

Влияние эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде Галактики на наблюдаемые свойства струй активных ядер галактик

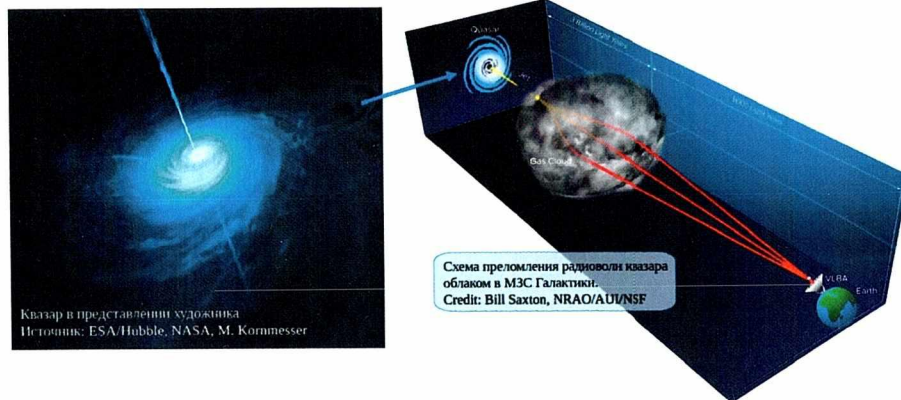
Корюкова Татьяна Андреевна

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

Научный руководитель:
Пушкарёв Александр Борисович,
доктор физ.-мат. наук, проф. РАН

Москва, 2026

Распространение радиоизлучения в МЗС



Квазар в представлении художника
Источник: ESA/Hubble, NASA, M. Kornmesser

Рассеяние радиоволн на неоднородностях **ионизированной плазмы** вызывает эффекты, особенно заметные при наблюдениях компактных ярких радиоисточников, таких как пульсары, мазеры и **активные ядра галактик (АЯГ)**.

Межзвездная среда



Сотни миллиардов звезд в Галактике погружены в неоднородную межзвездную среду (МЗС), которая включает:

- газ: молекулярный, атомарный, **ионизованный**,
- пыль и др.

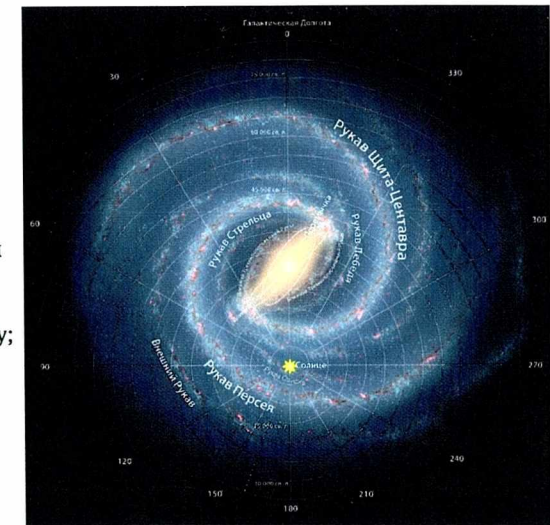
Круговорот материи и энергии между звездами и МЗС поддерживает ее неоднородную структуру.

2

Активные ядра галактик – зонды МЗС

Преимущества АЯГ для зондирования МЗС:

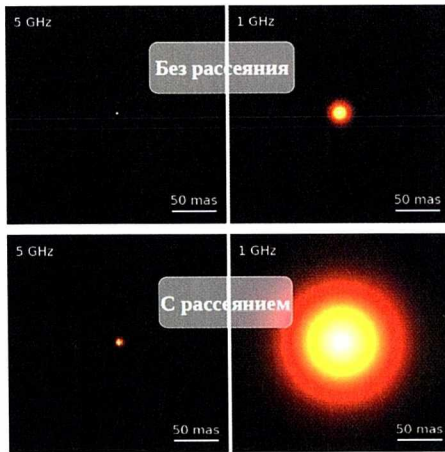
- + мощные, компактные внегалактические источники радиоизлучения;
- + зондируют МЗС на всю глубину и во всех направлениях;
- + равномерно распределены по небу;
- + десятки тысяч источников по данным РСДБ-наблюдений, более 100 000 источник-эпох.



4

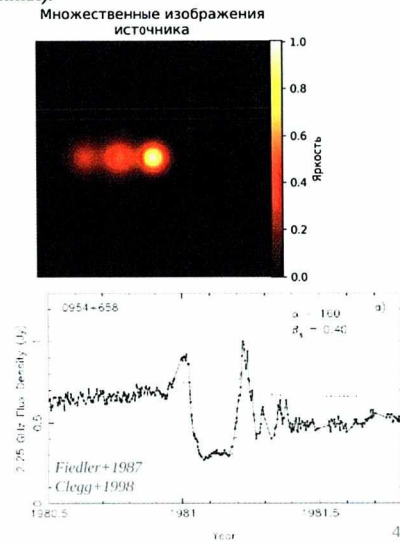
Эффекты распространения радиоизлучения в МЗС

• **дифракционные** (напр. угловое уширение размера)



