

# **Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее переменности в активных ядрах галактик**

Дарья Игоревна Зобнина

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

Научный руководитель:  
док. физ.-мат. наук, профессор РАН  
А. Б. Пушкарев

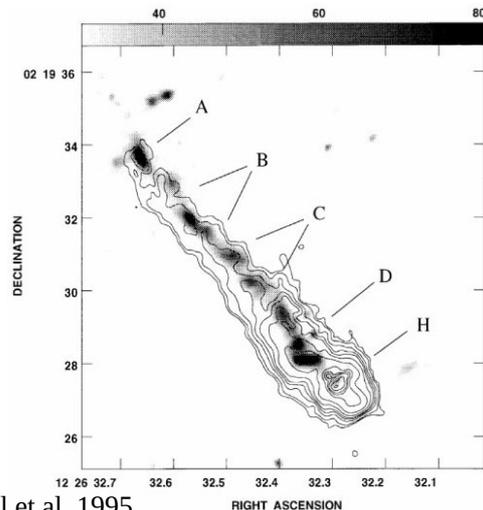
АКЦ ФИАН, 3 апреля 2024 г.

# Обзор и цели диссертации

- **Цель:** исследование **конфигурации** и **степени упорядоченности магнитного поля** релятивистских струй активных ядер галактик (АЯГ), а также изменения со временем этих характеристик поля вдоль и поперек струй.
- Диссертация состоит из Введения, двух Глав, Заключения и Приложения.
- **Глава 1:** Поиск АЯГ с ярким протяженным оптическим джетом и определение конфигурации магнитного поля в этих джетах с помощью информации об оптической линейной поляризации и радио-оптических сдвигах координат.
- **Глава 2:** Исследование конфигурации и степени упорядоченности стабильной компоненты магнитного поля парсековых струй АЯГ, а также пространственно-временных изменений степени упорядоченности и направления магнитного поля.

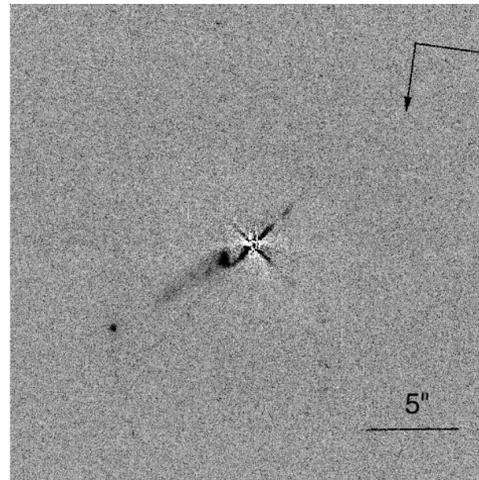
# Глава 1. Введение. Астрометрическое положение АЯГ.

- Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ, Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашев и Г.Б. Шоломицкий 1965) определяет положение **самой яркой компактной области АЯГ**.
- Оптический космический телескоп *Gaia* (ЕКА; PSF 300x150 мсек дуги) измеряет **положение центра** всего изображения.
- *Gaia*-координаты сдвигаются
  - **вниз** по струе ярким протяженным **оптическим джетом**;
  - **вверх** по струе **аккреционным диском**;
  - **в любом** направлении **хозяйской галактикой**.



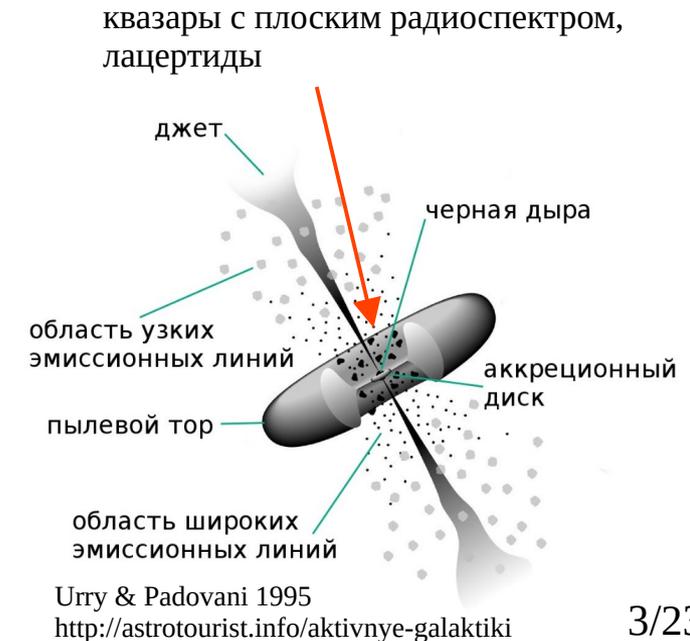
3C 273 Bahcall et al. 1995

Контуры – **радио** (1.5 ГГц), серая шкала – **оптика** (полоса V)



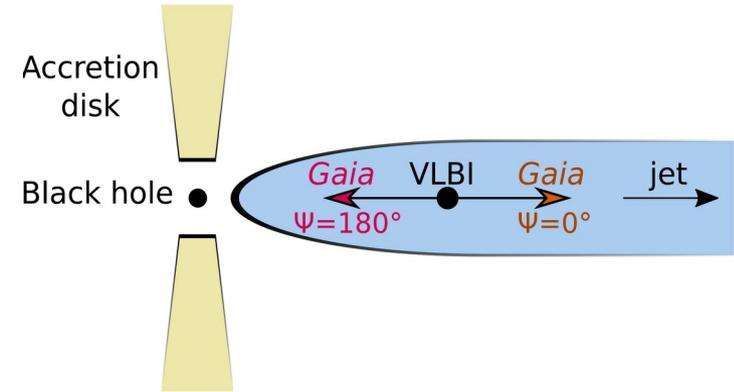
PKS 0521-365 Falomo et al. 2000

**Оптика** (полоса R)



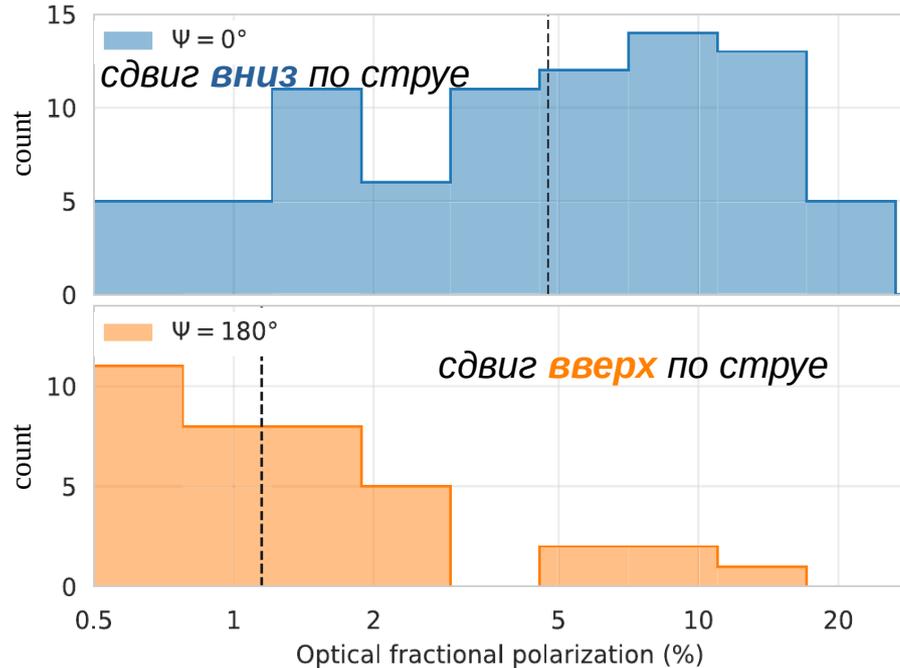
# Глава 1. Введение. РСДБ-*Gaia* сдвиги положений АЯГ.

