

Поиск экстремального Фарадеевского вращения в активных ядрах галактик

Евгения Кравченко

АКЦ ФИАН, МФТИ



3-я Международная конференция «Субмиллиметровая и миллиметровая астрономия:
цели и инструменты»/ АКЦ ФИАН / 16 апреля 2025

Активные ядра галактик - АЯГ

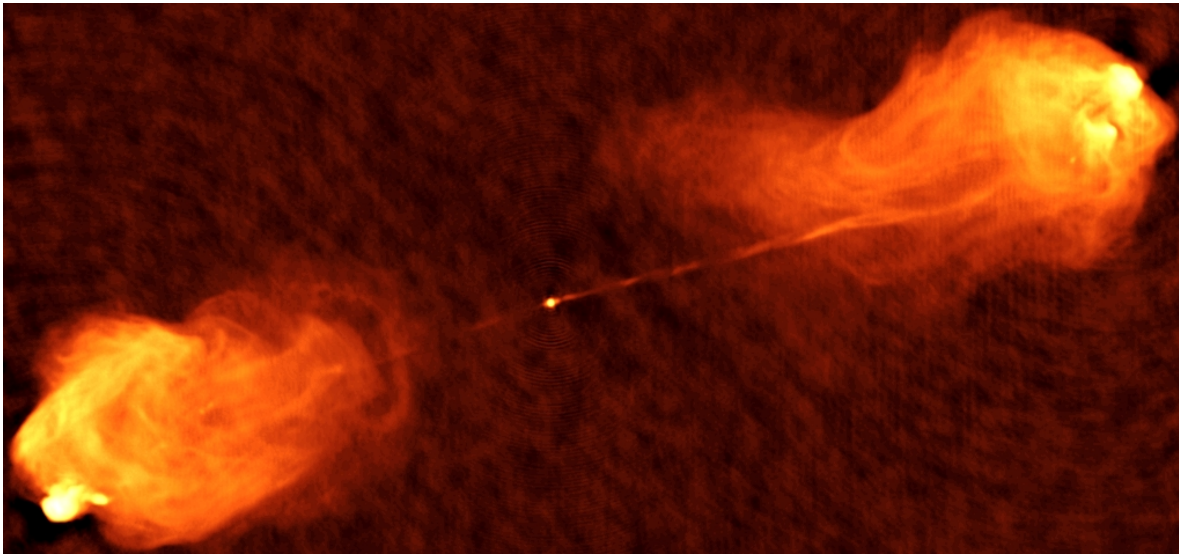
Далекие активные ядра, радио-громкие (мощные струи; 10%)

Запускаются аккрецией на СМЧД

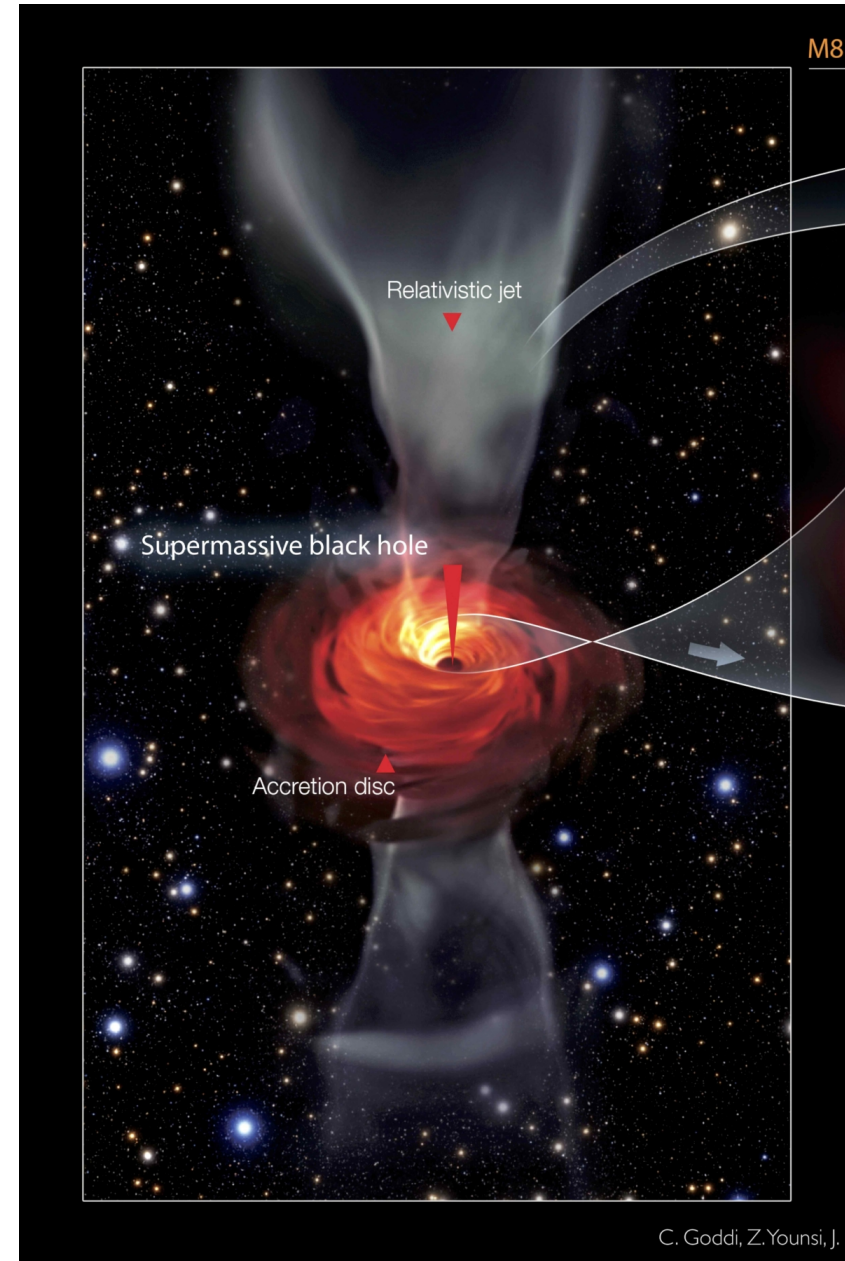
$\beta_{app} < 30c$ [Lister+2019](#)

Наклон к лучу зрения $\Theta \leq 5-10^\circ$ [Lioudakis+2017](#),
[Noman+2021](#)

Допплеровское усиление

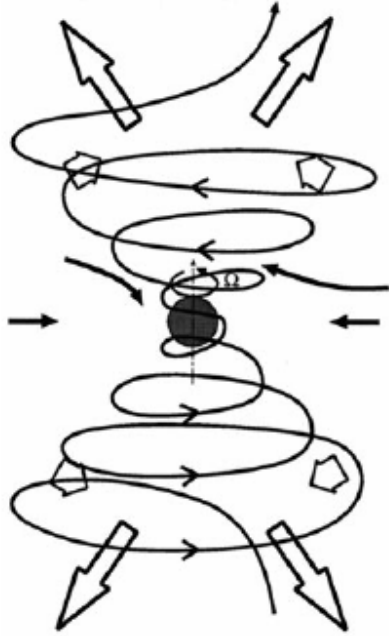


[Carilli & Barthel 1996](#)