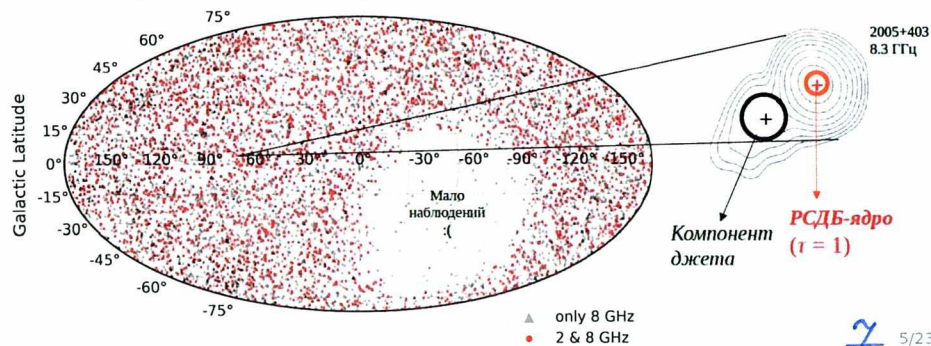
$\theta \propto \nu^{-1}$ – без рассеяния (Blandford & Konigl 1979)
 $\theta \propto \nu^{-2}$ – с рассеянием (Goodman & Narayan 1985)

• **рефракционные** эффекты (напр. множественные изображения источника, события экстремального рассеяния).



Наблюдательные данные

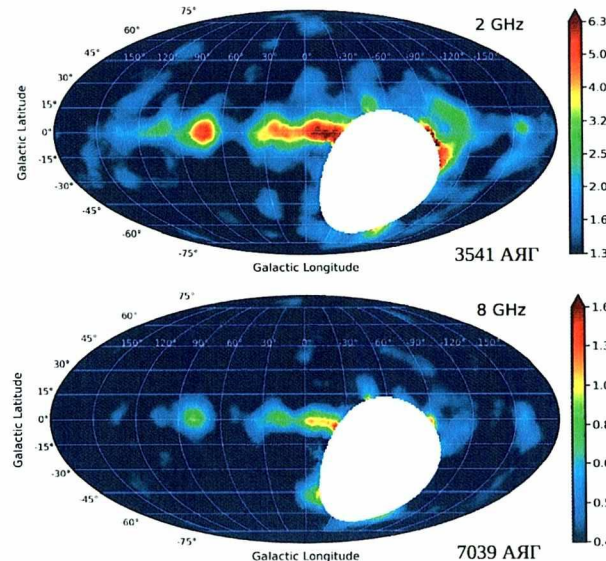
- Анализ основан на архивных РСДБ-наблюдениях АЯГ в диапазоне частот от 1.4 до 86 ГГц, собранных в базе данных Astroge0 (http://astroge0.org/vlbi_images/).
- РСДБ-ядро – видимое начало джета ($\tau = 1$) или самая яркая по плотности потока компонента модели.
- Моделирование структуры АЯГ двумя круговыми гаусс-компонентами.
- Набор данных содержит 8959 источников, 61230 индивидуальных наблюдений с 1994 по 2022 год, большинство из которых на 2, 5 и 8 ГГц.



Глава 1:
 Исследование рассеивающих свойств межзвездной среды Галактики на основе данных измерений угловых размеров активных ядер галактик

6

Карты распределения размеров ядер АЯГ на 2 и 8 ГГц



– Размер источников увеличивается по мере приближения к плоскости Галактики ($|b| \leq 10^\circ$) =>

Эффект углового уширения размера АЯГ на 2 ГГц.

– Угловое уширение зависит не только от галактической широты b , но и от долготы l =>

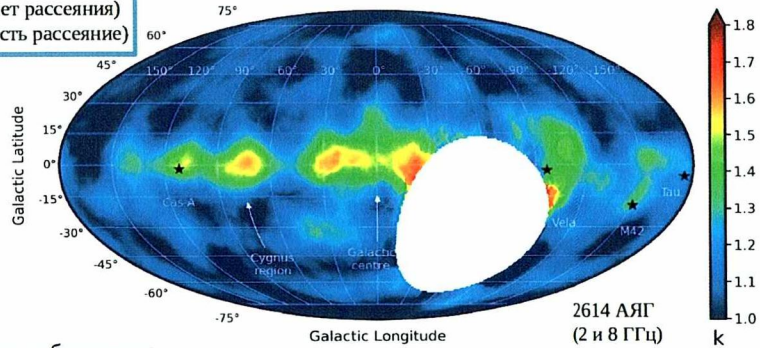
неравномерное распределение рассеивающих экранов в Галактике.

8 6/23

Первая подробная карта распределения рассеивающих экранов в МЗС Галактики

$$\theta_{\text{core}} \propto \nu^{-k}$$

$k = 1$ (нет рассеяния)
 $k = 2$ (есть рассеяние)



