Ускорение частиц и нетепловое излучение галактического микроквазара SS433

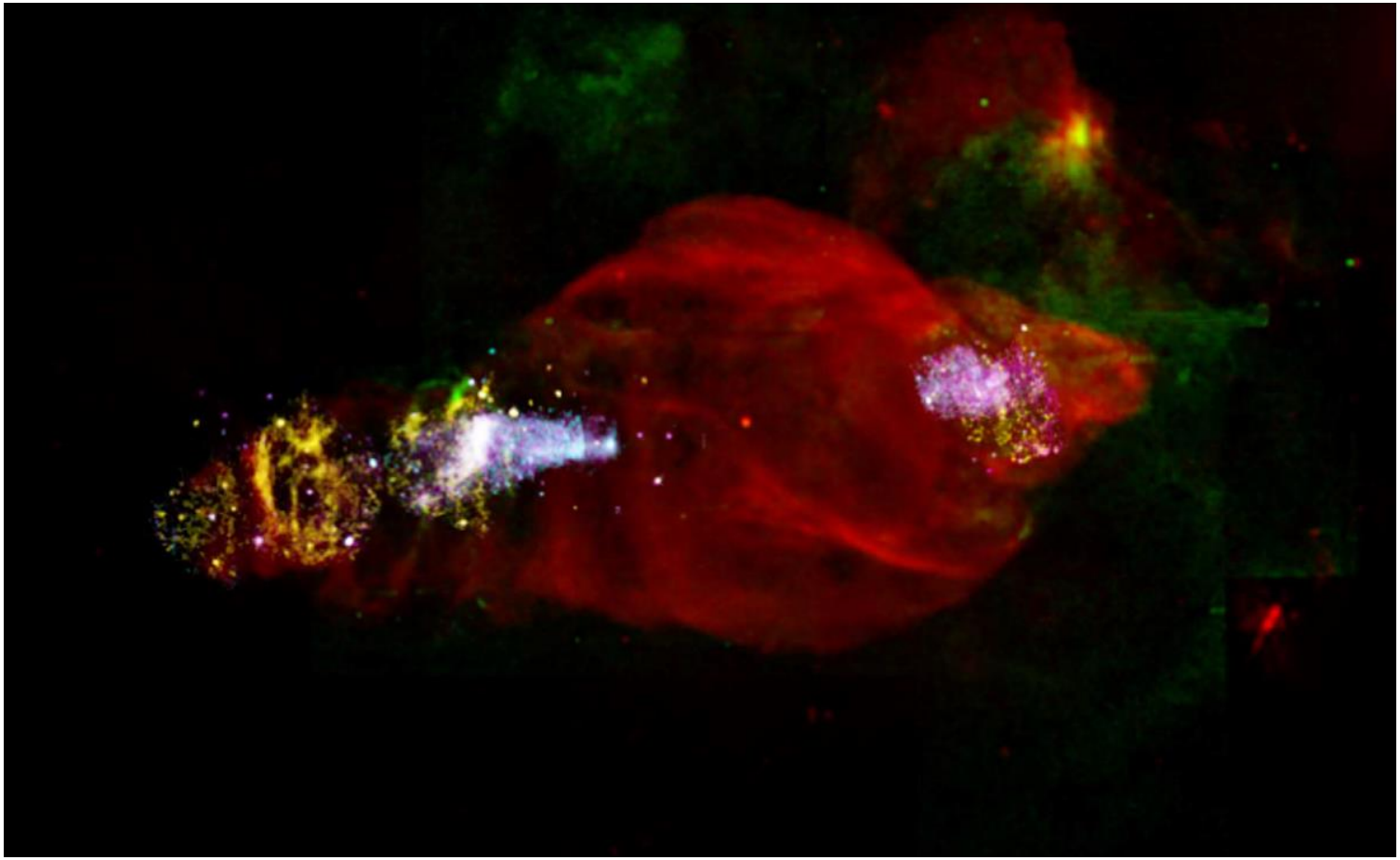
Романский В. И., Быков А. М., Осипов С. М., Уваров Ю. А,
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