- При сравнении АЯГ из каталогов *Gaia* DR2 и фундаментального радиокаталога (RFC, РСДБ-координаты) **около 900** ( $\approx 10\%$  от выборки) АЯГ имеют **значимые радио-оптические сдвиги** координат (медианное смещение  $\approx 1.2$  мсек дуги, Plavin et al. 2019).
- Сдвиги  $\Psi = 0^\circ$  – яркий протяженный **оптический джет** (Kovalev et al. 2017; Petrov & Kovalev 2017).
- Сдвиги  $\Psi = 180^\circ$  – преобладание **аккреционного диска** в полном оптическом излучении (Plavin et al. 2019).
- **Оптическое линейно-поляризованное излучение АЯГ:**
  - синхротронное излучение джета;
  - тепловое излучение аккреционного диска (поляризация за счет рассеяния в атмосфере диска);
  - рассеянное излучение из областей за пределами аккреционного диска.
- У АЯГ с углом к лучу зрения  $\approx 5^\circ$  степень поляризации излучения от аккреционного диска и областей рассеяния  $< 1\%$   $\Rightarrow$  ожидается, что степень оптической поляризации АЯГ с  $\Psi = 0^\circ$  (доминирует **оптический джет**) **больше**, чем у АЯГ с  $\Psi = 180^\circ$  (доминирует **аккреционный диск**).
- **Цель:** поиск АЯГ с ярким протяженным **оптическим джетом** и определение **конфигурации магнитного поля** в этих джетах с помощью информации об оптической линейной поляризации и радио-оптических сдвигах координат.



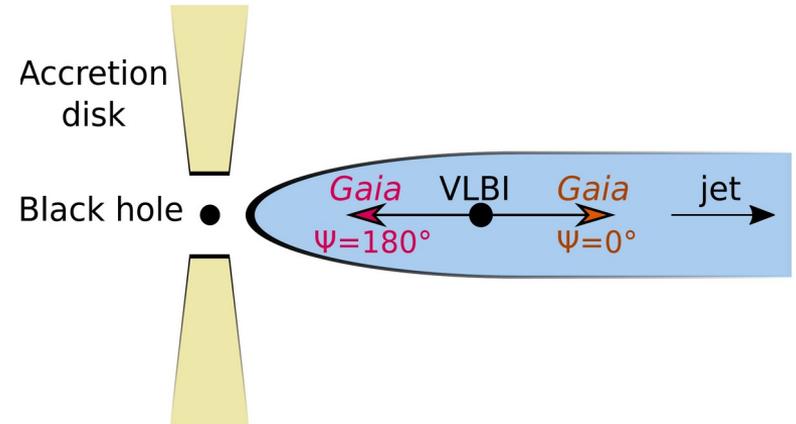
Kovalev Y. Y., Zobnina D. I. et al., MNRAS, 2020

# Глава 1. Степень оптической поляризации АЯГ с радио-оптическими сдвигами положений.



$\rho_{\text{med}} (\%)$   
 $4.7^{+0.4}_{-0.8}$

$\rho_{\text{med}} (\%)$   
 $1.2^{+0.2}_{-0.3}$

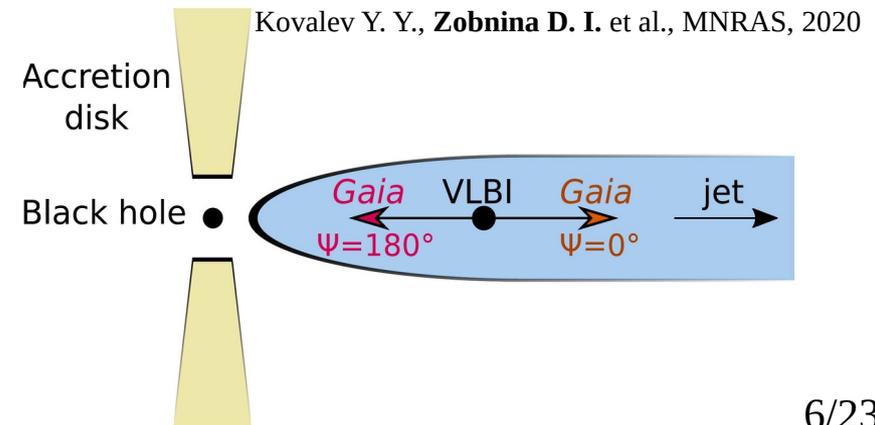
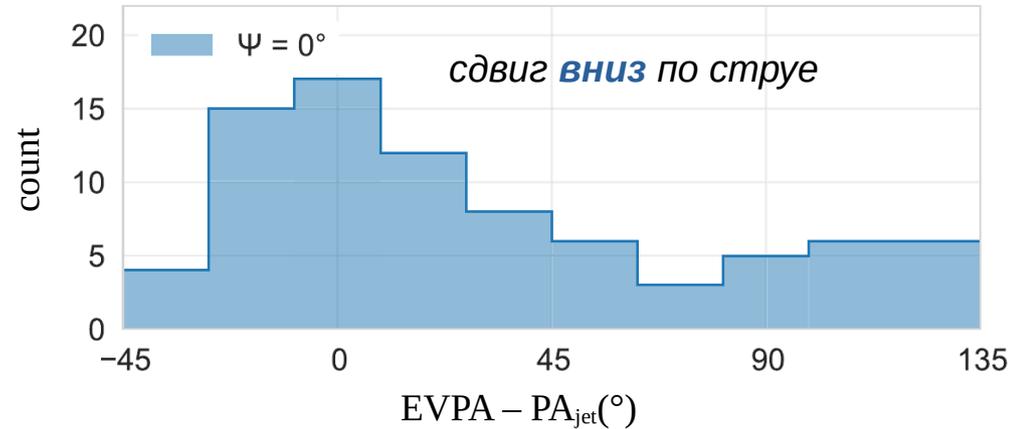


Kovalev Y. Y., Zobnina D. I. et al., MNRAS, 2020

- Медиана степени поляризации АЯГ с  $\Psi = 0^\circ$  **значимо больше** (уровень значимости  $3\sigma$ ) медианы для АЯГ с  $\Psi = 180^\circ$  => сдвиг **вниз** по струе из-за **оптического джета**, **вверх** по струе из-за **аккреционного диска**.

# Глава 1. Направление оптической поляризации АЯГ с РСДБ-*Gaia* сдвигами.

- EVPA (Electric Vector Position Angle) – позиционный угол электрического вектора, направление поляризации.
- У АЯГ с  $\Psi = 0^\circ$  направление поляризации и джета **совпадают** => **доминирует тороидальная** составляющая магнитного поля, так как излучение оптически тонкое => **тороидальная компонента крупномасштабного поля** джета (Blandford & Znajek 1977; Blandford & Payne 1982) или **ударные волны** (Hughes et al. 1985).
- Подобный результат был получен в Rusk et al. (1984), Rusk & Seaquist (1985) для меньшей выборки.