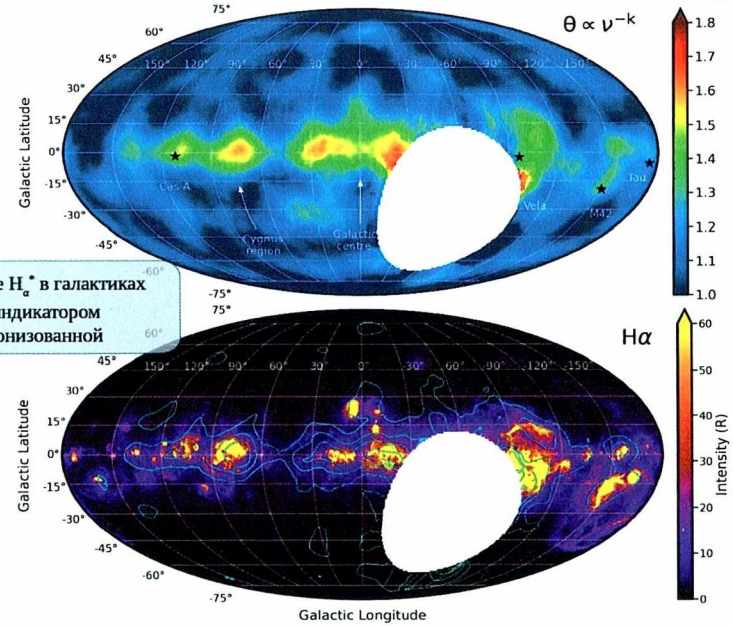
На карте наблюдается:

- неоднородное распределение рассеивающих экранов в плоскости Галактики,
- 30% источников в плоскости Галактики ($|b| \leq 10^\circ$) не подвержены значительному рассеянию,
- области сильного рассеяния позиционно связаны с объектами:
 - центр Галактики (СМЧД Стрелец А*) и галактический бар,
 - область в направлении созвездия Лебедь,
 - некоторые остатки сверхновых и туманности.

9

7/23

Пространственная корреляция θ и k с распределением N_{α}



Излучение N_{α} в галактиках является индикатором горячей ионизованной плазмы.

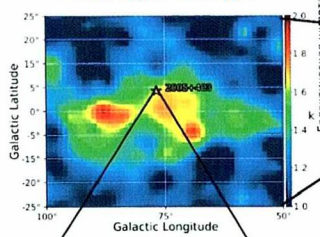
N_{α} , Finkbeiner + 2003

10

8/23

Карта распределения мощности рассеяния радиоизлучения в Галактике

Область в направлении созвездия Лебедь



В направлении области созвездия Лебедь наблюдаются:

- объекты на разных фазах звездообразования и звездной эволюции;
- области HII;
- ОВ-звезды;
- остатки сверхновых и т.д.

А также квазар 2005+403 (J2007+4029).

- красное смещение: $z = 1.7$;
- галактические координаты: $b = 4.3^\circ$, $l = 76.8^\circ$.

11

9/23

Глава 2:

Исследование эффектов рассеяния радиоизлучения с преобладанием рефракции

12

Наблюдательные данные

Анализ основан на данных многоэпоховых РСДБ-наблюдений квазара 2005+403 в диапазоне частот от 1.4 до 43.2 ГГц.

Epoch (1)	Project Code (2)	ν (GHz) (3)
1997-01-10	BF025A	2.27, 8.34
2010-11-05	BG196H	1.39
2012-01-02	MOJAVE	15.4
2017-07-12	BG246T	1.46, 1.81, 2.56, 4.98
2019-02-20	BG258G	1.46, 1.81, 2.56, 4.98
2019-03-24	BH222E	1.46
2019-10-15	BP240A	23.77
2019-12-21	BP240C	43.17



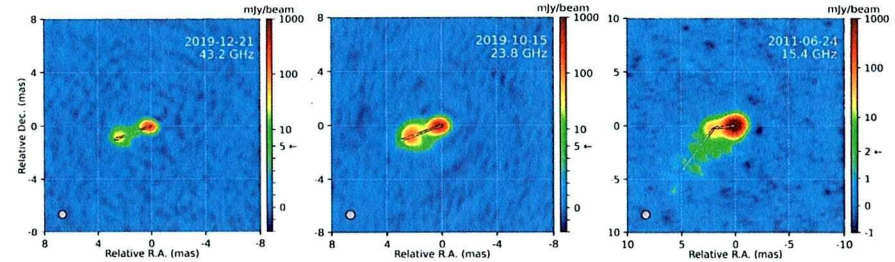
Very Long Baseline Array (VLBA) – радиointерферометр Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO) США, состоящий из 10 антенн.

Классическая схема обработки РСДБ-данных:

- 1) Первичная калибровка функции видности (амплитуды и фазы сигнала) с помощью пакета программ AIPS NRAO с использованием стандартных подходов. Актуальная схема обработки представлена на сайте <https://www.aips.nrao.edu/CookHTML/CookBookap3.html>.
- 2) Гибридное картографирование в Difmap с помощью алгоритма CLEAN: фазовая и амплитудная самокалибровка для восстановления распределения яркости по наблюдаемому источнику.
- 3) Моделирование структуры источника в (u, ν) плоскости в пакете Difmap с помощью процедуры *modelfit* с использованием гаусс-компонент.