Всероссийская конференция по космическим лучам

1 июля 2026

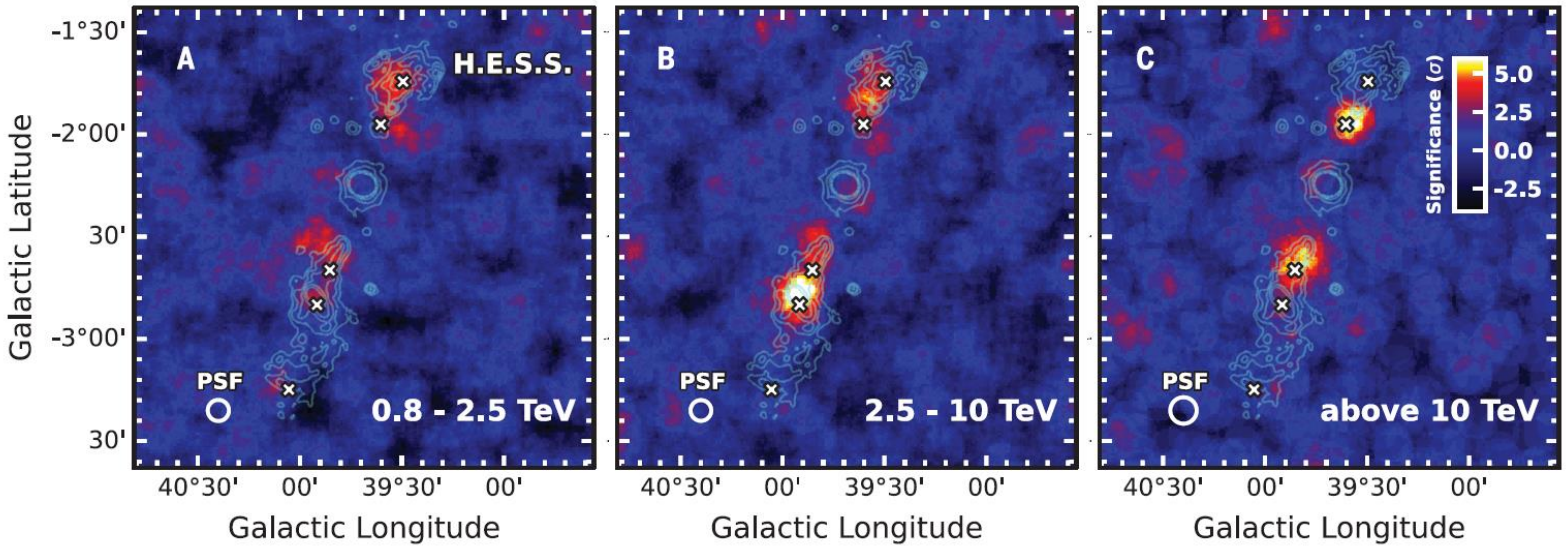
Работа поддержана Российским научным фондом (грант №25-72-20007)