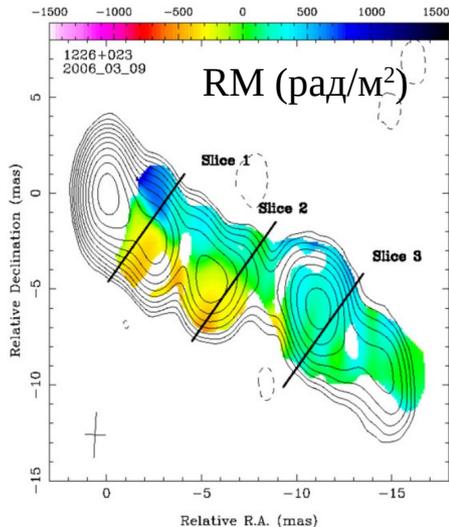


# Глава 1. Выводы.

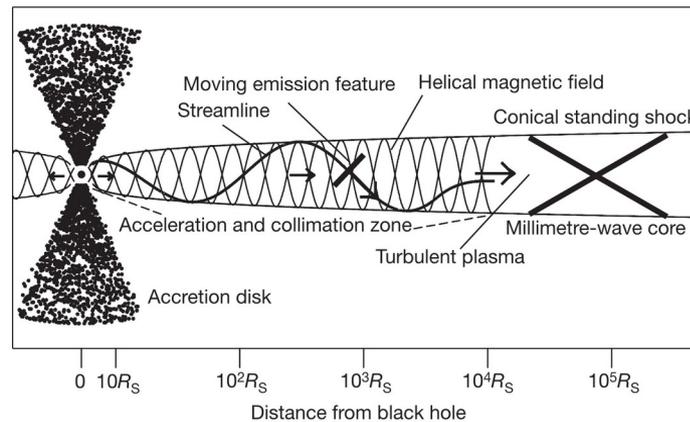
- Источники со значимыми радио-оптическими сдвигами координат вниз по выбросу имеют **большую** (на уровне значимости  $3\sigma$ ) оптическую степень поляризации (медиана 4.7%), чем объекты, у которых положение в оптике ближе к началу джета (медиана 1.2%).
- Этот результат подтверждает, что:
  - **аккреционный диск**, доминирующий в полном оптическом излучении, **сдвигает положение**, измеренное телескопом *Gaia*, **ближе к началу джета**;
  - протяженный **оптический джет** способствует возникновению **сдвига РСДБ-*Gaia* вниз по джету**.
- Направление оптической линейной поляризации у АЯГ с радио-оптическими сдвигами положений вниз по джету **совпадает** с направлением парсекового джета. Это указывает на **тороидальную компоненту крупномасштабного поля джета** или **ударные волны**.

# Глава 2. Введение. Магнитное поле парсековых струй АЯГ.

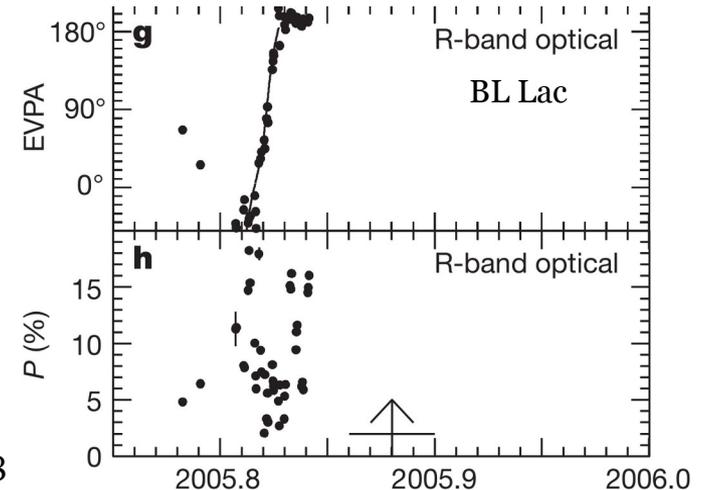
- **Стабильное** магнитное поле: поперечный градиент меры вращения (Novatta et al. 2012, Gabuzda et al. 2015), асимметрии в поперечном распределении поляризации (Clausen-Brown et al. 2011, Murphy et al. 2013).
- **Сильная переменность** поляризации => **турбулентность** плазмы (Marscher 2014), стоячие и движущиеся **ударные волны** (Marscher et al. 2008, Myserlis et al. 2018).



8-15 ГГц Novatta et al. 2012

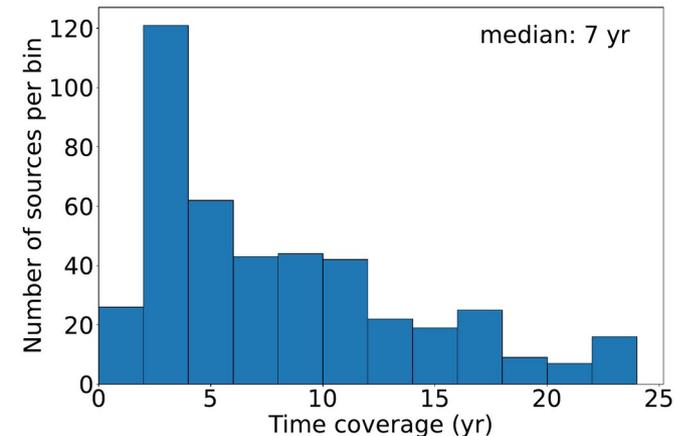
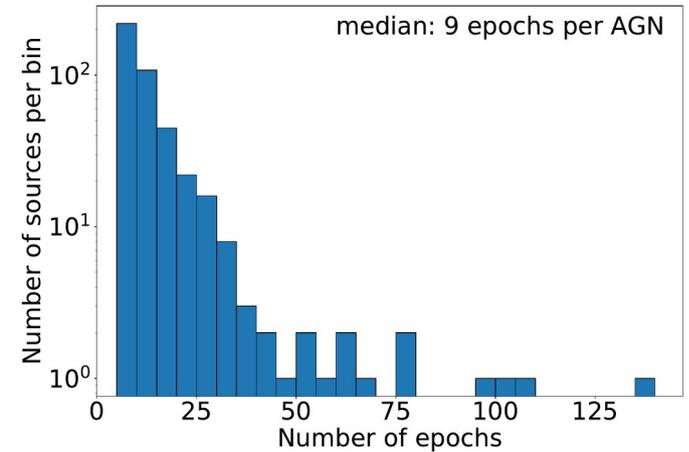


Marscher et al. 2008



# Глава 2. Исследование стабильной и переменной компонент магнитного поля в парсековых джетах АЯГ.

- **Цель:** визуализация и анализ **стабильной компоненты** магнитного поля парсекового выброса и пространственно-временных изменений степени упорядоченности и направления **переменной составляющей** этого поля вдоль и поперек джета.
- Данные проекта MOJAVE и архивные наблюдения на VLBA на 15 ГГц. Выборка: 436 АЯГ, не менее пяти эпох наблюдений в линейной поляризации с 1996 года по 2019 год. Более 90% выборки – лацертиды и квазары с плоским радиоспектром (далее квазары).
- Медианное количество эпох – 9, медианная скважность наблюдений – 0.4 года, медианное временное покрытие – 7 лет.



## Глава 2. Два подхода к усреднению поляризации по эпохам.

- **Стековые карты (пространственно-временное усреднение карт, совмещенных по РСДБ-ядру)**

1.  $I_{\text{stack}} = \text{mean}(I_i)$ ,  $Q_{\text{stack}} = \text{mean}(Q_i)$ ,  
 $U_{\text{stack}} = \text{mean}(U_i)$ ,  $I_i$ ,  $Q_i$  и  $U_i$  –  
одноэпоховые значения  $I$ ,  $Q$  и  $U$ ,  
соответственно.

$$2. P_{\text{stack}} = (Q_{\text{stack}}^2 + U_{\text{stack}}^2)^{0.5},$$

$$m_{\text{stack}} = P_{\text{stack}} / I_{\text{stack}},$$

$$EVPA_{\text{stack}} = 0.5 * \arctan(U_{\text{stack}} / Q_{\text{stack}})$$

- **Стековые карты** отражают распределение направления и степени упорядоченности **стабильного магнитного поля**.