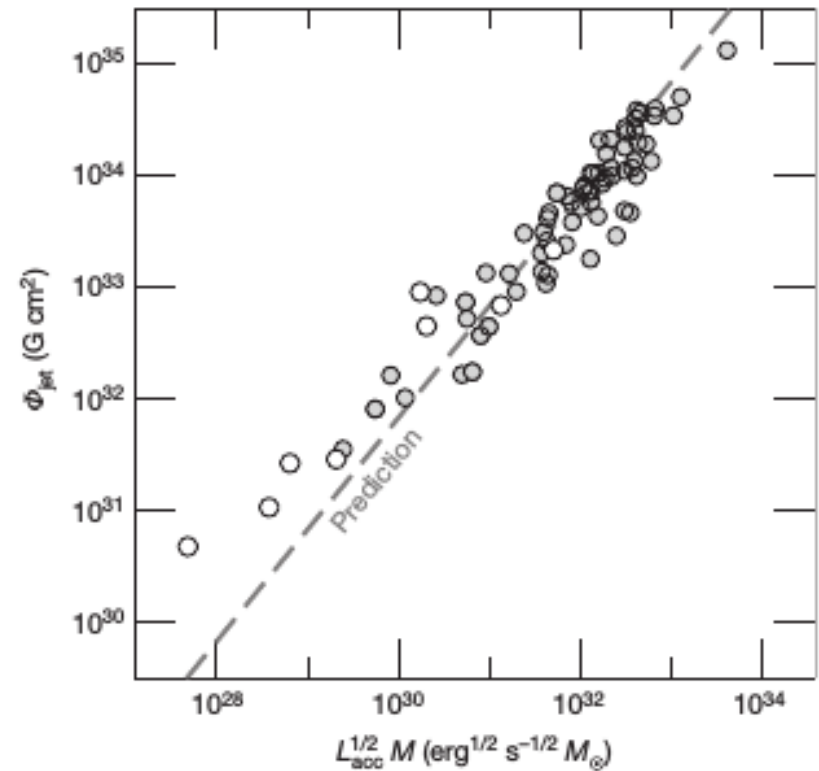


Магнитная гидродинамика струй АЯГ

Струи запускаются магнитогидродинамически извлечением энергии вращения из СМЧД (Meier+2001). Требуется наличие аккреционного диска с сильным полоидальным магнитным полем вокруг вращающейся ЧД.



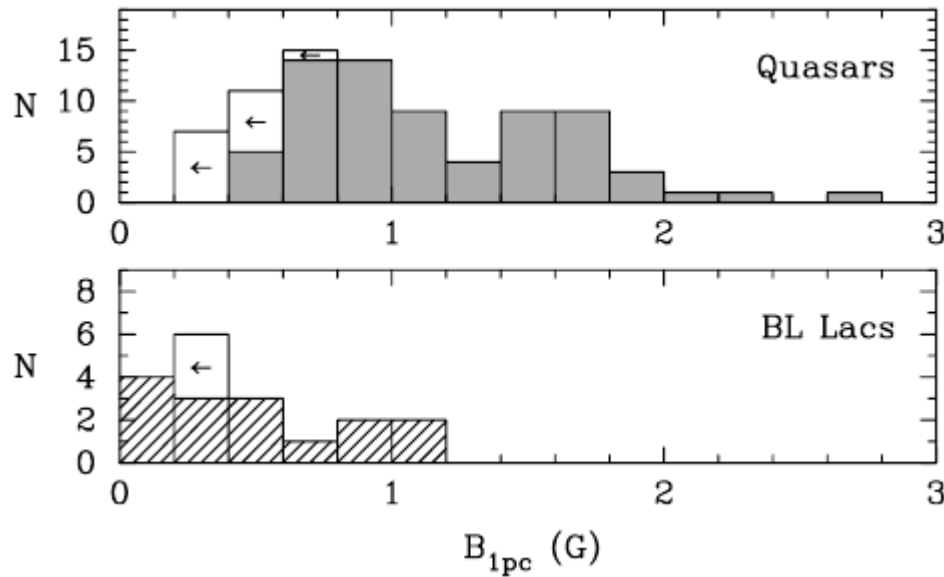
Магнитный поток vs. светимость диска



Полоидальный поток, регулируемый темпом аккреции, достигает насыщения со временем. Магнитное поле вследствие этого доминирует над динамикой плазмы (течений) внутреннего диска и изменяет его структуру т.о. что он становится “магнитно арестованным диском” (Tchekhovskoy+2011, Zamaninasab+2014).

Поляриметрические наблюдения дают наименее модельно зависимую информацию о магнитных полях и окружающем их тепловом веществе.

Магнитные поля АЯГ

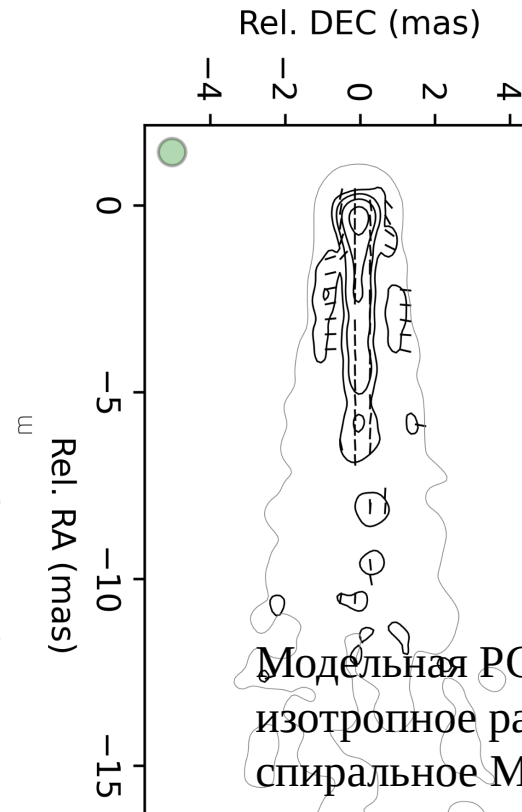
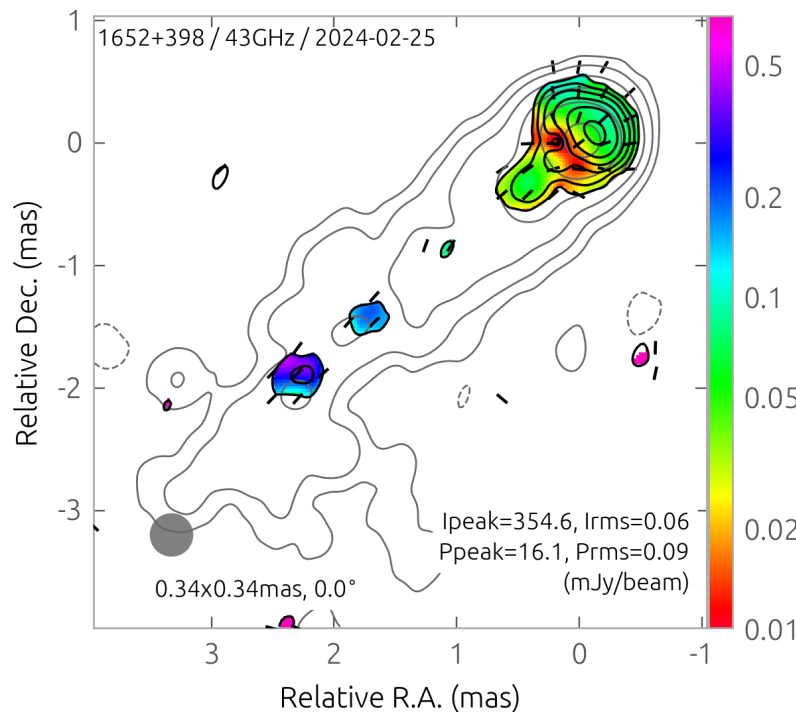


