

# Ограничения на пространственное распределение и механизмы нагрева излучающей плазмы в стратифицированном релятивистском джете

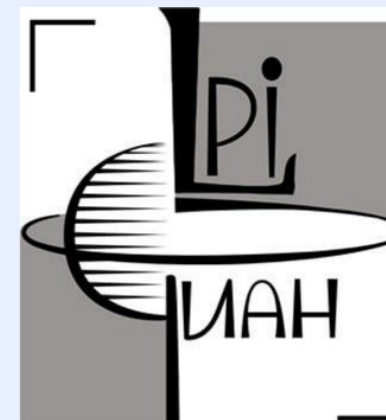
В.А. Фролова\*, Е.Е. Нохрина, И.Н. Пащенко

Московский физико-технический институт  
Физический институт им. Лебедева

\*e-mail: frolova.va@phystech.edu

DOI:10.1093/mnras/stad1381, отсканировать:

Исследование поддержано Российским Научным Фондом, грант 20-72-10078.



## Аннотация

Мы использовали самосогласованные полуаналитические МГД модели, чтобы исследовать роль стратифицированной структуры джета в формировании уярчения к краю. Мы получили, что двугорбые профили возникают в моделях с высоким максимальным Лоренц-фактором или в оптически толстых джетах, и трёхгорбые профили ограничивают долю излучающих частиц в джете; в предпочтительных моделях нетепловые электроны локализованы на краях джета или распределены согласно Омическому нагреву.

## 1. Введение

Наблюдения в высоком разрешении показывают выраженную двух- или трёхгорбую структуру интенсивности излучения и спектрального индекса для джета в ряде источников, т.ч. M87 (см., например, Nikonov et al. 2023).

Этот эффект может быть связан с рядом факторов: это

(i) неоднородная структура джета;