- **Медианные карты и распределение переменности**

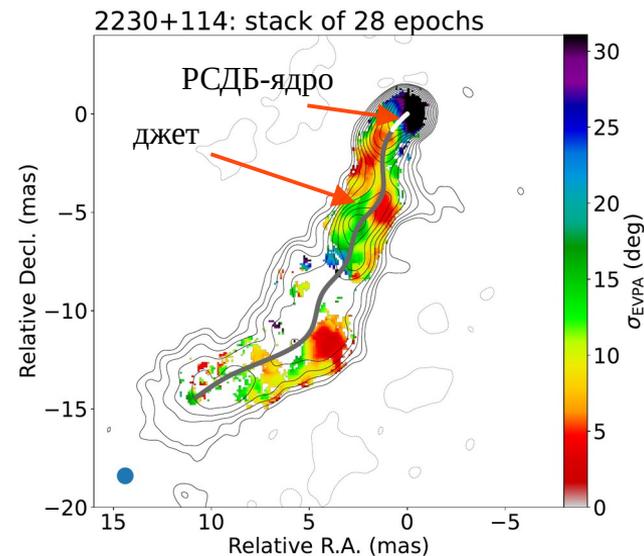
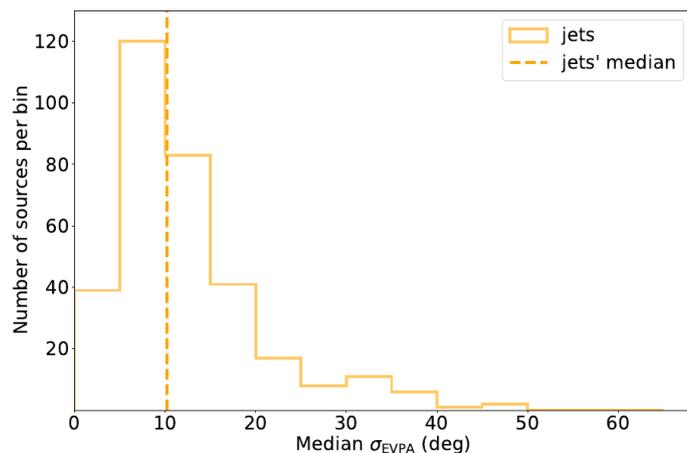
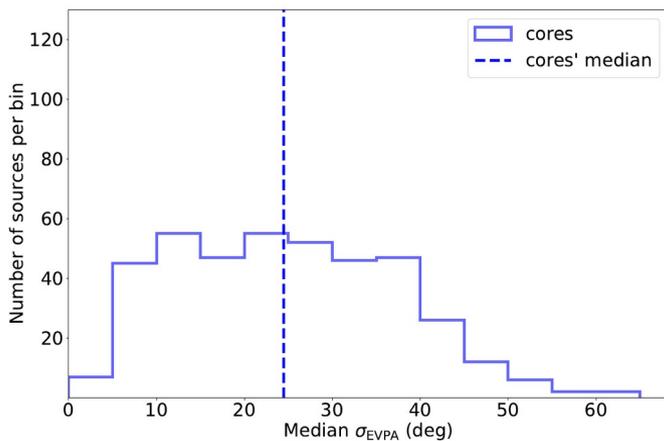
1. одноэпоховые карты  $I_i$ ,  
 $P_i = (Q_i^2 + U_i^2)^{0.5}$ ,  $m_i = P_i / I_i$ ,  
 $EVPA_i = 0.5 * \arctan(U_i / Q_i)$

2. медиана степени поляризации  
 $m_{\text{median}} = \text{median}(m_i)$ , переменность  
направления поляризации  
 $\sigma_{EVPA} = \text{standard deviation}(EVPA_i)$

- **Медианные карты** показывают **типичное значение** величины по эпохам в пикселе, а **карты переменности** – распределение **изменений направления магнитного поля**.

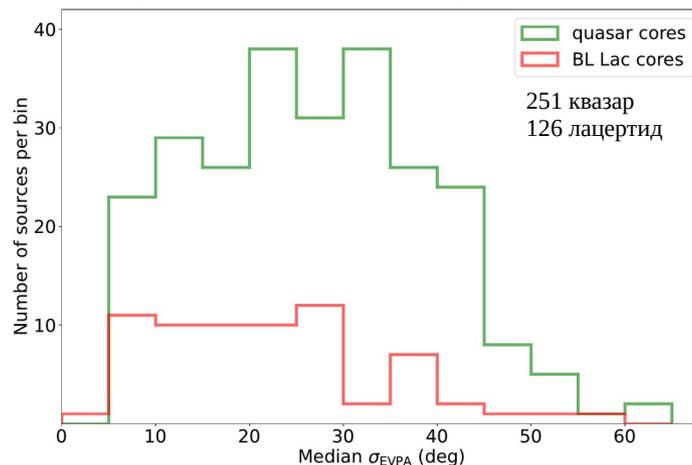
## Глава 2. Переменность направления поляризации в РСДБ-ядре и джете.

- РСДБ-ядро – яркое, компактное, частично оптически толстое видимое начало струи.
- Переменность EVPA в РСДБ-ядре **значимо больше** (уровень значимости  $3\sigma$ ), чем в джете. Возможные причины: **неразрешенные компоненты с разным EVPA** и **искривление струи** в ядерной области.



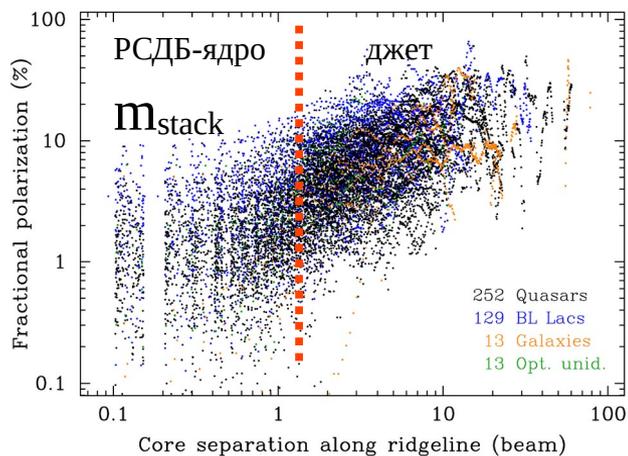
## Глава 2. Переменность направления поляризации в РСДБ-ядрах квазаров и лацертид.

- Переменность EVPA в РСДБ-ядрах квазаров **значимо больше** (уровень значимости  $3\sigma$ ), чем в РСДБ-ядрах лацертид. Различие может быть вызвано **более высокой внутренней мерой фарадеевского вращения** в квазарах по сравнению с лацертидами (Novatta et al. 2012) из-за **более высокой напряженности** магнитного поля (Pushkarev et al. 2012) => **большими изменениями со временем меры вращения** в РСДБ-ядрах квазаров.
- Подобный результат был получен в Hodge et al. (2018) на основе меньшего количества источников и более короткого временного интервала наблюдения каждого из них.

