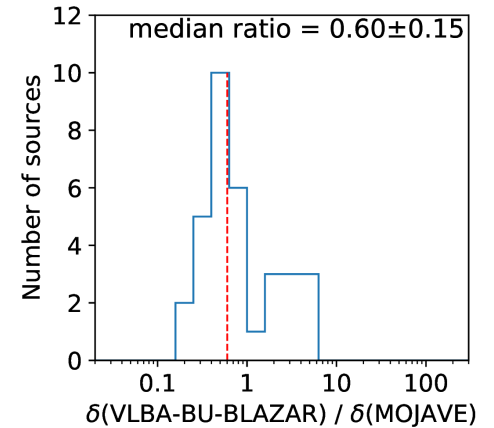
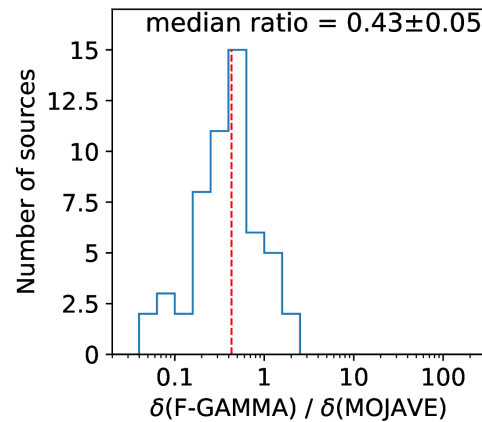
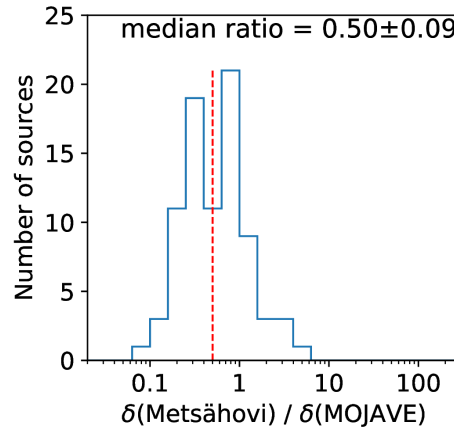
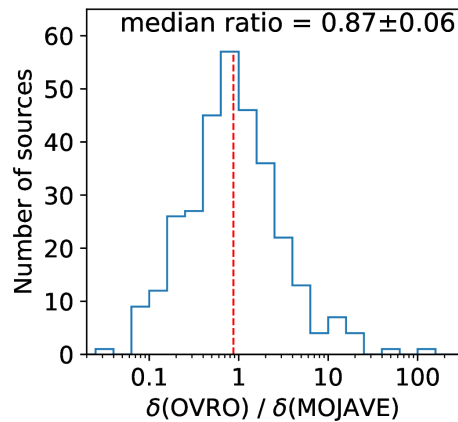
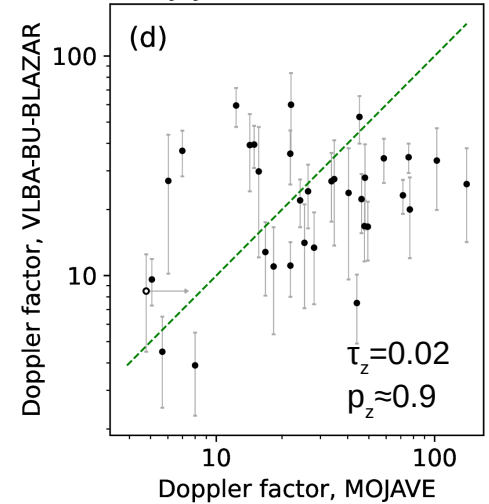
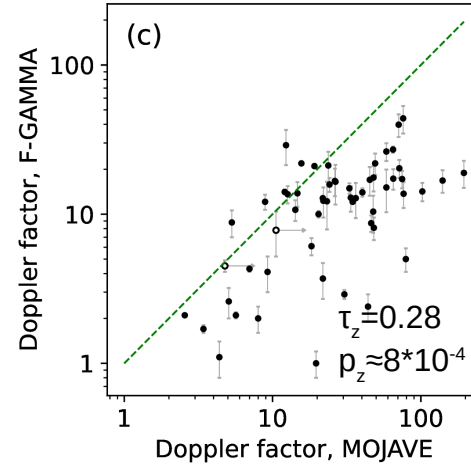
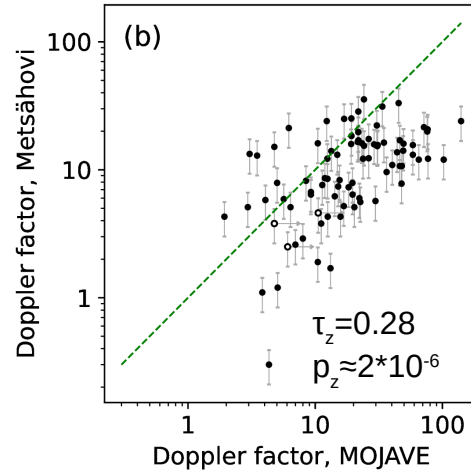
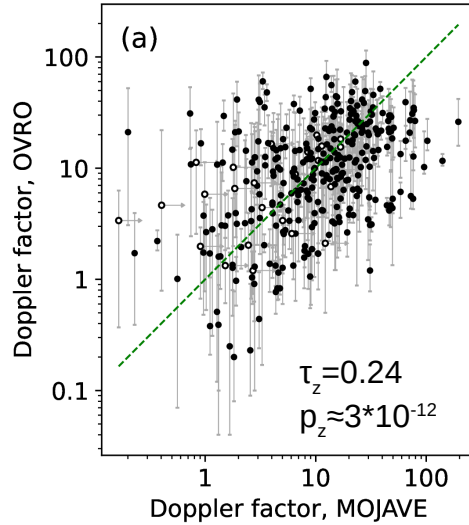
- VLBA-обзор на 2 см + MOJAVE (**M**onitoring **O**f **J**ets in **A**ctive Galactic Nuclei with **VLBA** **E**xperiments): ≈ 25 лет РСДБ-мониторинга сотен АЯГ. До 1.5 Ян — полная выборка.
- Измерения медианной яркостной температуры радиоядра для 447 АЯГ.
- Измерения видимой скорости джета для 309 АЯГ: $\beta_{\text{obs}} = \beta \sin\theta / (1 - \beta \cos\theta)$.
Предположение: β_{obs} характеризует течение плазмы в джете.
- $\delta = T_b / T_{b, \text{int}}$. Предположение: $T_{b, \text{int}}$ единая для выборки.
- Определена $T_{b, \text{int}} = (4.1 \pm 0.6) \cdot 10^{10}$ К — близко к равномерному (Readhead, 1994).