Для запуска джетов механизмом Блэндфорда-Знаека извлечением энергии вращения из СМЧД, $B \sim 10^4$ Гс, [Meier2012](#).

На рисунке показаны оценки напряженности магнитного поля на расстоянии 1 пк от СМЧД методом сдвига ядра, [Pushkarev+2012](#).

M87; $B \sim 1-30$ Гс
[ЕНТ+2021](#)

Линейная поляризация струи Мрк 501, 43 ГГц



[Тодоров, Кравченко+2023](#)
АЖ, 100, 12, 1
[Пащенко+2025](#)

Space VLBI

HALCA (Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy) 8-м антенна. Project name VSOP (VLBI Space Observatory Programme) в 1997-2005 на 5ГГц ([Hirabayashi+2000](#)).

Spektr-R 10-м антенна, project name RadioAstron работал в 2011-2019 на 2, 5 и 22ГГц ([Kardashev+2017](#)).

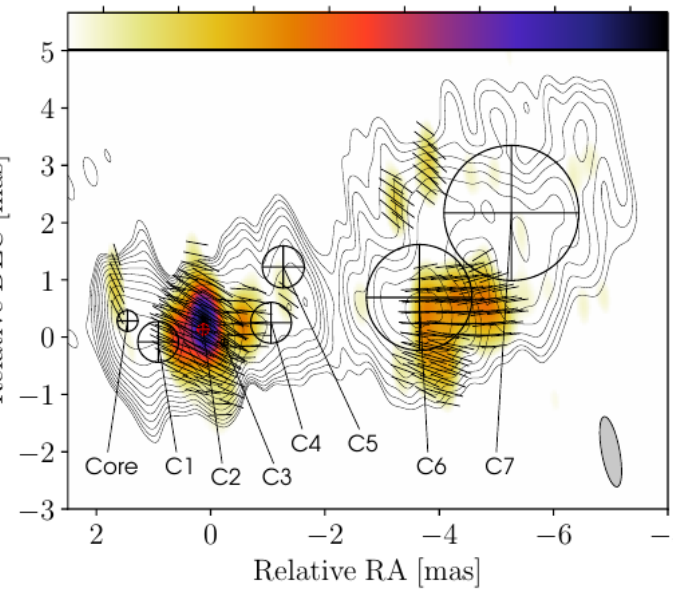
Две ключевых научных программы по измерению поляризации АЯГ:

- Обзор АЯГ (PI: Y.Y. Kovalev; [Kovalev+ in prep.](#))
- Картографирования (PI: J.L. Gomez; [Bruni+2020](#))

АЯГ	Дата (Полоса; Ссылка)
0642+690	03.2013 (L; Lobanov+2015)
BL Lacertae	09.2013 (L), 11.2013 (K; Gomez+2016) , 10.2017 (K)
3C273	01.2014 (K; Bruni+2017) , 06.2014 (K; Bruni+2021) , 02.2018
3C279	03.2014 (K; Fuentes+2023) , 01.2018 (K; Toscano+ in prep.)
OJ287	04.2014 (K; Gomez+2022) , 04.2016 (L; Cho+2024) , 04.2016 (K), 03.2017 (K), 04.2018 (K)
0716+714	01.2015 (K; Kravchenko+2020, ApJ, 893, 1)
3C345	03.2016 (L; Poetzel+2021) , 05.2016 (K)
3C454.3	10.2016 (K)
CTA102	10.2016 (K)
3C120	02.2018 (K)

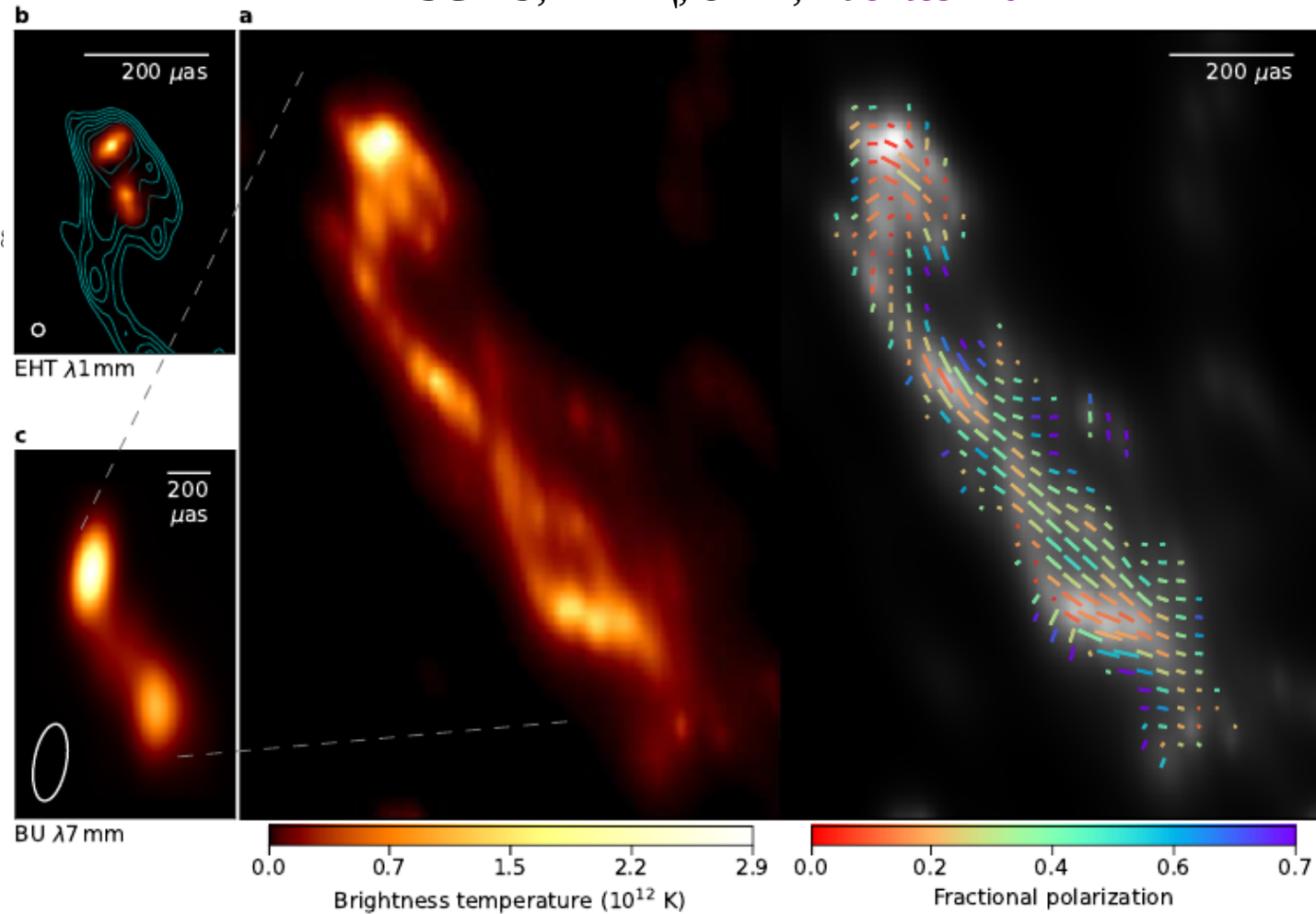
RadioAstron polarimetric view of AGN jets