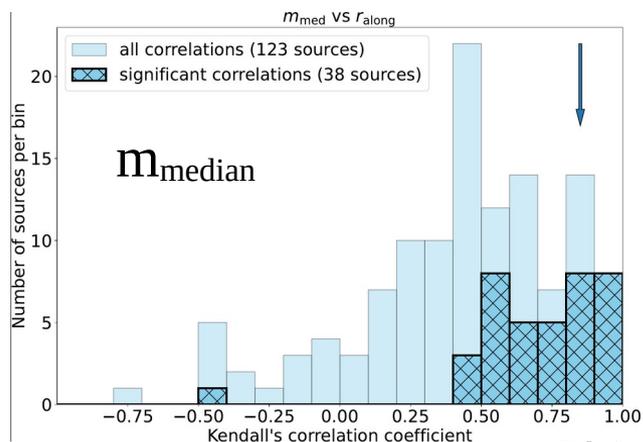


# Глава 2. Усредненная по эпохам поляризация вдоль джета.

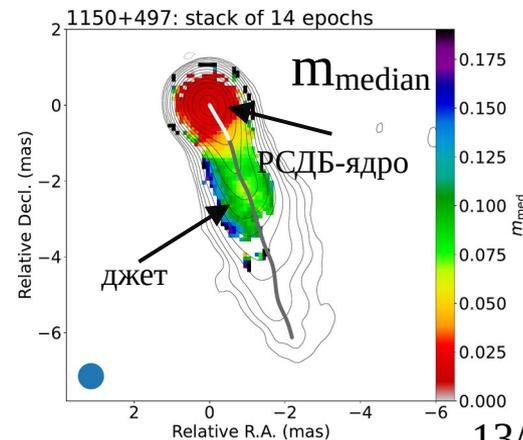
- Стековая и медианная степень поляризации *увеличиваются* (типично на 12%) **вниз по струе**. Возможные причины:
  - уменьшение с расстоянием от РСДБ-ядра фарадеевской деполяризации (Novatta et al. 2012), угла закрутки спирального магнитного поля (Butuzova & Pushkarev 2023), ослабление ударных волн и, следовательно, турбулентности плазмы (Marscher 2014) => **рост упорядоченности магнитного поля вниз по джету**;
  - эффект старения спектрального индекса (Kardashev 1962): электроны с большей энергией теряют ее быстрее из-за синхротронного излучения.
- На одноэпоховых картах увеличение степени поляризации тоже наблюдается (5 ГГц Sawthorne et al. 1993, 15 ГГц Lister & Homan 2005, 22 ГГц Lister & Smith 2000, 43 ГГц Lister 2001).



Pushkarev A. B., ..., Zobnina D. I. 2023

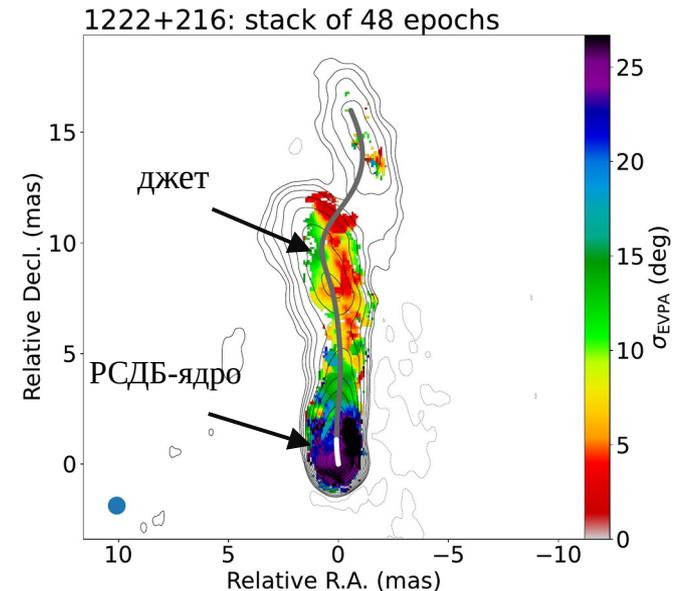
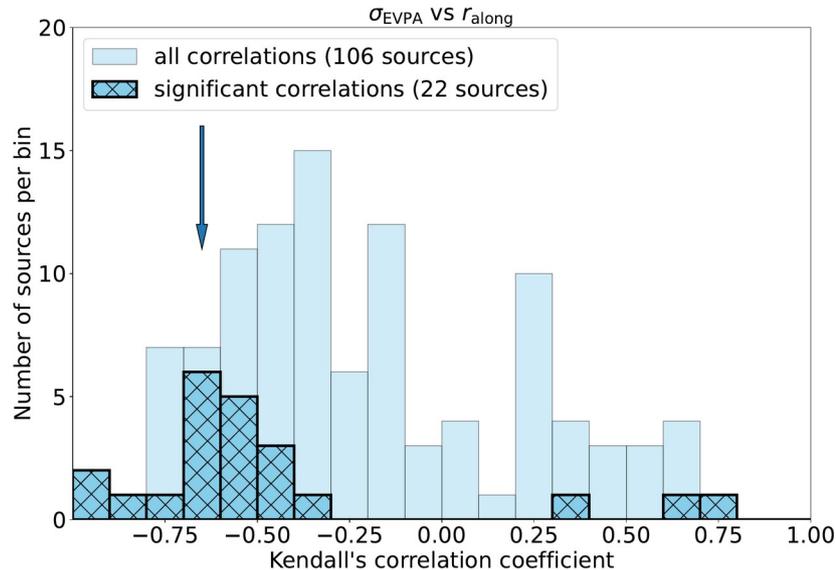


Zobnina D. I. et al., MNRAS, 2023



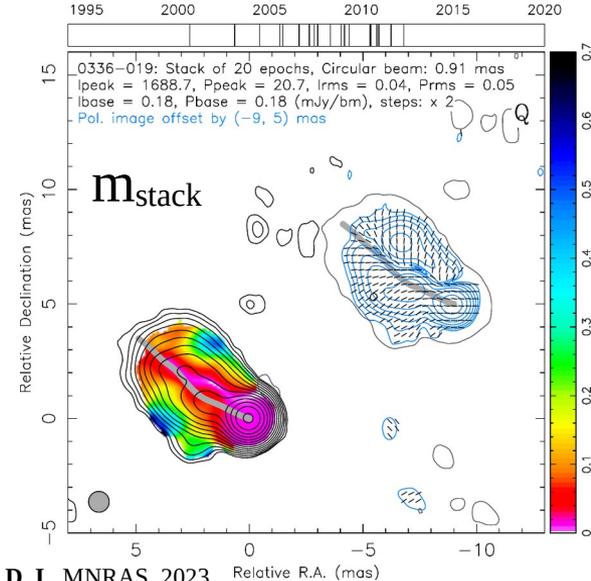
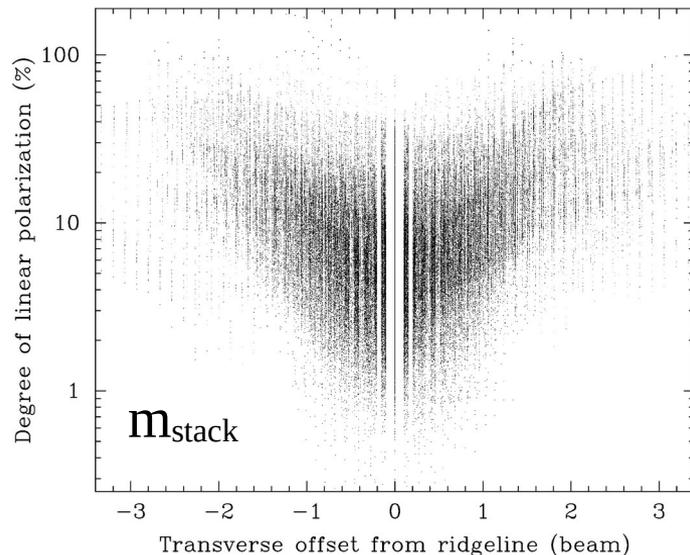
# Глава 2. Переменность направления поляризации вдоль джета.