13
10/23

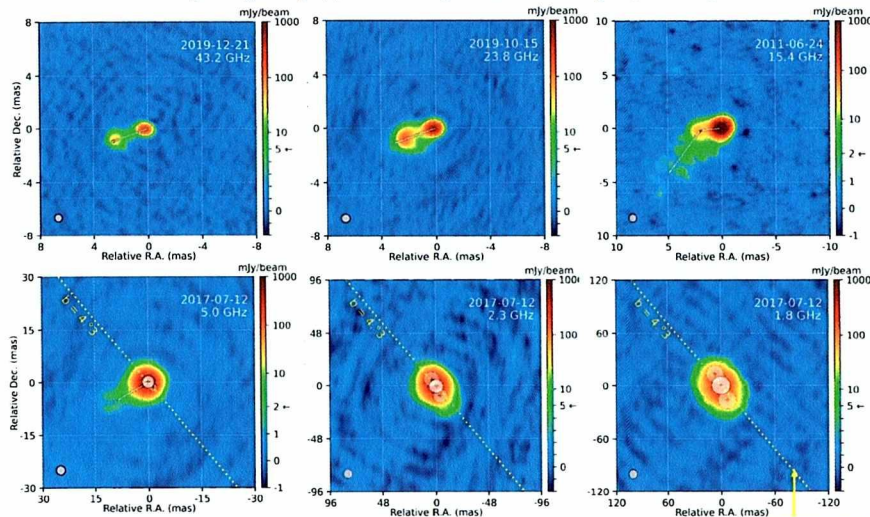
Карты распределения яркости квазара (VLBA)



- АЯГ – односторонняя морфология ядро-джет в миллисекундном масштабе
- Позиционный угол джета $\sim 110^\circ$

14
11/23

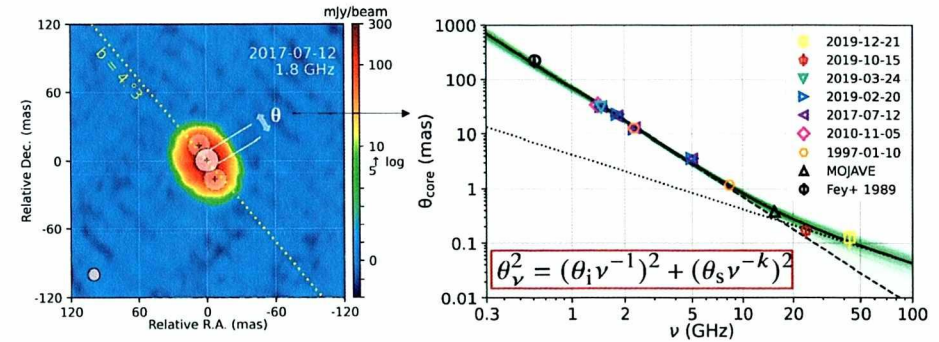
Карты распределения яркости квазара (VLBA)



- АЯГ – односторонняя морфология ядро-джет в миллисекундном масштабе
- Позиционный угол джета $\sim 110^\circ$
- Нетипичная морфология на низких частотах, имеющая выделенное направление
- Вторичные изображения смещены вдоль $b = 4.3^\circ \Rightarrow$ орбитальное движение линзы в Галактике.

15
11/23

Частотная зависимость размера РСДБ-ядра



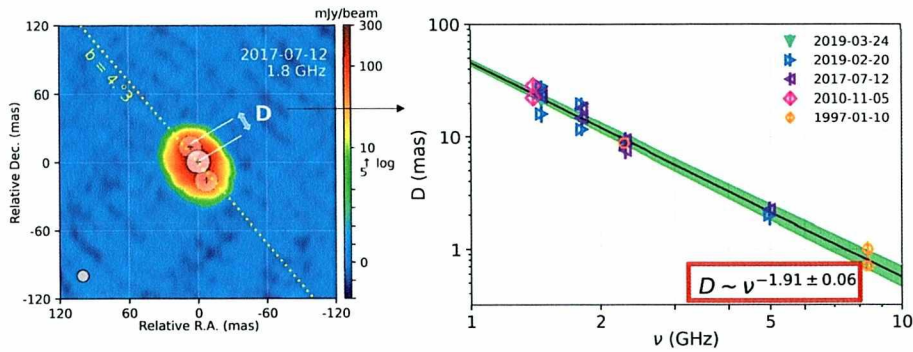
- $\theta \propto \nu^{-2} \ll$ угловое уширение размера источника \ll дифракционное рассеяние радиоволн, прошедших через линзу с гауссовым распределением плотности свободных электронов.

Результат подгонки:

- $k = 2.00 \pm 0.08$
- $\theta_1 = 4.2 \pm 1.5$ мсек дуги (1 ГГц)
- $\theta_s = 70.1 \pm 5.7$ мсек дуги (1 ГГц)

16
12/23

Частотная зависимость расстояния РСДБ-ядро – субизображение

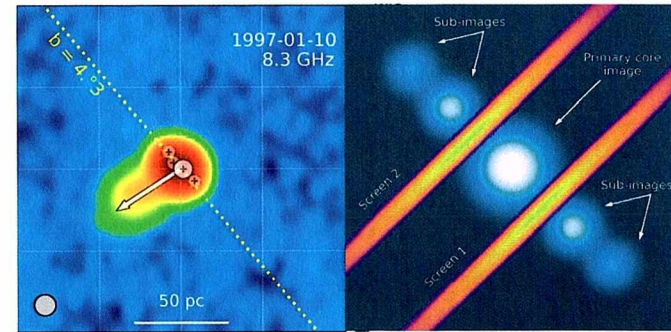


– $D \propto \nu^{-2} \Rightarrow$ иерархия ложных изображений формируется за счет рассеяния в МЗС и не связана с излучением источника.