3C345, 2ГГц, 9ED, Poetzel+2021

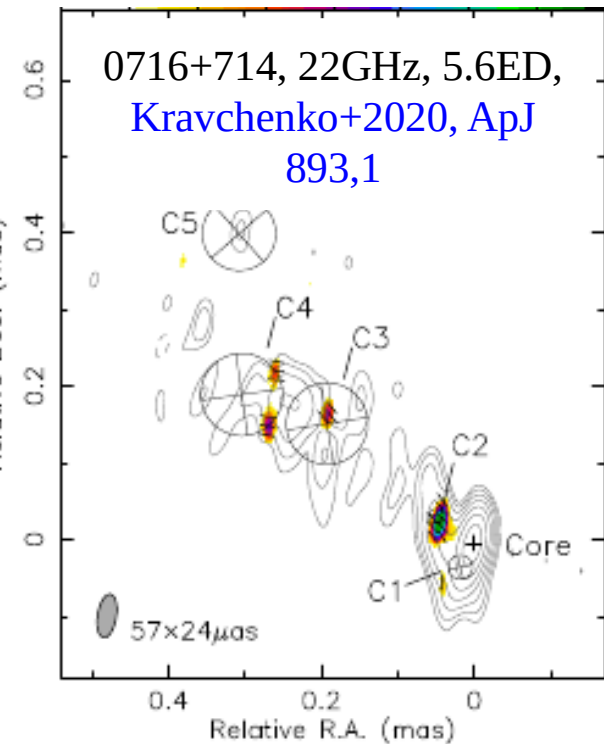


Рекорд углового разрешения на см длинах волн
(21 μ as по OJ287)

3C279, 22ГГц, 8 ED, Fuentes+2022



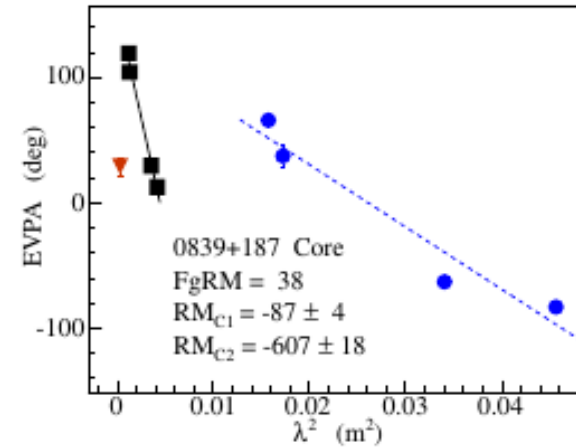
0716+714, 22GHz, 5.6ED,
Kravchenko+2020, ApJ
893,1



Фарадеевское вращение в АЯГ

$$\chi = \chi_0 + \text{RM} \lambda^2.$$

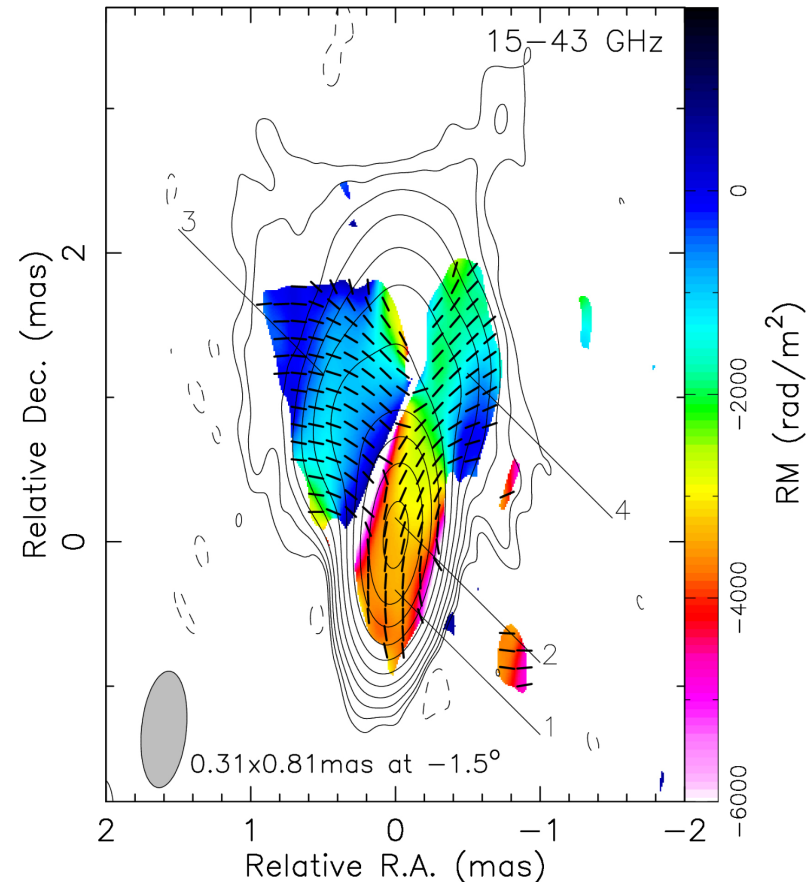
$$\text{RM} \propto \int_{\text{LoS}} n_e \mathbf{B}_{\parallel} \cdot d\mathbf{l}.$$