- **Уменьшение переменности** направления поляризации вниз по струе (типично с  $\approx 28^\circ$  около РСДБ-ядра до  $\approx 8^\circ$  на периферии струи) => **увеличение стабильности** направления магнитного поля с расстоянием от РСДБ-ядра.
- Тренд переменности направления поляризации проявляется при временном интервале  $> 12$  лет и количестве эпох  $> 15$ .



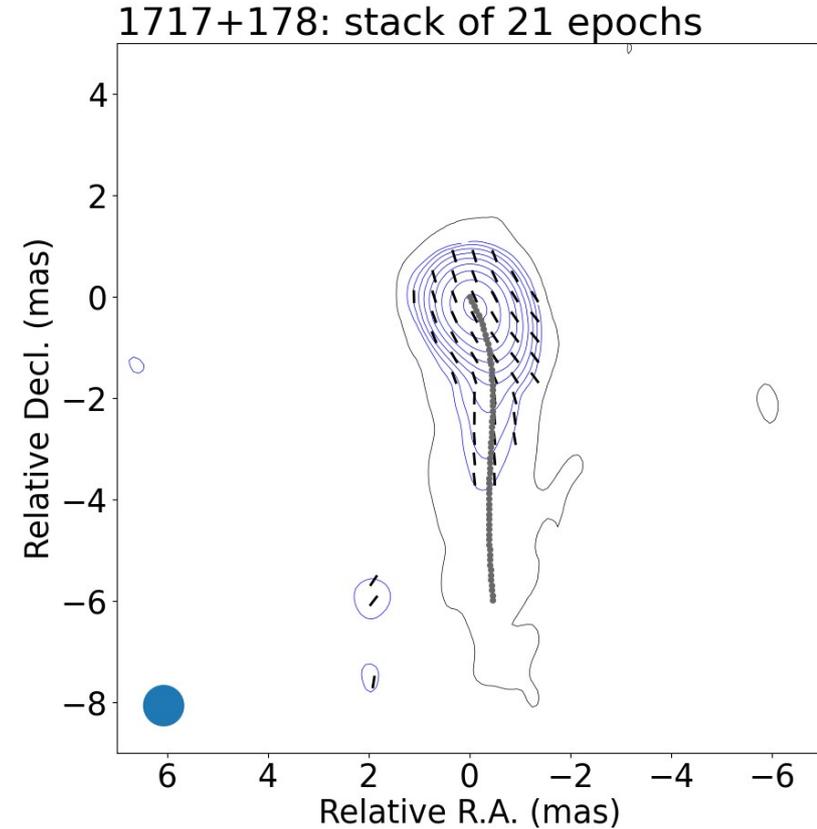
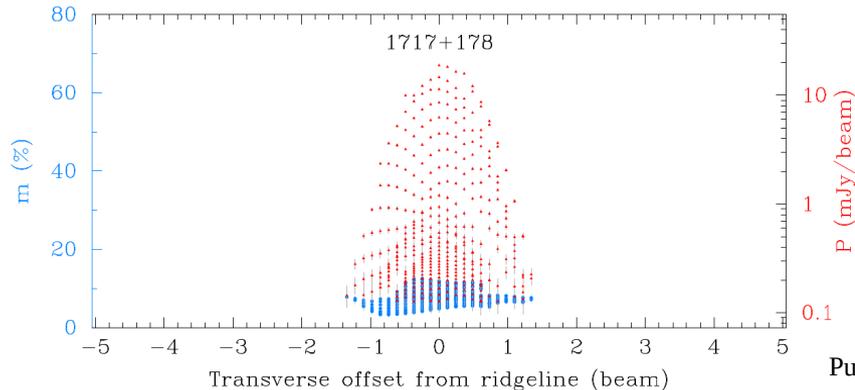
# Глава 2. Усредненная по эпохам поляризация поперек струи.

- **Возрастание** степени поляризации к **краям джета** (типично на 20%) => **рост упорядоченности** магнитного поля к периферии струи (например, за счет оболочки с полоидальным полем вокруг струи или уменьшения турбулентности плазмы).
- Подобное распределение ожидается в случае спирального магнитного поля (Clausen-Brown et al. 2011).
- Этот результат виден и на одноэпоховых изображениях (Pushkarev et al. 2005, 2017).



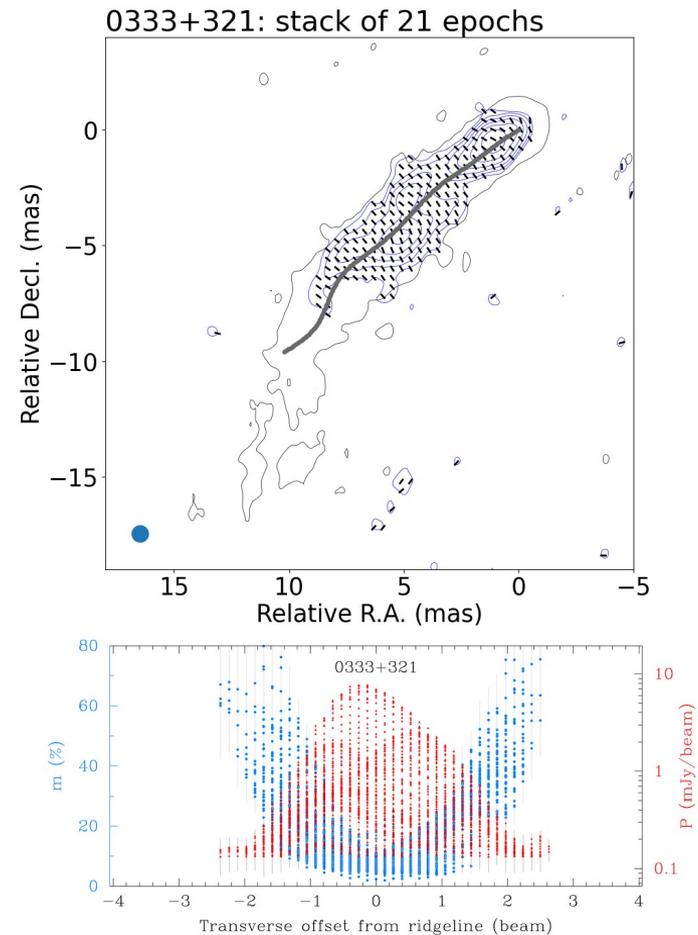
# Глава 2. Усредненная по эпохам поляризация поперек струи.

- Направление поляризации **параллельное** выбросу и поляризационная структура **уже**, чем в полной интенсивности => в поляризованном излучении **преобладает центральный канал выброса**, а оболочка либо геометрически тонкая, либо ее излучение слабое (Butuzova & Pushkarev 2023).
- Такое распределение EVPA в основном встречается у **лацертид**.