– Если нет рассеяния: $D \propto \nu^0$, т.к. D между ядром и оптически тонким компонентом выброса будут иметь слабую частотную зависимость, определяемую эффектом сдвига ядра из-за синхротронного самопоглощения АЯГ.

17 13/23

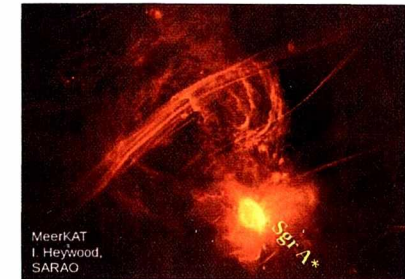
Природа рассеивающих экранов



Наблюдаемая картина свидетельствует, что:

1. экран, вероятно, имеет плоскую геометрию,
2. преимущественно ориентирован перпендикулярно плоскости Галактики,
3. на луче зрения находится несколько рассеивающих экранов.

- ионизованные филаменты [1]
- слои или волокна плазмы, вытянутые вдоль луча зрения [2,3]
- фронты ударных волн остатков сверхновых [4]

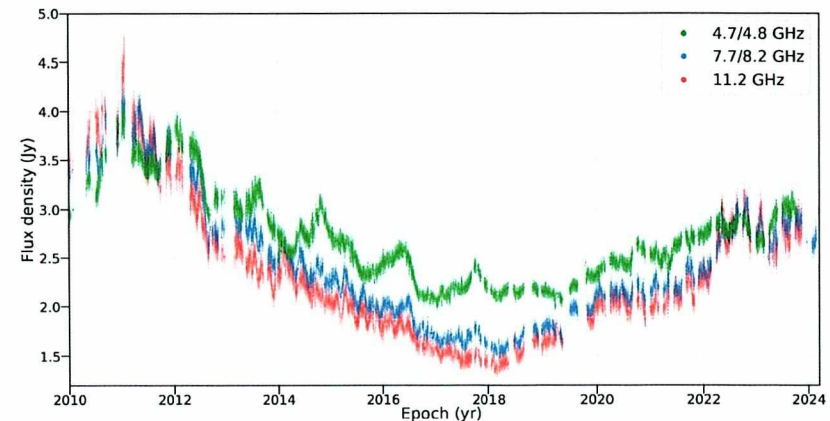


[1] Churazov+2023 [3] Kempster+2024
[2] Jow+2023 [4] Romani+1987 14/23

18

Мониторинг 2005+403 на радиотелескопе РАТАН-600

- почти ежедневные наблюдения с 2010 по 2024 г. на 4.7/4.8, 7.7/8.2 и 11.2 ГГц;
- относительные ошибки плотностей потока 3–5%;
- долгопериодическая переменность плотности потока;
- переменность на масштабах ≤ 1 года может быть связана с рассеянием.

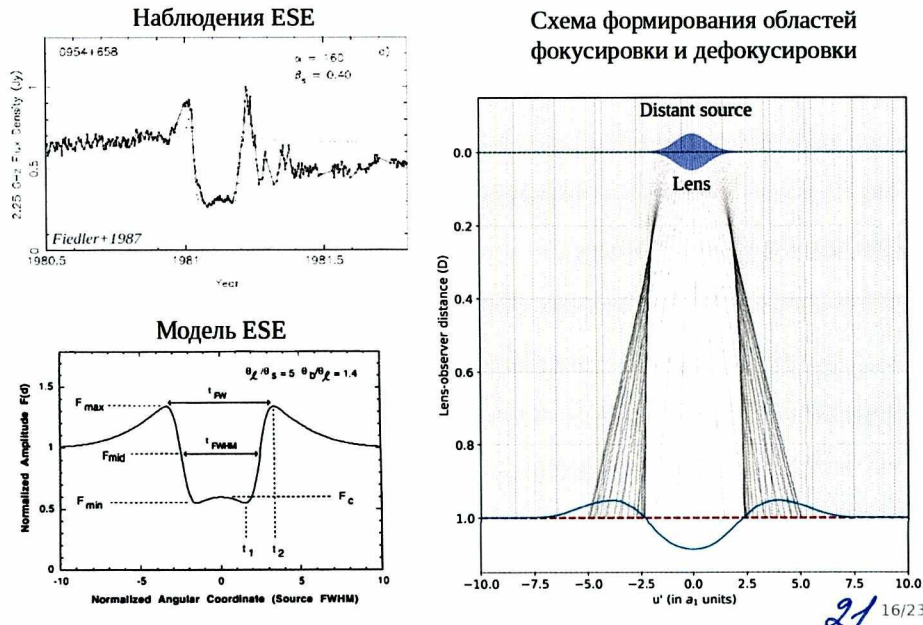


19

20

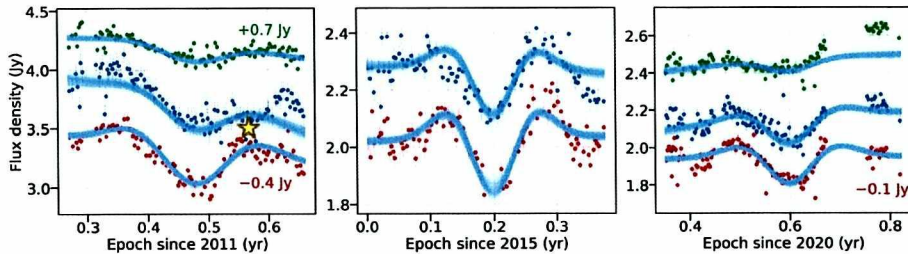
Глава 3:
Зондирование свойств рассеивающих экранов в направлении квазара 2005+403 с помощью долгосрочных многочастотных наблюдений РАТАН-600