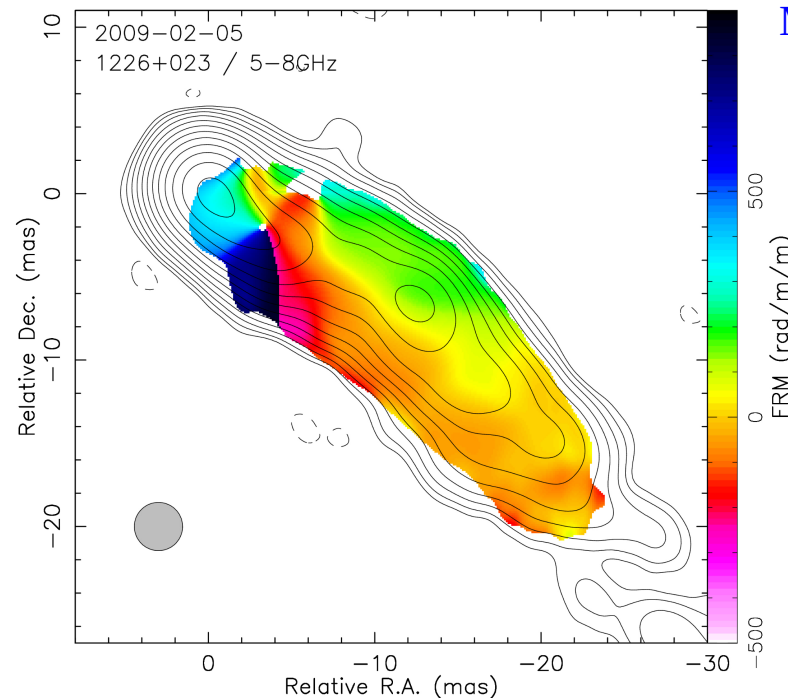
Kravchenko+2017,
MNRAS 467, 83

Карта МВ NRAO 530 на 15-43 ГГц

Lisakov,...Kravchenko+2025, A&A, 693, A9

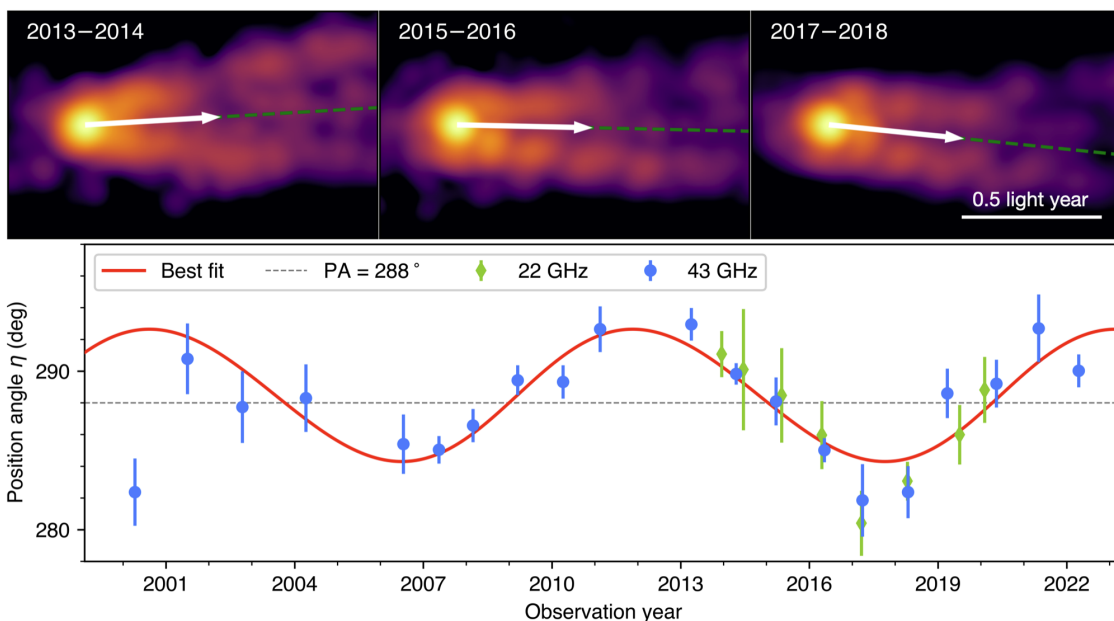


Карта МВ в струе 3C273 на 5-8 ГГц. Тепловая оболочка вокруг релятивистской струи: Lisakov, Kravchenko+2021, ApJ 910,35 // Kravchenko+2017, MNRAS 467, 83



Широкая оболочка вокруг джета. 3C 273

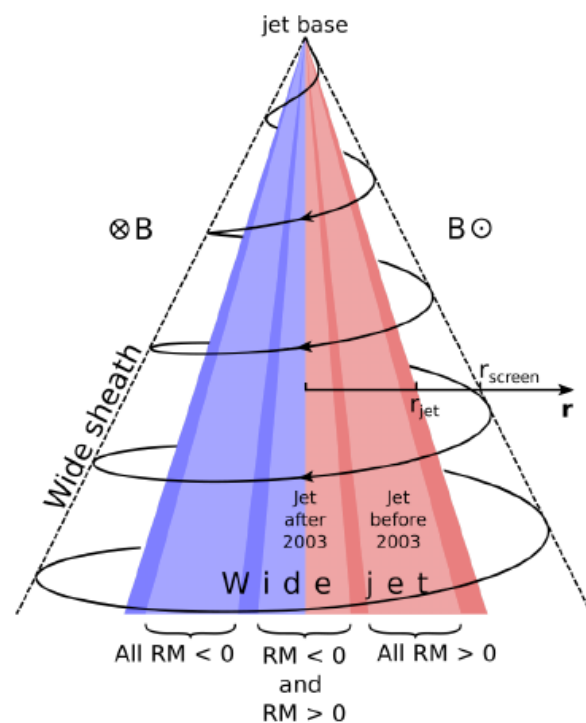
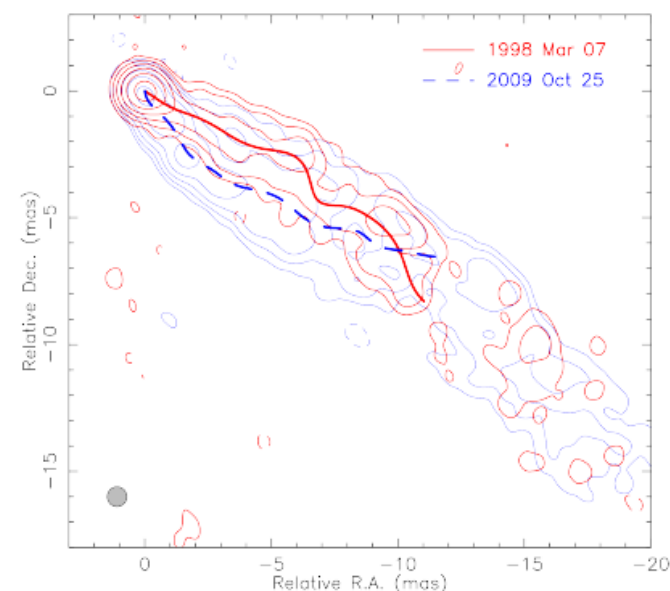
Вариации направления струй АЯГ на парсековых масштабах — частое явление [Lister+2013](#).



Cui,... Kravchenko+2023, Nature 621, 711

Наличие широкой тепловой оболочки вокруг узкой струи в 3C 273, [Lisakov, Kravchenko+2021, ApJ 910,35](#).

Такая же оболочка наблюдается в струе М 87, только созданная аккреционными потоками и ветрами, [Park+2019](#).