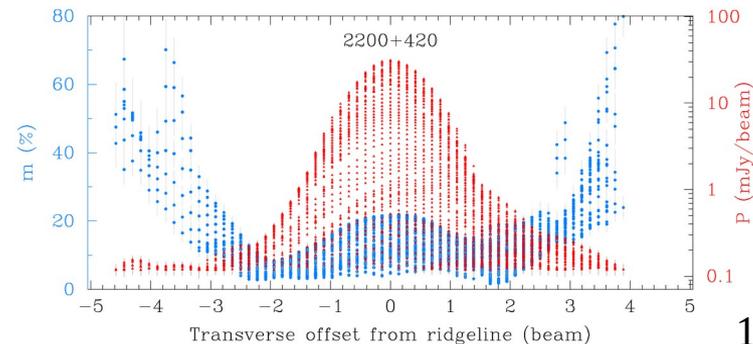
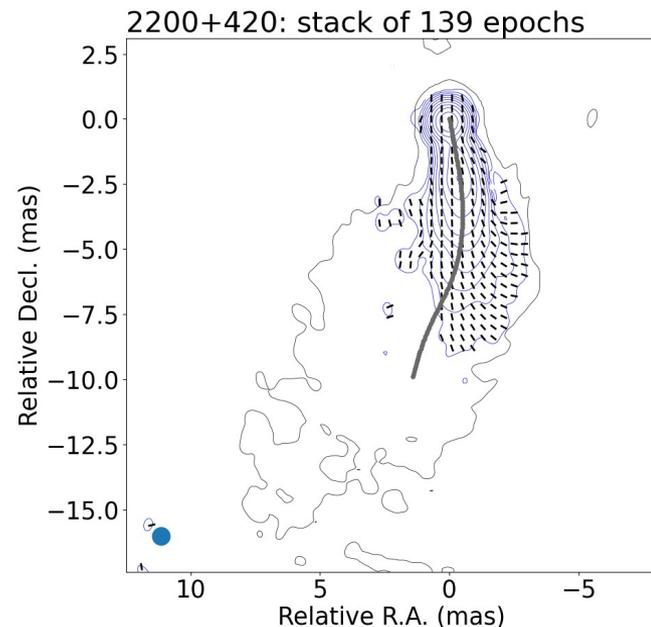
# Глава 2. Усредненная по эпохам поляризация поперек струи.

- Поляризация измеряется по всей ширине струи и направление поляризации перпендикулярно ей => возможно, спиральное магнитное поле струи (Murphy et al. 2013) или в поляризованном излучении источника доминирует геометрически толстая оболочка (Butuzova & Pushkarev 2023).
- Асимметрия поперечных профилей степени поляризации и поляризационной интенсивности => спиральное магнитное поле (Aloy et al. 2000, Clausen-Brown et al. 2011, Kramer & MacDonald 2021).
- Такое распределение EVPA в основном встречается у квазаров.



# Глава 2. Усредненная по эпохам поляризация поперек струи.

- EVPA плавно **поворачивается** от продольного у оси к поперечному у края джета направлению, а степень поляризации **возрастает** поперек джета => **сравнимый вклад** струи и оболочки в полное поляризованное излучение источника (Butuzova & Pushkarev 2023).
- Подобное поперечное распределение EVPA также ожидается в случае **спирального** магнитного поля (Murphy et al. 2013).
- Такое распределение EVPA наблюдается как в **квазарах**, так и в **лацертидах**.
- В некоторых АЯГ такое распределение EVPA сопровождается **W-образным профилем** степени поляризации.



## Глава 2. Выводы.

- Переменность EVPA в РСДБ-ядре **выше** (медиана примерно  $25^\circ$ ) на уровне значимости  $3\sigma$ , чем в джете (медиана около  $10^\circ$ ). Основными причинами могут служить **неразрешенные компоненты** и **искривления струи** в ядерной области.
- В РСДБ-ядрах лацертид направление поляризации **более стабильное** (уровень значимости  $3\sigma$ ), чем в квазарах. Причиной могут являться **меньшие временные изменения меры фарадеевского вращения** в лацертидах по сравнению с квазарами из-за **меньшей напряженности** поля.
- Переменность направления поляризации **уменьшается** вниз по струе (типично на  $20^\circ$ ). Это указывает на **увеличение стабильности** направления магнитного поля с расстоянием от ядра.
- Стековая и медианная степени поляризации **значимо возрастают** с расстоянием:
  - **от РСДБ-ядра** (типично на 12%) благодаря сочетанию нескольких эффектов, таких как **уменьшение фарадеевской деполяризации, угла закрутки магнитного поля, старение спектрального индекса, ослабление ударных волн вниз по выбросу**;
  - **к краям** выброса (типично на 20%) из-за **спирального** магнитного поля, взаимодействия с **внешней средой** или **уменьшения турбулентности** плазмы к краям.
- В АЯГ направление поляризации либо параллельно оси выброса, либо перпендикулярно ему, либо параллельно оси во внутренних областях джета и становится перпендикулярным ей ближе к его краям. Такие распределения указывают на существование **спирального** магнитного поля в джете и **оболочки** вокруг него, порожденной взаимодействием с внешней средой.

# Положения, выносимые на защиту

1. Исследованы направление и степень оптической линейной поляризации у 287 АЯГ со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia*. Получено, что объекты со сдвигами вниз по струе имеют значимо большую степень поляризации (медиана 4.7%), чем источники с противоположным направлением сдвига (медиана 1.2%). Это обусловлено тем, что сдвиг вниз по струе происходит из-за протяженного оптического выброса, а смещение в противоположную сторону — из-за доминирования аккреционного диска в полном оптическом излучении. Также обнаружено, что у большинства источников со сдвигами вниз по выбросу направление оптической поляризации сонаправлено с выбросом, что является указанием на крупномасштабное тороидальное магнитное поле струи.

2. Анализ РСДБ-карт распределений усредненной по эпохам степени линейной поляризации 436 АЯГ в радиодиапазоне на частоте наблюдения 15 ГГц показал ее значимый рост вниз по струе, типично на 12% (в среднем около 2%/мсек дуги). Это может быть вызвано такими эффектами, как укрупнение спектрального индекса, ослабление ударных волн и уменьшение деполяризации, порожденной фарадеевским вращением, с расстоянием от РСДБ-ядра. Установлено значимое возрастание, типично на 20%, степени линейной поляризации к краю струи, а также асимметричность поперечных профилей поляризационной интенсивности и степени поляризации. Это указывает на тороидальную или спиральную конфигурацию крупномасштабного магнитного поля выброса.

# Положения, выносимые на защиту

3. Исследование стековых РСДБ-карт направления линейной поляризации 436 АЯГ на частоте наблюдения 15 ГГц показало, что наблюдаются три основные характерные распределения: 1) преимущественно вдоль хребтовой линии в пределах центрального канала струи (типично для лацертид), 2) ортогонально выбросу по всей его ширине (типично для квазаров и радиогалактик), 3) с постепенным поворотом электрического вектора от локального направления выброса в центральном канале к поперечному у его края (типично для квазаров). При этом профиль стековой степени поляризации поперек струи имеет U- или W-образную форму. Эти наблюдательные результаты указывают на присутствие спирального магнитного поля, ассоциированного с выбросом, с возможным образованием сдвигового слоя и соответствующей оболочки с продольным полем в результате взаимодействия выброса с окружающей средой.

4. Проведен анализ РСДБ-карт переменности линейной поляризации 436 АЯГ на частоте 15 ГГц. Обнаружено, что переменность направления поляризации в области РСДБ-ядра значительно выше (медиана примерно  $25^\circ$ ), чем во внешних областях струи (медиана около  $10^\circ$ ). Это может являться следствием искривленности струи в РСДБ-ядре и/или того, что компоненты с разным направлением поляризации в этой области не разрешаются. Установлено, что направление поляризации в РСДБ-ядрах лацертид более стабильно, чем в квазарах. Показано, что направление поляризации в выбросе обычно становится более стабильным с удалением от РСДБ-ядра: типичные изменения направления поляризации спадают с  $\approx 28^\circ$  около РСДБ-ядра до примерно  $8^\circ$  на периферии струи. Причиной этого может являться возрастание доли регулярной компоненты магнитного поля.