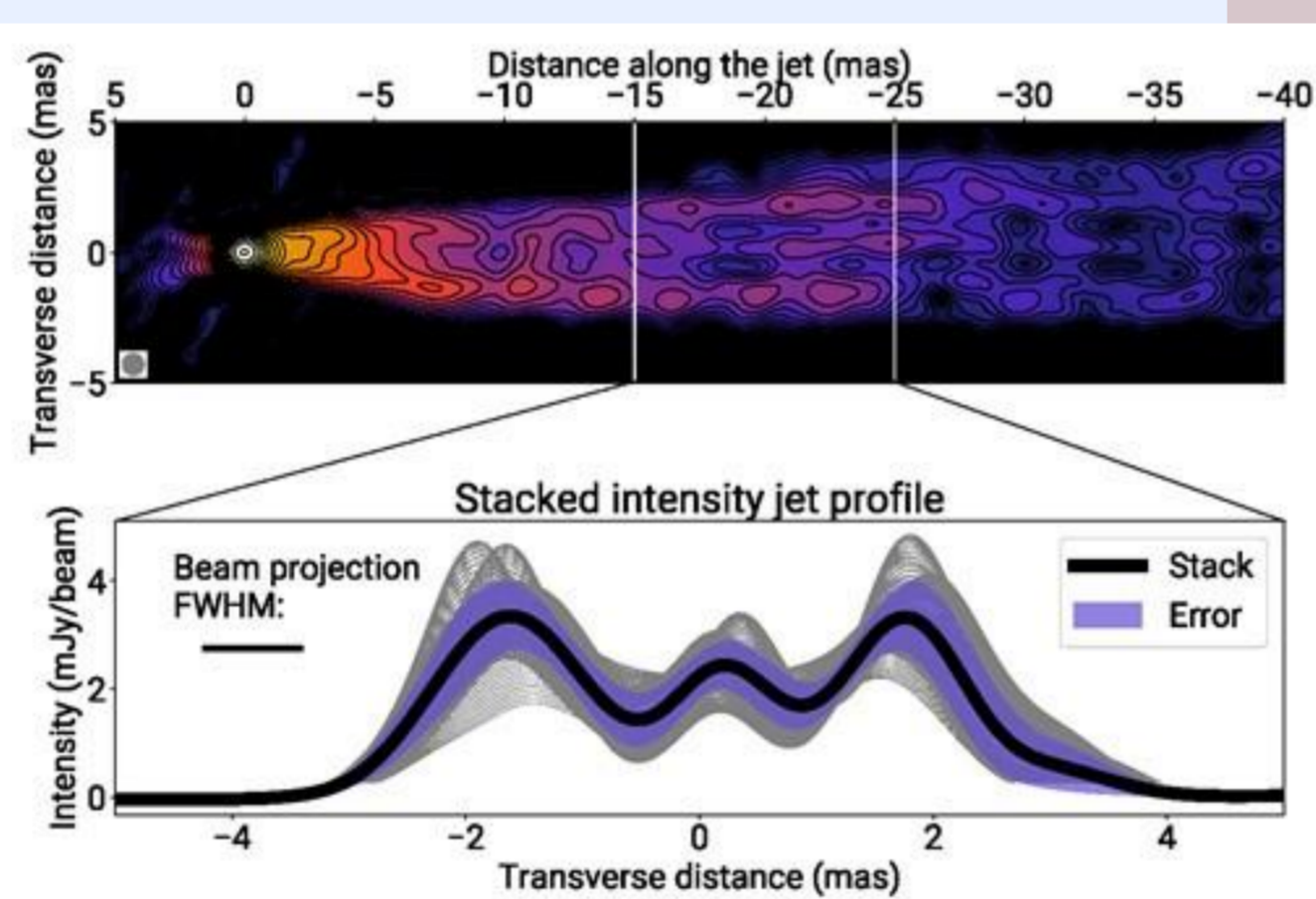
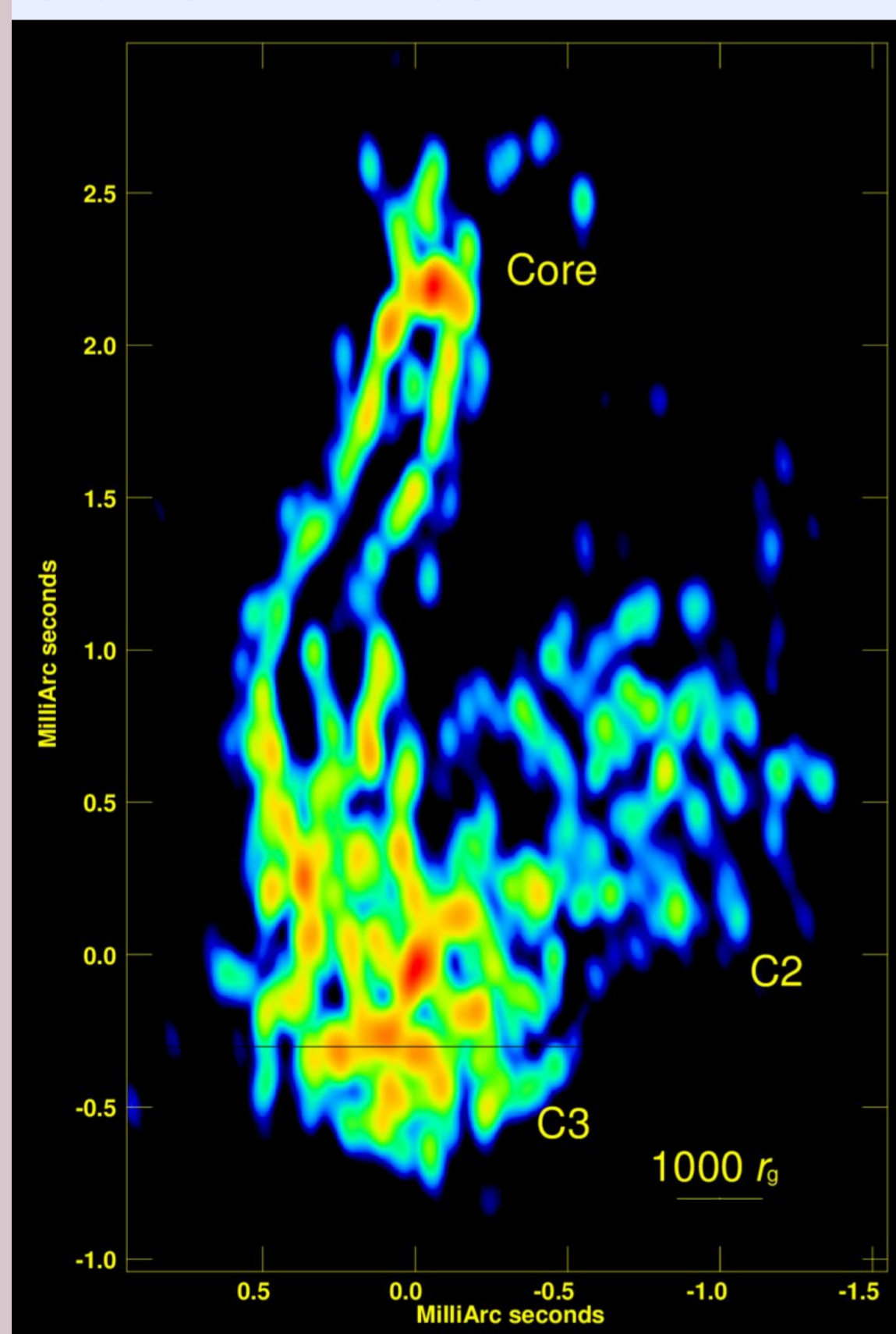
(ii) пространственное распределение излучающих частиц, которое может возникать, благодаря

- развитию неустойчивостей,
- ускорению плазмы на областях с большим градиентом скоростей
- Омическому нагреву или
- равномерному распределению магнитной и кинетической энергии;

(iii) эффекты оптической толщи.