Сравнение Доплер-факторов

по моделированию полных кривых блеска

по времени угасания
РСДБ-компонент



Выводы по Главе 3

- Значения Доплер-фактора джетов АЯГ, определённые двумя независимыми методами для разных состояний одних и тех же источников при различных предположениях – по медианной яркостной температуре радиоядра и из моделирования вспышек – согласуются в пределах погрешностей методов.
- Это повышает доверие к обоим методам, давая основания для использования полученных Доплер-факторов в различных задачах.
- Величина оценённых Доплер-факторов недостаточна, чтобы объяснить экстремальные яркостные температуры до 10^{14} К, открытые “РадиоАстроном”.

Положения, выносимые на защиту

1. В статистически полной выборке 482 активных ядер галактик с интегральной плотностью потока на частоте 1.4 ГГц более 200 мЯн и склонением $\geq +75^\circ$ исследована связь между структурой и широкополосным радиоспектром. Компактные структуры масштабов сотен парсек и менее были обнаружены в 100% источников с пиковой формой спектра, 98% источников с плоским спектром и 27% источников с круто падающим спектром. Продемонстрировано, что РСДБ-компактные внегалактические радиоисточники состоят из двух классов объектов примерно равной численности: блазаров, у которых в радиоизлучении доминирует оптически непрозрачное радиоядро джета, и компактных источников с круто падающим РСДБ-спектром, у которых доминируют оптически прозрачные джеты или облака плазмы парсековых масштабов. Это подтверждается обнаруженными статистически значимыми отрицательной корреляцией углового размера компактных компонент со спектральным индексом и положительной корреляцией яркостной температуры со спектральным индексом.