События экстремального рассеяния на кривых блеска АЯГ



21 16/23

Моделирование событий экстремального рассеяния



Подгонка кривых блеска с помощью ESE-моделей (Fiedler+1994, Clegg+1998) на 4.7/4.8, 7.7/8.2 и 11.2 ГГц позволила:

1) оценить средние физические параметры линз:

- угловой размер: 0.3 ± 0.1 мсек дуги
- линейный размер: 0.6 ± 0.1 а.е.
- собственное движение: 8.3 ± 0.7 мсек дуги/год
- скорость движения в проекции на небо: 70 ± 6 км/с ($D = 1.8$ кпк, Rygl+2018)
- плотность свободных электронов $\sim 1200 \pm 120$ см⁻³
- масса $(0.8 \pm 0.4) \times 10^{-15} M_{\odot}$

2) восстановить истинный размер источника*:

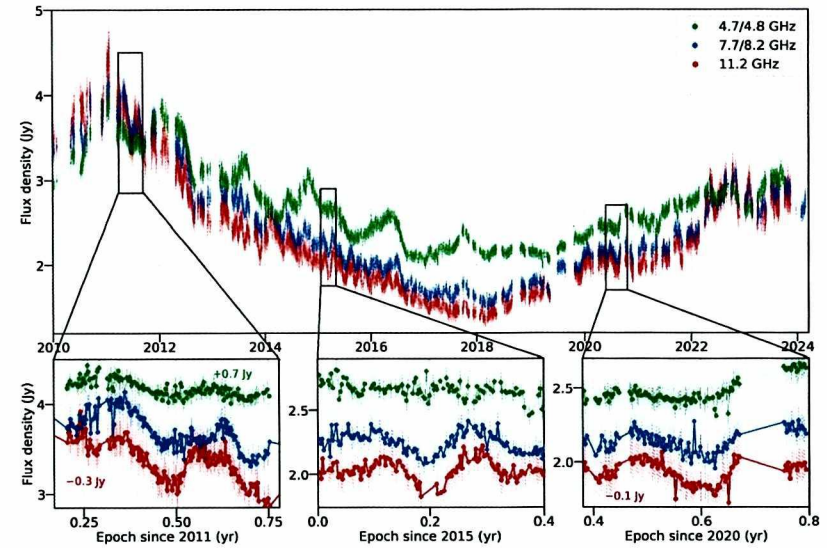
4.7/4.8 ГГц	1.57 ± 0.14 мсек дуги
7.7/8.2 ГГц	0.95 ± 0.08 мсек дуги
11.2 ГГц	0.68 ± 0.04 мсек дуги

*с учетом зависимости $\theta \propto \nu^{-1}$.

23

18/23

Обнаружение событий рассеяния на кривых блеска PATAH-600

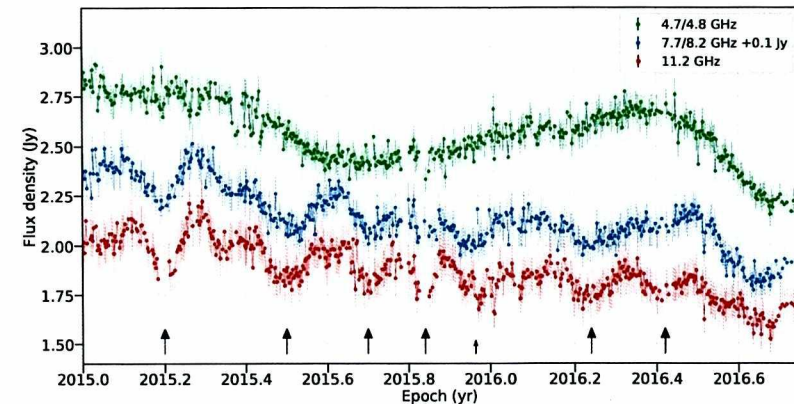


- симметричные модуляции плотности потока,
- длительность ~ 4 месяца,
- амплитуда достигает 10%,
- одновременно на нескольких частотах.

17/23

22

Первое обнаружение множественных событий рассеяния на кривых блеска квазара

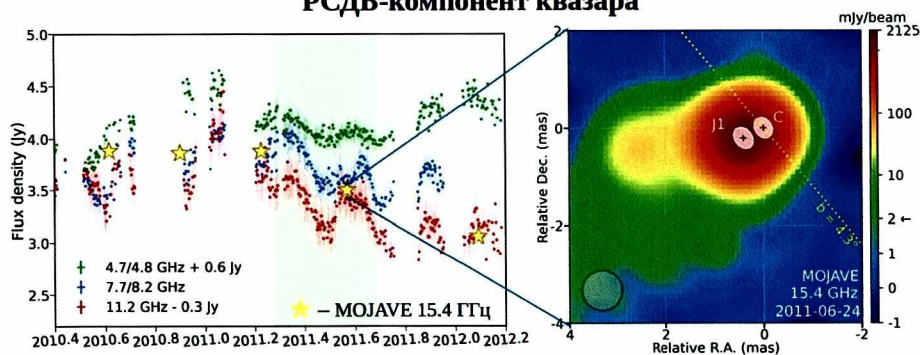


- 6 ESE-подобных вариаций подряд в период 2015.0 – 2016.6 гг.,
- Модуляции не наблюдаются на самой низкой частоте,
- Различаются по форме, амплитуде и продолжительности,
- Возможные причины:
 - многокомпонентная структура источника;
 - неоднородная структура экрана.