Многие из этих факторов могут присутствовать одновременно.

В данной работе мы рассмотрели роль стратифицированной структуры в формировании эффекта, используя самосогласованные МГД модели.



Сверху, Рис. 1. Пример трёхгорбого поперечного профиля интенсивности: карта M87 на частоте 15.4 ГГц, Nikonov et al. 2023

Слева, Рис. 2. Пример двугорбого поперечного профиля интенсивности: карта 3C84 на частоте 22 ГГц, Giovannini et al. 2018

Справа, Рис. 3 и 4. Примеры поперечных профилей интенсивности. Сплошными и пунктирными линиями обозначены профили без свёртки и со свёрткой с круглой диаграммой направленности размером 0.1 ширины джета.

## 3. Результаты

Мы получили следующие зависимости от параметров:

1. **Угол наблюдения.** Профили для источников с большим углом наблюдения («радиогалактик») шире, чем для «блазаров».
2. **Скорость.** Профили для сильно замагниченных и, следовательно, более быстрых джетов обладают значительной асимметрией. В случае высокой замагниченности в M2, рост концентрации к краю вместе с Допплеровским усилением приводят к уярчению краёв, наиболее заметному для высокой оптической толщи.
3. **Оптическая толщина.** Центральный кор вносит решающий вклад в излучение оптически тонких джетов. Двугорбые профили возникают в оптически толстых джетах, но эффект выражен слабо. Качественно, переход от двугорбого к одногорбому профилю интенсивности в 3C 273 на частотах 1.6-4.8 ГГц (Bruni et al. 2021) может быть объяснён только эффектами оптической толщи.
4. **В случае, когда вся релятивистская плазма имеет одно и то же распределение по энергиям поперёк джета, любые эффекты уярчения краёв требуют существенной оптической толщи, в то время как только самые оптически прозрачные джеты не оказываются избыточно яркими. Таким образом, для качественного и количественного воспроизведения трёхгорбых профилей необходим неоднородный нагрев.** В слабо и сильно замагниченных джетах, для описания трёхгорбых профилей наиболее предпочтительны распределение нетепловых электронов преимущественно на краях джета (не более или порядка 1% частиц в центральном коре излучают) и Омический нагрев соответственно.

## Литература

1. Nikonov A.S., Kovalev Y.Y., Kravchenko E.V., Pashchenko I.N., Lobanov A.P., Properties of the jet in M87 revealed by its helical structure imaged with the VLBA at 8 and 15 GHz, 2023, MNRAS, Vol. 526, Issue 4, pp.5949-5963
2. Giovannini G. et al., A wide and collimated radio jet in 3C84 on the scale of a few hundred gravitational radii, 2018, Nature Astronomy, Vol. 2, pp. 472-477
3. Ginzburg V.L., Syrovatskii S.I., Cosmic Magnetobremstrahlung (synchrotron Radiation), 1965, ARA&A, Vol. 3, p.297
4. Lyubarsky Y., Asymptotic Structure of Poynting-Dominated Jets, 2009., ApJ, Vol. 698, Issue 2, pp.1570-1589
5. Beskin V.S., Chernoglazov A.V., Kiselev A.M., Nokhrina E.E., On the internal structure of relativistic jets collimated by ambient gas pressure, 2017, MNRAS, Vol. 472, Issue 4, pp.3971-3978
6. Bruni G. et al., RadioAstron reveals a spine-sheath jet structure in 3C 273, 2021, A&A, Vol. 654, A27, pp.9

## 2. Моделирование

Мы численно решаем уравнение переноса излучения для синхротронного излучения с самопоглощением (Ginzburg & Syrovatskii 1965) в цилиндрическом приближении, используя две полуаналитические МГД-модели со стратифицированной структурой – с постоянной угловой скоростью (M1, Lyubarsky 2009) и с полным замыканием тока внутри джета (M2, Beskin et al. 2017). Отличие моделей состоит в наличии в M2 медленной оболочки с занулением скорости на границе джета и ростом концентрации частиц в силу взаимодействия с внешней средой. Мы строим поперечные профили излучения для близкого источника и анализируем зависимость от следующих параметров: угол наблюдения, безразмерный радиуса джета (связан со спином чёрной дыры), начальная замагниченность (связана с максимальным Лоренц-фактором), оптическая толщина (связана с мощностью джета). Мы также рассматриваем несколько пространственных распределений излучающих частиц.