Туманность W50 вокруг микроквазара SS433

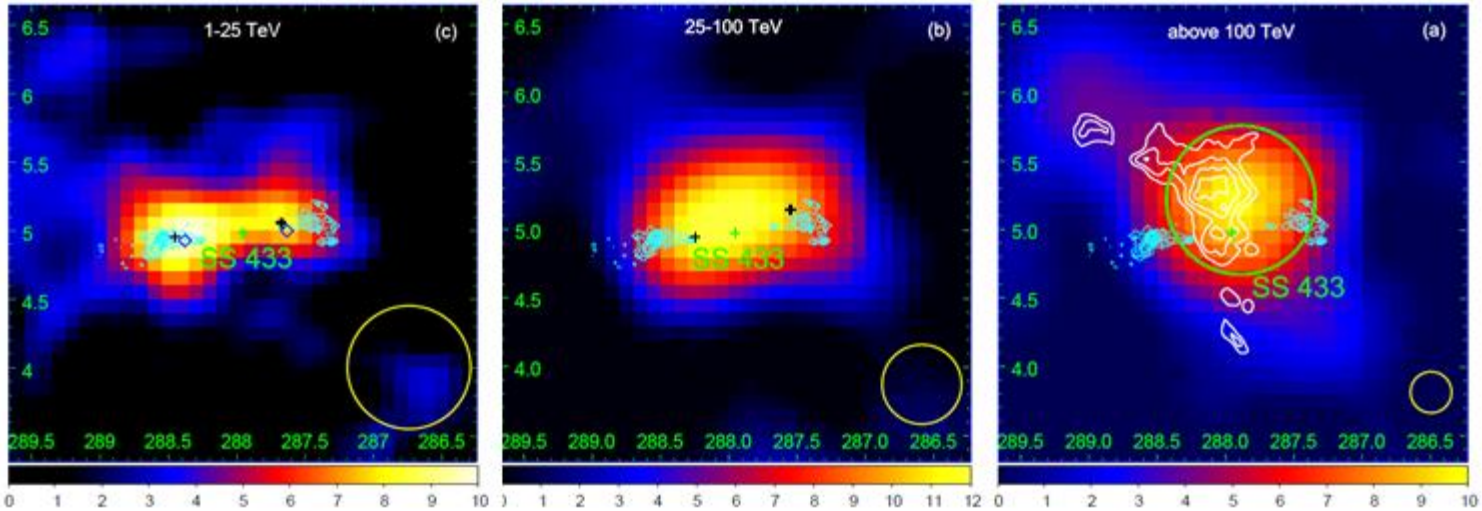


Туманность W50 вокруг микроквазара SS433 Safi-Harb et. al. Apj 935 (2022). Композитное изображение красный – радио, зеленый – оптика, желтый – мягкий рентген, голубой – жесткий рентген. Расстояние до туманности 5.5 кпс, размеры 200x100 парсек.