2. На основании многолетних многочастотных наблюдений на РАТАН-600 блазара TXS 0506+056, ассоциированного ранее с источником нейтрино высоких энергий, найдено, что его широкополосный радиоспектр относится к классу плоских и является типичным для переменных АЯГ. Нейтринные события в 2014-2015 и в 2017 годах, отождествлённые с этим блазаром, пришлись на период начала и развития в нём сильной вспышки на сантиметровых длинах волн. Это независимо подтверждает, что данный блазар является вероятным источником высокоэнергичных нейтрино, и указывает на связь процессов генерации нейтрино и вспышек синхротронного радиоизлучения в ядрах блазаров.

3. Определено, что значения Доплер-фактора джетов АЯГ, полученные для большой статистически полной выборки по РСДБ-измерениям яркостной температуры их ядер, согласуются со значениями, независимо определёнными ранее из анализа вспышек радиоизлучения, в пределах погрешностей методов. Типичное значение Доплер-фактора составляет около 10. Это соответствует независимым оценкам, полученным из анализа РСДБ-кинематики джетов. Делается вывод о достоверности полученных оценок Доплер-фактора.

Публикации и личный вклад

1. *Popkov A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y., Kovalev Y. A.* Parsec-scale Properties of Steep- and Flat-spectrum Extragalactic Radio Sources from a VLBA Survey of a Complete North Polar Cap Sample // **Astronomical Journal**. – 2021. – Vol. 161, no. 2. – id. 88.

Вклад диссертанта основной и включает обработку РСДБ-данных в пакетах AIPS и Difmap, астрофизический анализ результатов, обсуждение и подготовку публикации.

2. *Kovalev Y. A., Kardashev N. S., Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V., Voitsik P. A., Edwards P. G., Popkov A. V. et al.* RATAN-600 and RadioAstron reveal the neutrino-associated blazar TXS 0506+056 as a typical variable AGN // **Advances in Space Research**. – 2020. – Vol. 65, no. 2. – P. 745—755.

Вклад диссертанта заключается в участии в подготовке расписаний и сопровождении наблюдений на РАТАН-600 и в участии, наравне с другими соавторами, в проведении анализа, обсуждении результатов и подготовке публикации.

3. *Homan D. C., Cohen M. H., Hovatta T., Kellermann K. I., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Popkov A. V. et al.* MOJAVE. XIX. Brightness Temperatures and Intrinsic Properties of Blazar Jets // **Astrophysical Journal**. – 2021. – Vol. 923, no. 1. – id. 67.

Вклад диссертанта заключается в анализе полученных оценок Доплер-фактора для выборки АЯГ, определении величины и значимости систематических сдвигов результатов, а также в участии, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.

Спасибо за внимание!

Ответы на замечания

- В подрисуночной подписи Рис. 1.2, а также на вертикальной оси соответствующих примеров указано, что приведена «интенсивность в центральном пикселе карты». По-видимому, имеется в виду фазовый центр изображения.

Да, имелось в виду значение интенсивности в пикселе, соответствующем фазовому центру изображения.

- В формуле (1.4) для оценки верхнего предела на угловой размер главной структурной детали изображения неясно как рассчитывался параметр «сигнал/шум карты в области, занятой главной компонентой», если модельный размер последней очень мал. По-видимому, использовалась область большая, чем занимаемая главной компонентой. Насколько большая?

Использовалась область, занимаемая свёрткой компоненты с диаграммой направленности CLEAN-карты. Размер области определялся по уровню половины мощности. Данная методика оценки предельного размера компоненты описана в работе Kovalev et al. (2005), ссылка на которую дана под формулой (1.4) в тексте диссертации.

Ответы на замечания

- *В качестве рекомендации на будущее хотелось бы пожелать диссертанту испытать для восстановления РСДБ-изображений АЯГ методы, основанные на методах амплитудного картографирования (без учета фазовой информации) в сочетании с методом максимальной энтропии в тех случаях, когда применение традиционных методов самокалибровки и CLEAN не дает желаемого результата.*

Согласен. Мы рассматриваем возможность применения в будущих исследованиях различных вариантов регуляризованного метода максимального правдоподобия, в том числе метода максимальной энтропии. Они реализованы, например, в пакетах eht-imaging и SMILI, разработанных для анализа данных Телескопа Горизонта Событий. Одним из достоинств данных пакетов является то, что в них есть возможность проводить картографирование по замкнутым амплитудам и фазам функции видности, что уменьшает влияние погрешностей измерений функции видности на результат.