Спектрополяриметрия

Фарадеевские эффекты и деполяризация, [Sokoloff+1998](#), [Yushkov+2025](#).

Сложная структура может быть не разрешена геометрически, а поляриметрически. Методики: Фарадеевский синтез и QU-фитирование.

АТСА 2 ГГц наблюдения в полосе 1130-1430 МГц, [O'Sullivan+2012](#)
PKS1039-047, $z=2.59$. См. также [Anderson+2015](#)

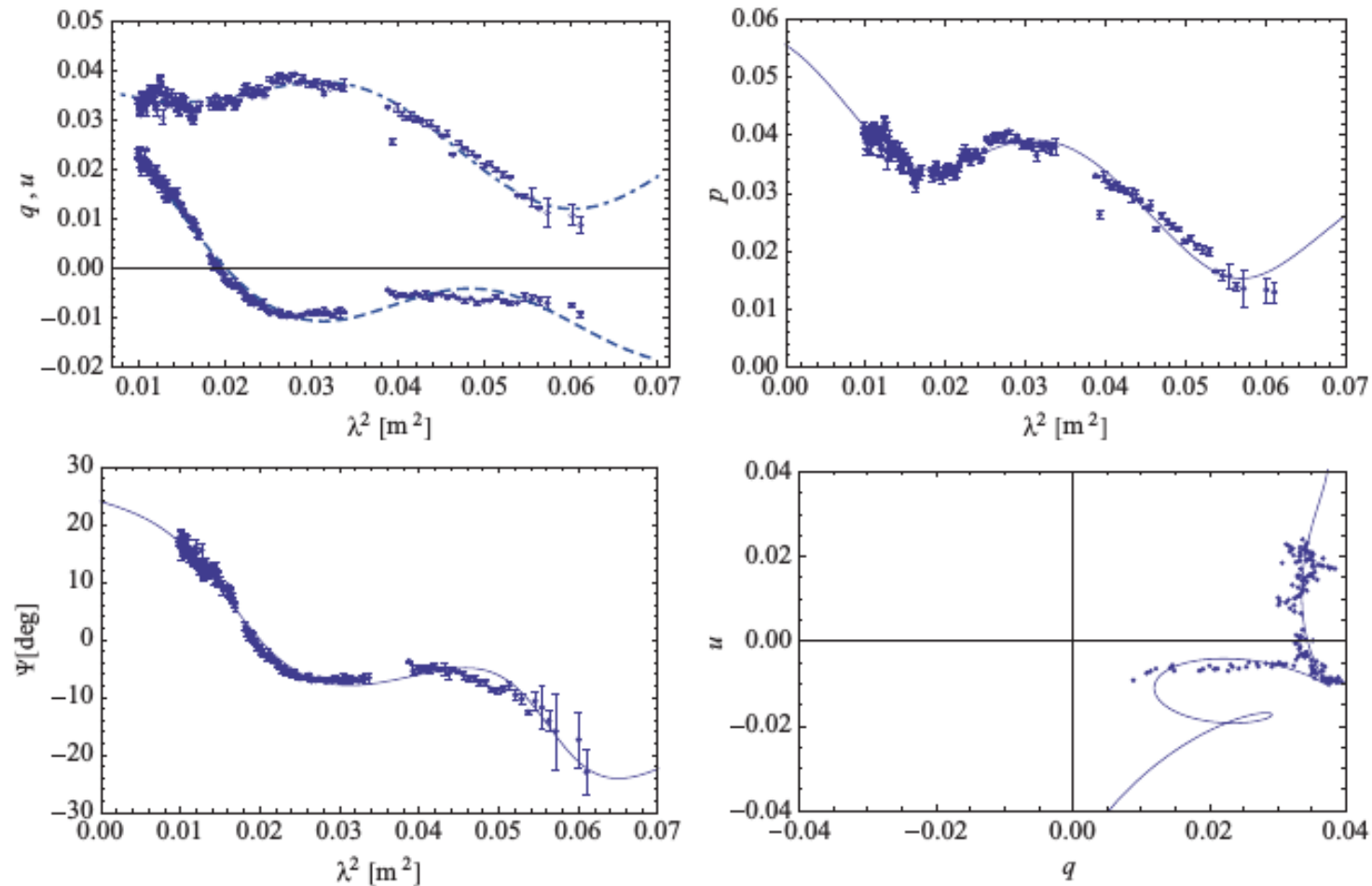
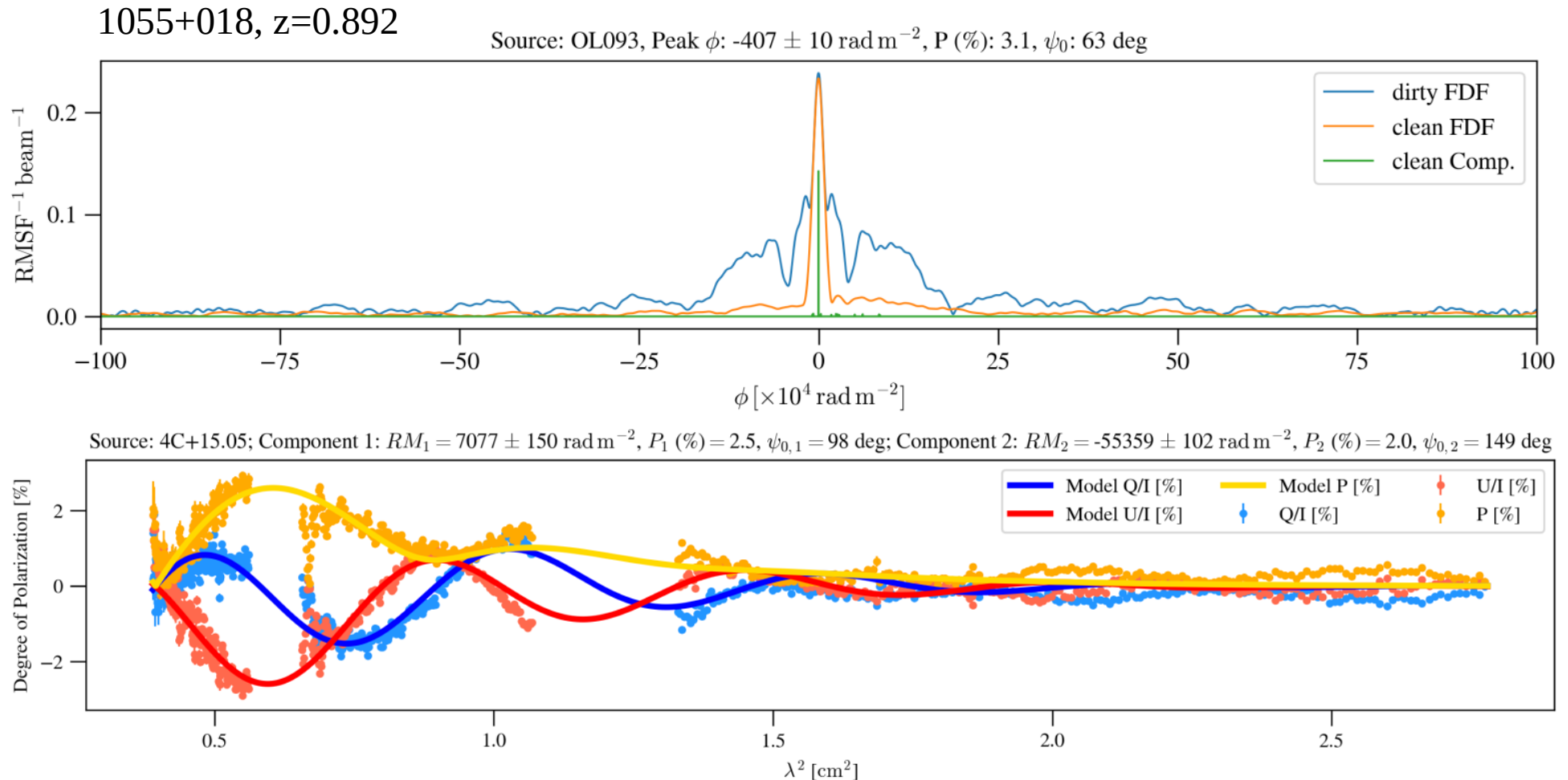