# Публикации автора по теме диссертации

1. Kovalev Y. Y., **Zobnina D. I.**, Plavin A. V., Blinov D. *Optical polarization properties of AGNs with significant VLBI-Gaia offsets // MNRAS.* — 2020. — Vol. 493, no. 1. — P. L54–L58.
2. Pushkarev A. B., Aller H. D., Aller M. F., Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Pashchenko I. N., Savolainen T., **Zobnina D. I.** *MOJAVE XX. Persistent linear polarization structure in parsec-scale AGN jets // MNRAS.* — 2023. — Vol. 520, no. 4. — P. 6053–6069.
3. **Zobnina D. I.**, Aller H. D., Aller M. F., Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Pashchenko I. N., Pushkarev A. B., Savolainen T. *MOJAVE - XXI. Decade-long linear polarization variability in AGN jets at parsec scales // MNRAS.* — 2023. — Vol. 523, no. 3. — P. 3615–3628.

# Личный вклад

- В работе [1] соискатель оценил вклад релятивистского джета, аккреционного диска и областей рассеяния излучения в интегральную оптическую поляризацию АЯГ по опубликованным теоретическим и наблюдательным работам, проанализировал данные и участвовал, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.
- В работе [2] вклад соискателя заключается в анализе стековых карт степени и направления поляризации, поляризационной интенсивности, а так же участия, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.
- В работе [3] вклад соискателя основной. Он включает в себя построение РСДБ-карт распределения стековой полной интенсивности, переменности поляризации и медианной по эпохам степени поляризации, а также медианной поляризационной интенсивности, проведение анализа этих карт, обсуждение результатов и подготовку публикации.

# Отзыв ведущей организации

- > 3. В работе используются 4 близких термина: «струя», «джет», «выброс», «истечение». Они используются вперемешку и не совсем понятно, описывают ли они одно и то же? Если бы в работе были введены определения этих базовых понятий или указано, что автор использует их как синонимы, то это позволило бы избежать этой неясности.

*В диссертации эти термины используются как синонимы. С замечанием согласна.*

- > 6. В разделах 1.2 и 1.3 описывается процедура отбора источников со сдвигом вверх и вниз по джету и анализа значимости. Стр. 24: «Также предполагалось, что источник имеет сдвиг вниз по струе ( $\Psi = 0^\circ$ ), если у него  $\Psi \in (-45^\circ, +45^\circ)$ , и вверх по джету ( $\Psi = 180^\circ$ ), если  $\Psi \in (180^\circ - 45^\circ, 180^\circ + 45^\circ)$ ». Стр. 27: «Значимость пика оценивалась, как доля реализаций, в которых количество источников с  $-30^\circ < EVPA < 30^\circ$  больше, чем в случае равномерного распределения.» Непонятно, почему отличаются пороговые величины?

*На гистограмме распределения разницы между направлением поляризации и направлением джета оценивались значимости пиков как на  $0^\circ$ , так и на  $90^\circ$ , поэтому для оценки значимости пика на  $0^\circ$  использовался диапазон  $(-30^\circ, 30^\circ)$ , для пика на  $90^\circ$  -  $(60^\circ, 120^\circ)$ . В диапазоне от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  предполагался минимум между пиками. Значимых пиков на  $90^\circ$  обнаружено не было.*

# Отзыв ведущей организации

- > 7. Некоторые важные детали представлены как утверждения, без обоснования. Например, на стр. 46: «Ширина джета на таких изображениях зависит от продолжительности мониторинга АЯГ: чем дольше наблюдается источник, тем шире детектируется струя, пока не проявится вся ее поперечная структура.»

*С замечанием согласна. В данном случае ширина джета увеличивается из-за того, что в разные моменты времени подсвечиваются разные его части из-за распространения неустойчивостей.*

- > 8. Недостаточно чётко описано влияние фарадеевского вращения на наблюдаемую поляризацию. Стр. 80: «В квазарах, в среднем, наблюдается более высокая мера фарадеевского вращения по сравнению с лацертидами». Внутренняя RM источника отличается от наблюдаемой в  $(1+z)^2$  раз, необходимо чётко артикулировать о какой из мер вращения идёт речь? Авторы, очевидно, понимают это, так как в одном из анализов специально использовали ограничение по  $z$ : «Поскольку объекты данных оптических классов имеют разное распределение по  $z$  (Раздел 2.2 и Рисунок 2.4), то выбирались источники в таком диапазоне, чтобы медианы распределений квазаров и лацертид были близки. Это оказался диапазон по  $z$  от 0.15 до 0.5. В него попадают 29 квазаров и 25 лацертид. Значимой разницы между  $\sigma_{EVPA}$  в данных источниках нет.», но не хватает описания этого эффекта в основном тексте работы.

*На стр. 80 подразумевалась внутренняя мера вращения.*

- *С остальными замечаниями согласна.*

# Отзыв от официального оппонента Ю.В. Сотниковой

- **Замечания по содержанию работы:**
- **> 1. Глава 1. Сдвиги положений объектов в оптике и радио авторы рассматривают с точки зрения физических условий в АЯГ (структура, излучение). При этом полно не раскрыта информация об ошибках измерений координат, например систематических. На стр. 21 указано, что “примерно у 2/3 источников погрешности были малы” без указания количественной меры, особенно оставшейся трети.**

*С замечанием согласна. Ошибка координат у 2/3 источников составляет менее 5 мсек дуги, у 1/3 источников ошибка – от 5 до 30 мсек дуги.*

- **> 2. Глава 1. В работе рассматриваются объекты со значимым сдвигом радио и оптического положения. Используемые измерения РСДБ и Gaia проведены неодновременно, информация о поляризации оптического излучения получена также в разные эпохи. Не обсуждается возможное влияние переменности излучения АЯГ на выявленные сдвиги. Обычно положение РСДБ ядра считается неизменным, а рождение новых компонент джета может его незначительно сдвигать. Об этом упоминается только в Главе 2, однако лучше об этом сказать в первой главе, где этот вопрос возникает сразу.**

*С замечанием согласна. РСДБ-положение незначительно сдвигается во время рождения компонент в джете. Эта переменность учитывается при оценке ошибок координат. Для большинства источников степень и направление оптической поляризации усреднялись по эпохам, что позволило уменьшить влияние переменности. Положение, измеряемое телескопом Gaia также является переменным из-за вспышек в аккреционном диске и рождения компонент. Особенностью анализа степени оптической поляризации источников со значимыми радио-оптическими сдвигами является то, что степень поляризации дает априорную информацию о доминирующем источнике оптического излучения. Оказалось, что она совпадает с наблюдаемым направлением радио-оптических сдвигов.*

# Отзыв от официального оппонента Ю.В. Сотниковой

- > 4. Глава 2, стр. 80, “В нашем исследовании кол-во источников больше и типичный временной интервал существенно шире, чем в [34]”. Также трудно сравнивать временной интервал измерений без перехода в систему отчета источников.

*Сравнивались временные интервалы между первой и последней эпохами наблюдений. В работе [34] интервал составлял 2.3 года, в нашем исследовании медианный интервал был около 7 лет.*

- **Замечания к формулировкам:**
- > 2. Глава 1, п. 1.3, стр. 25. Выборка исследования разбивается на подвыборку квазаров и лацертид, хотя лацертиты могут быть квазарами. Или под квазарами подразумеваются блазары типа flat-spectrum radio quasars (FSRQ)?

*Да. Под квазарами понимались квазары с плоским радиоспектром.*

- *С остальными замечаниями согласна.*