24

19/23

Первое обнаружение анизотропного рассеяния двух РСДБ-компонент квазара



- MOJAVE 15.4 ГГц: наблюдается два ярких компонента в начале джета на расстоянии 0.5 мсек дуги друг от друга,
- Обнаружено анизотропное рассеяние двух РСДБ-компонент выброса,
- Множественная структура источника => искажение ESE на 7.7/8.2 ГГц,
- Сложная структура источника может создавать несколько ESE подряд в 2015 – 2016 гг.

25 20/23

Публикации по теме работы

Результаты по теме диссертации изложены в трех статьях:

- 1) **Koryukova T. A., Pushkarev A. B., Plavin A. V., Kovalev Y. Y.** Tracing Milky Way scattering by compact extragalactic radio sources // *MNRAS*. – 2022. – сент. – т. 515, № 2. – с. 1736–1750.
- 2) **Koryukova T. A., Pushkarev A. B., Kiehlmann S., Readhead A. C. S.** Multiple imaging of the quasar 2005 + 403 formed by anisotropic scattering // *MNRAS*. – 2023. – дек. – т. 526, № 4. – с. 5932—5948.
- 3) **Koryukova T. A., Trushkin S. A., Pashchenko I. N., Pushkarev A. B.** Probing plasma scattering screens towards the quasar 2005+403 with long term RATAN-600 observations // *MNRAS*. – 2025. – авг. – т. 542, № 4. – с. 2733—2751.

27 22/23

Положения, выносимые на защиту

1. По данным массовых РСДБ-наблюдений построена первая подробная карта распределения рассеивающих свойств межзвездной среды Галактики по небу. Самое сильное рассеяние обнаружено в направлении области центра Галактики и созвездия Лебедя. Обнаружена значимая пространственная корреляция между участками Галактики, характеризующимися высокой интенсивностью излучения в линии H α , с областями сильного рассеяния.
2. Обнаружены анизотропные морфологические особенности в наблюдаемой структуре квазара 2005+403, вызванные формированием вторичных изображений яркого компактного компонента. Угловой размер РСДБ-ядра, а также угловое расстояние между ядром и его субизображениями масштабируются как квадрат длины волны, что доказывает их происхождение вследствие рассеяния, а не внутренних изменений в источнике. По данным РСДБ-наблюдений квазара на частоте 15.4 ГГц впервые обнаружено анизотропное рассеяние двух РСДБ-компонент выброса одновременно.
3. На кривых блеска, полученных на радиотелескопе RATAN-600, обнаружены многочастотные модуляции плотности потока, отождествленные с событиями экстремального рассеяния. Получены оценки физических параметров рассеивающих линз: угловой и линейный размеры 0.3 ± 0.1 мсек дуги и 0.6 ± 0.1 а.е., собственное движение 8.3 ± 0.7 мсек дуги/год и соответствующая поперечная скорость 70.1 ± 5.7 км/с.

26 21/23

Апробация работы

- EVN Mini-Symposium & Users' meeting, Корк, Ирландия, 12 – 14 июля 2021 г.
- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, Россия, 23 – 28 августа 2021 г.
- 15th EVN Symposium and User's Meeting: Providing the Sharpest View of the Universe, Корк, Ирландия, 11 – 15 июля 2022 г.
- 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 3 – 7 апреля 2023 г.
- Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва, Россия, 18 – 21 декабря 2023 г.
- Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия, 25 – 31 августа 2024 г.
- Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва, Россия, 23 – 26 декабря 2024 г.
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025», Москва, Россия, 11 – 25 апреля 2025 г.

28 23/23

Спасибо за внимание!

1.2 Замечания ведущей организации

15. «стр. 95 Описание выборки: «Для дополнительной фильтрации данных измеренные плотности потока (S) были усреднены в интервале времени шириной 0.2 года. Те измерения, отклонения которых от усредненной кривой превышали 2σ , где σ – неопределенность измерения плотности потока S , были исключены из дальнейшего анализа.» Необходимо пояснение, почему это не подавит значительную часть кратковременной переменности, которую исследует автор».

– Усреднение по 0.2 года применялось исключительно для выявления и фильтрации вылетающих точек ($>2\sigma$). Так, на каждой частоте было отброшено около 3% данных. В основном анализе и моделировании кривые блеска использовались без усреднения.

16. «Стр. 117, описание квазипериодических процессов «Происхождение этих высокоамплитудных модуляций неизвестно и требует дальнейшего более детального исследования. Оно может быть связано как с процессами, происходящими внутри источника, так и с эффектами рассеяния, что наиболее вероятно. » Почему эти модуляции никак не проявились на других частотах кроме 4.7/4.8 ГГц?»