Figure 14. As for Fig. 13 for PKS B1039–47, but fitted by a three RM-component model (all Faraday thin).

Спектрополяриметрия

Сложная структура может быть не разрешена геометрически, а поляриметрически. Методики: Фарадеевский синтез и QU-фитирование.

VLA наблюдения на трех частотах в диапазоне 18-50 ГГц, ширина IF - 32 МГц, 2015 г.



0202+149, $z=0.405$, $MB = -5.5 \times 10^4 \text{ рад/м}^2$

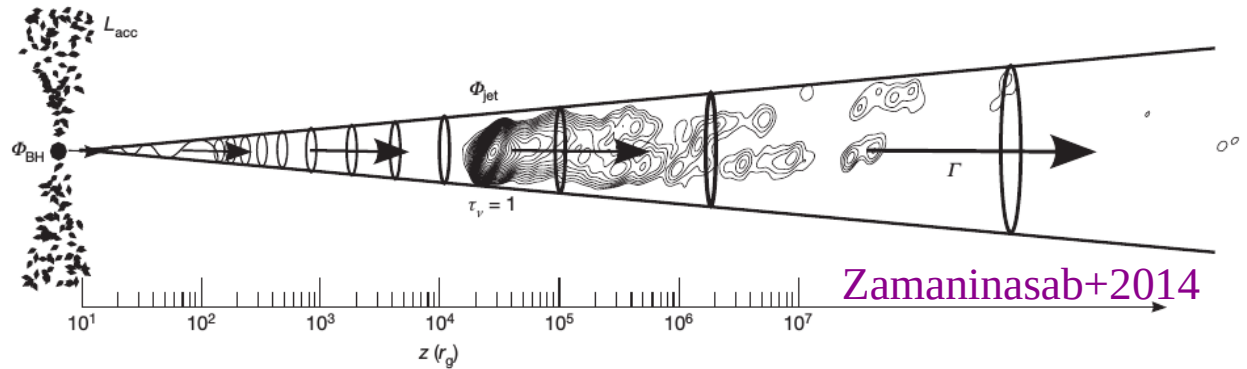
Увеличение МВ с приближением к СМЧД

Из-за синхротронного самопоглощения (Konigl 1981, Lobanov1998) начало струи (“РСДБ ядро”) становится видимым на каком-то расстоянии от СМЧД, там, где $\tau \sim 1$. При наблюдении на более высоких частотах видны области повышенной плотности с более сильными магнитными полями.

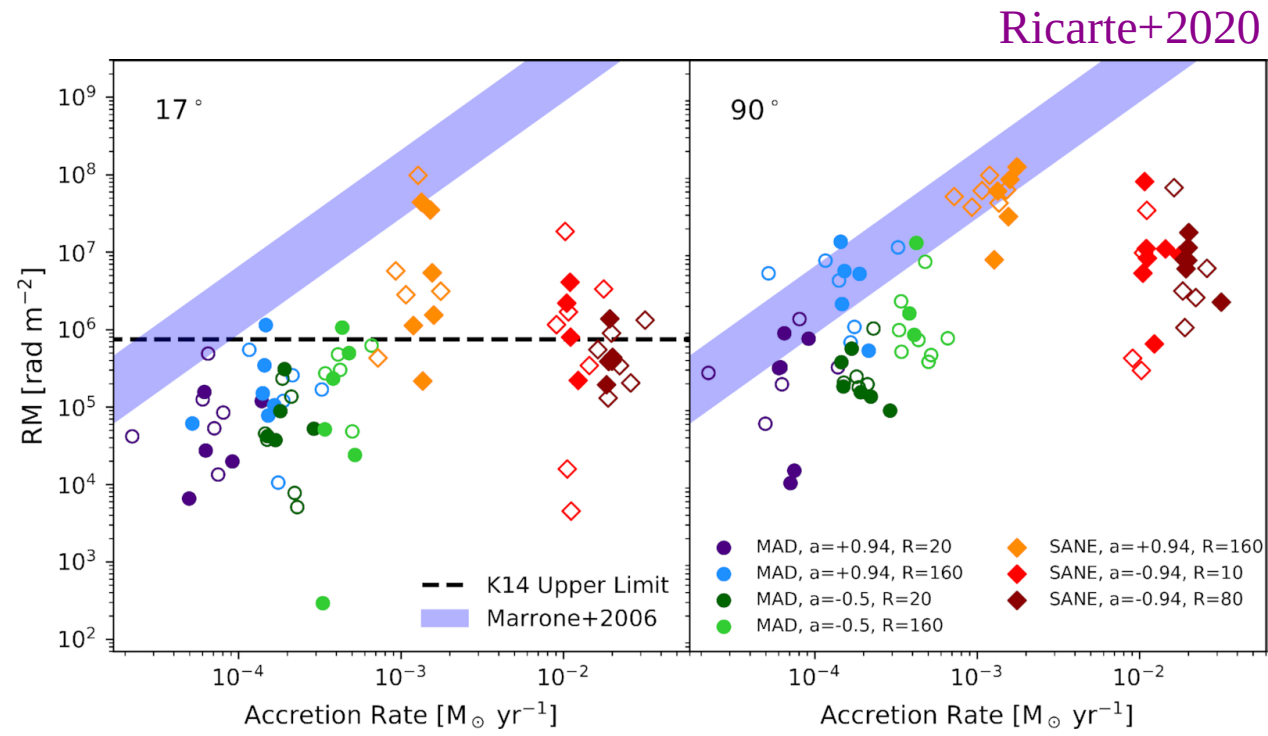
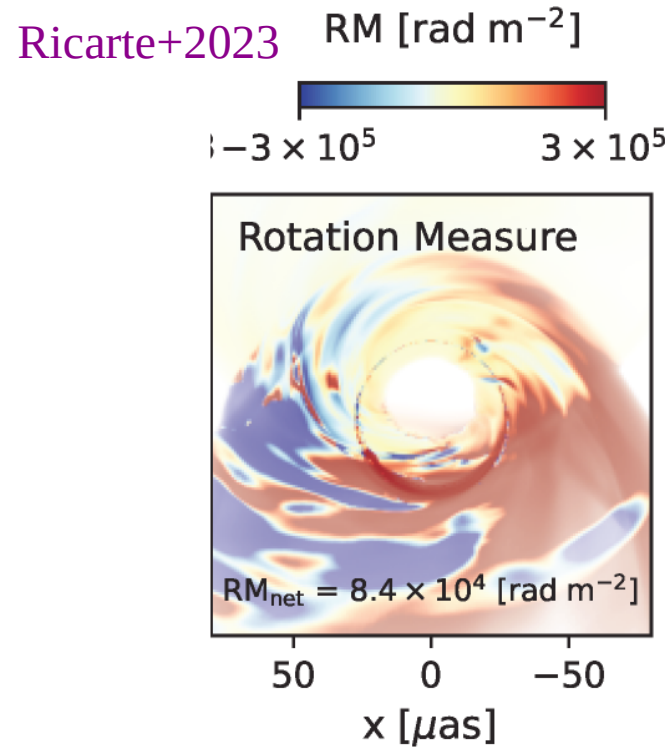
$$r_{\text{core}}(v) \sim v^{-1}$$