– Природа вариаций плотности потока на 5 ГГц пока не ясна. Мы продолжаем работать над этим в рамках рассмотрения более сложных систем, состоящих из нескольких рассеивающих линз. Детальный анализ будет представлен в последующих публикациях.

1.1 Замечания ведущей организации

6. «стр. 25, в интерпретации результатов встречается следующее: «переменность размеров за пределами плоскости Галактики выше, чем внутри плоскости для временных масштабов Δt больше нескольких лет, что может быть результатом вклада внутренней переменности источников». Как это может быть? На высоких широтах другие источники?»

– Данные подвыборки идентичны по своим свойствам, но различаются направлением луча зрения и численностью. В результате значимого вклада рассеяния в наблюдаемую переменность размера источников не выявлено, что в первую очередь связано с преобладанием внутренней переменности источников в широких временных масштабах.

9. «стр. 34 «Известными индикаторами областей МЗС с высокой концентрацией свободных электронов являются: мера вращения плоскости поляризации или мера фарадеевского вращения, типичное угловое уширение, оцененное на основе модели NE2001 и распределение интенсивности излучения в линии H α в Галактике». Почему не упомянута мера дисперсии, DM.»

– Мера дисперсии (DM) действительно напрямую не упомянута, но косвенно присутствует в анализе. Модель NE2001 – стандартная модель распределения свободных электронов в Галактике, построенная преимущественно по измерениям DM пульсаров.

1.3 Замечания ведущей организации

17-18. «Почему плоская геометрия экрана вызовет такую картину рассеяния? Почему они будут на этих масштабах следовать нормали к плоскости Галактики и какие конкретно пульсары могут быть ответственны за возникновение этих неоднородностей?»

– Наблюдения свидетельствуют в пользу плоской линзы с гауссовым поперечным профилем плотности свободных электронов и ориентацией перпендикулярно плоскости Галактики. В любых других случаях, формирование субизображений будет в направлениях, отличных от наблюдаемых, а каустические поверхности на кривых блеска источника будут сильно ассиметричны. Структуры с подобной морфологией обсуждаются, в частности, в работах, связывающих плотные ионизованные радиофиламенты с пульсарами и их ветрами (например, Churazov+2023). Однако в направлении квазара 2005+403 такие объекты к настоящему моменту не обнаружены, поэтому данная связь носит только гипотетический характер.

2. Замечания оппонента Зинченко И. И.

1. «Хотелось бы видеть какое-то обоснование выбора распределения Стюдента для описания вклада рассеянных источников в разделе 1.6. В диссертации просто предполагается, что его можно для этого использовать».

– **Визуальный анализ распределений наблюдаемых угловых размеров активных ядер галактик выявил значимое отклонение от нормального распределения с более высокой вероятностью экстремальных значений. Разумно предположить, что источники, формирующие правый хвост распределения, преимущественно рассеянные. Распределение Стюдента позволило промоделировать вклад рассеянных источников в наблюдаемые угловые размеры активных ядер. По результатам моделирования была получена оценка индекса рассеяния, которая хорошо согласуется с остальными оценками, полученными с помощью других методов.**

2. «Было бы неплохо расширить обсуждение распределения спектрального индекса по источникам с рассеянием, где он достигает экстремальных значений (раздел 2.4.1). Интересно было бы промоделировать это распределение. Вероятно, это может дать дополнительную информацию о характеристиках рассеяния...»

– **Дополнительные исследования распределений спектрального индекса по источникам с доминирующим рассеянием представляют интересную задачу для будущих работ в данном направлении. Подобный анализ был проведен впервые. Данный подход может быть использован для экспресс-диагностики наличия рассеяния. Необходимо расширить анализ на другие объекты для более полного понимания того, как рассеяние радиоизлучения в МЗС влияет на оценки спектрального индекса активного ядра.**

3. Замечания оппонента Сазонова С. Ю.

«...при обсуждении результатов третьей главы отчасти это относится и ко второй), касающихся свойств рассеивающих плазменных экранов, как мне кажется, можно было бы более подробно остановиться на физической интерпретации обнаруженных явлений и их статистических свойствах. А именно на обсуждении того факта, что для объяснения событий экстремального рассеяния, по всей видимости, требуется расположить очень тонкий и практически плоский (с огромным отношением длины и толщины) плазменный экран перпендикулярно картинной плоскости — гипотеза, которая кажется фантастической, но вроде бы не имеет альтернативы. Это кратко отмечено в тексте, со ссылками на предыдущие работы по теме, но так как в данном исследовании получен большой объем новой информации о событиях экстремального рассеяния, то, наверное, можно попробовать использовать всю накопленную к настоящему моменту статистику для получения более сильных ограничений на эту или другие гипотезы о структуре межзвездной плазмы...»

– **Для более детального исследования свойств и структуры плазменных линз, создающих наблюдаемые эффекты рассеяния, требуются дополнительные многочастотные наблюдения большего числа источников для зондирования МЗС в разных направлениях. При объединении результатов, полученных по нескольким источникам, мы планируем получить более надежные статистические ограничения на параметры плазменных экранов. А совместное использование результатов исследований свойств рассеивающих экранов, полученных по данным наблюдений галактических и внегалактических радиоисточников, поможет пролить свет на природу и основные свойства плазменных структур, ответственных за наблюдаемые эффекты рассеяния.**