Уменьшение напряженности МП с удалением от СМЧД вдоль струи

$$B_p \sim r^{-2} / B_T \sim r^{-1} \qquad |RM| \propto v^a$$



Zamaninasab+2014



Экстремальные меры вращения

Для механизма Блэндфорда-Знаека извлечения энергии вращения из СМЧД, $B \sim 10^4$ Гс (Meier2012).

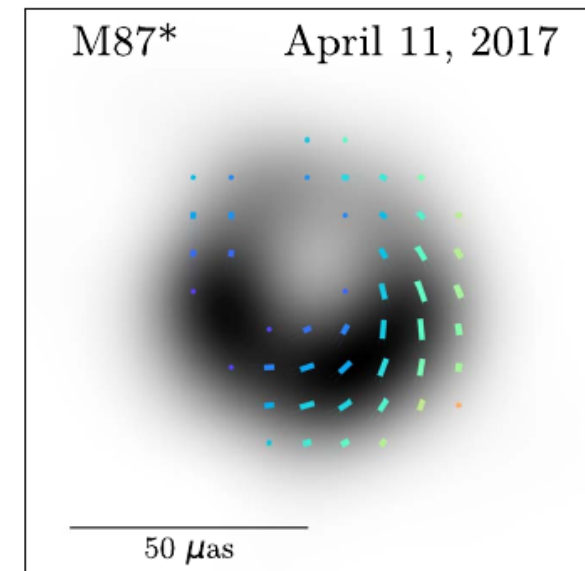
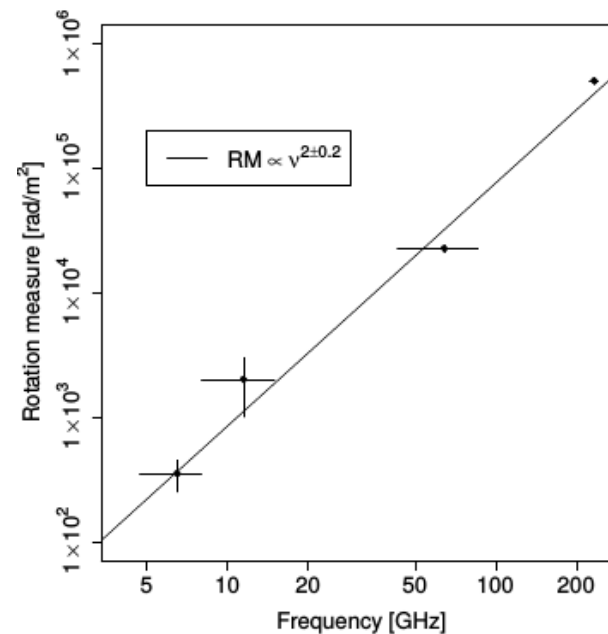
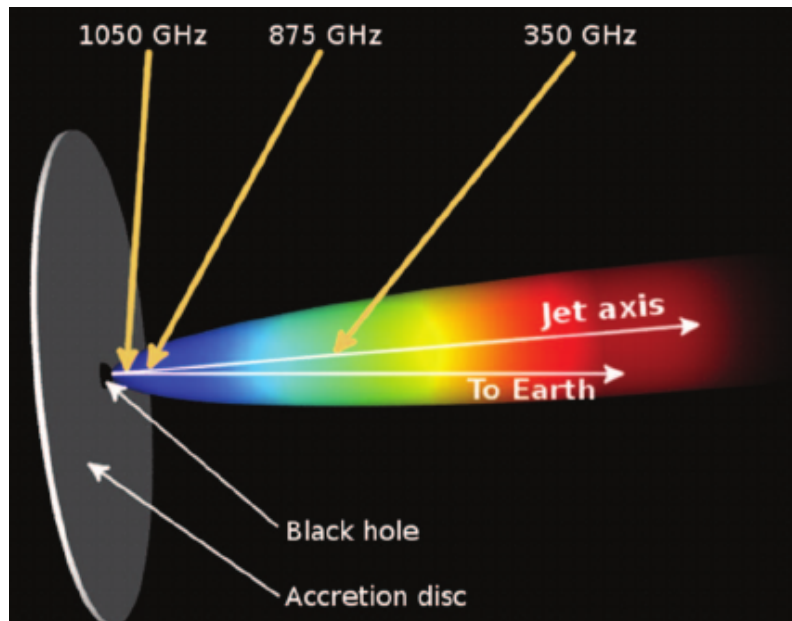
Экстремальные МВ однозначно указывают на окрестности СМЧД и даже на более экзотические объекты.

PKS1830-211
 $RM_{\text{int}} \sim 10^8$ рад/м²
 $B \geq 10$ Гс
Marti-Vidal+2015

3C273
 $RM_{\text{int}} \sim 7 \times 10^5$ рад/м²
Hovatta+2019

$|RM| \propto \nu^a$
3C 84 (NGC 1275)
 $MB = 8.7 \times 10^5$ рад/м²,
Plambeck+2014

M87 $RM_{\text{int}} \sim 10^6$ рад/м²
 $B \sim 1-30$ Г
EHT+2021



Магнитные поля и сами струи АЯГ видны на больших базах интерферометров. Для запуска струй механизмом Блэндфорда-Знаека, $B \sim 10^4$ Гс. Наблюдаются меры Фарадеевского вращения $\sim 10^5$ рад/м². Это согласуется с напряженностью магнитного поля 1 Гс (~ 100 гс) и электронной концентрации 10 см⁻³ в объеме 0.01 пк.

Наблюдения подтверждают МГД запуск струй АЯГ.

Большие МВ однозначно указывают на окрестности СМЧД, а экстремальные МВ могут выявить более экзотические объекты.

Большие МВ можно искать Фарадеевским синтезом, мм-спектрополяриметрией по наблюдениям в широкой полосе