Высокоэнергичное излучение W50

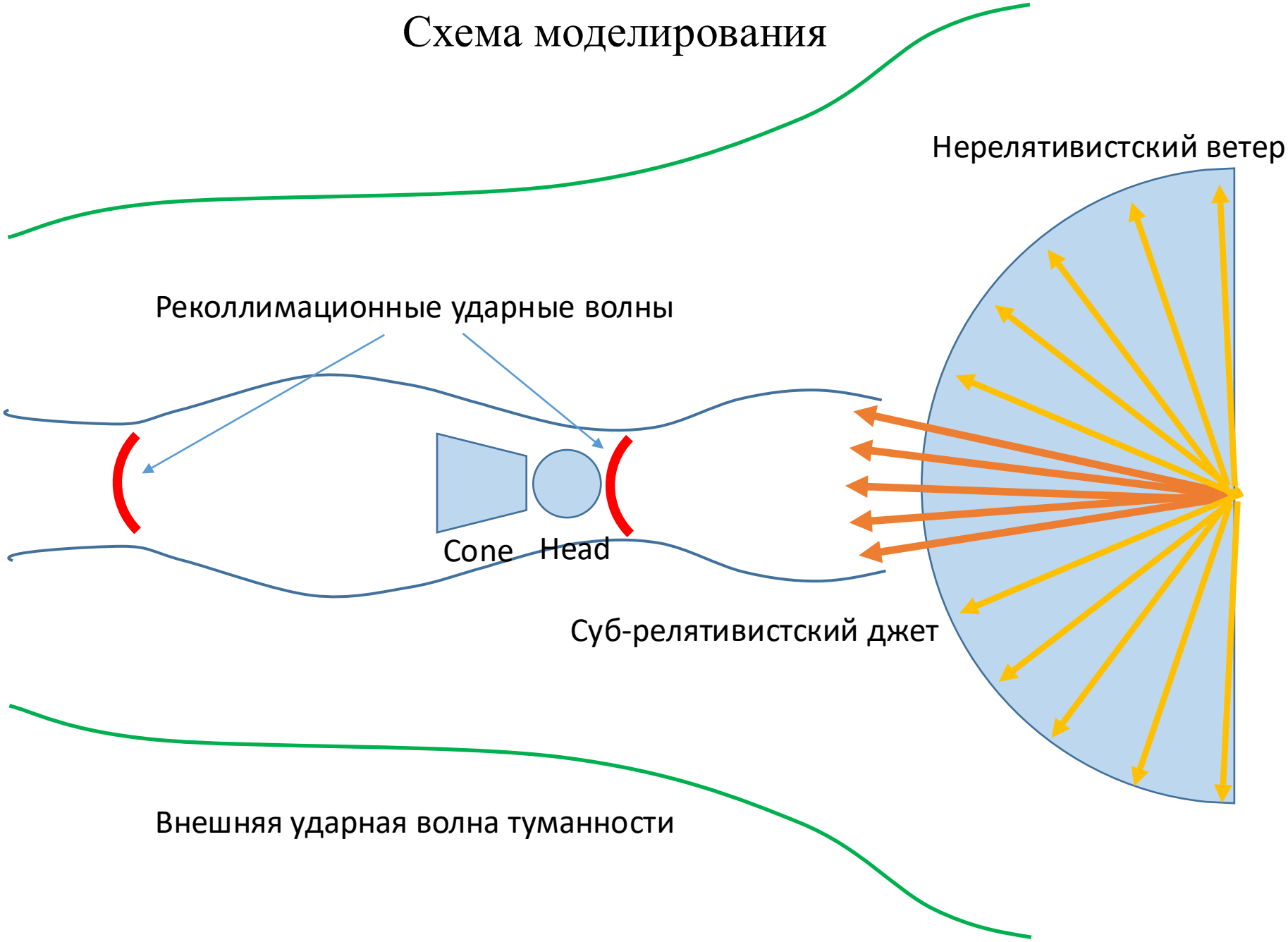


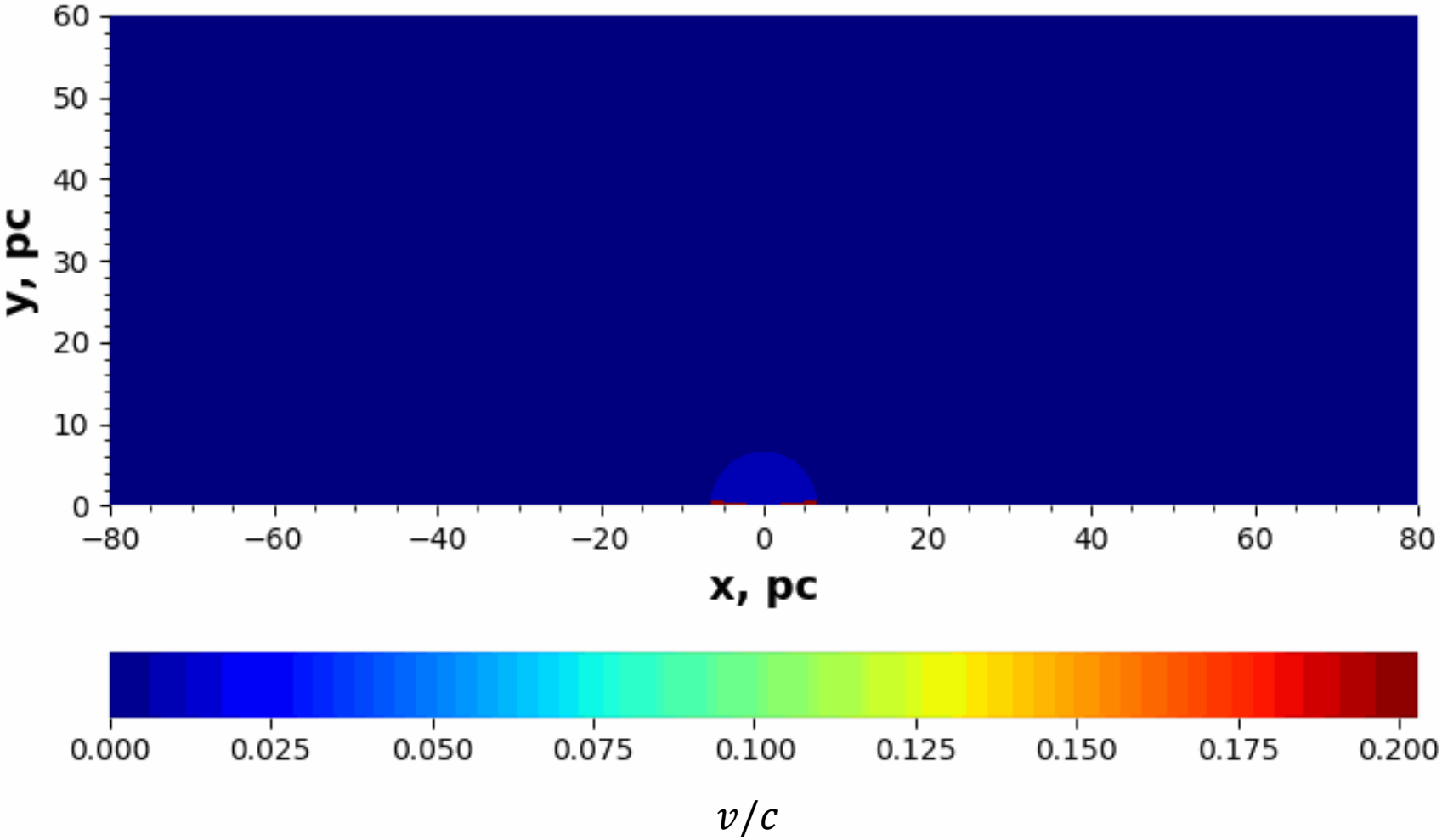
Карта гамма излучения по данным обсерватории H.E.S.S. Aharonian F. et. al. Science 383, 402 (2024)



Карта гамма излучения по данным обсерватории LHAASO Zhen Cao et. al. NSR 12, 12 (2025)

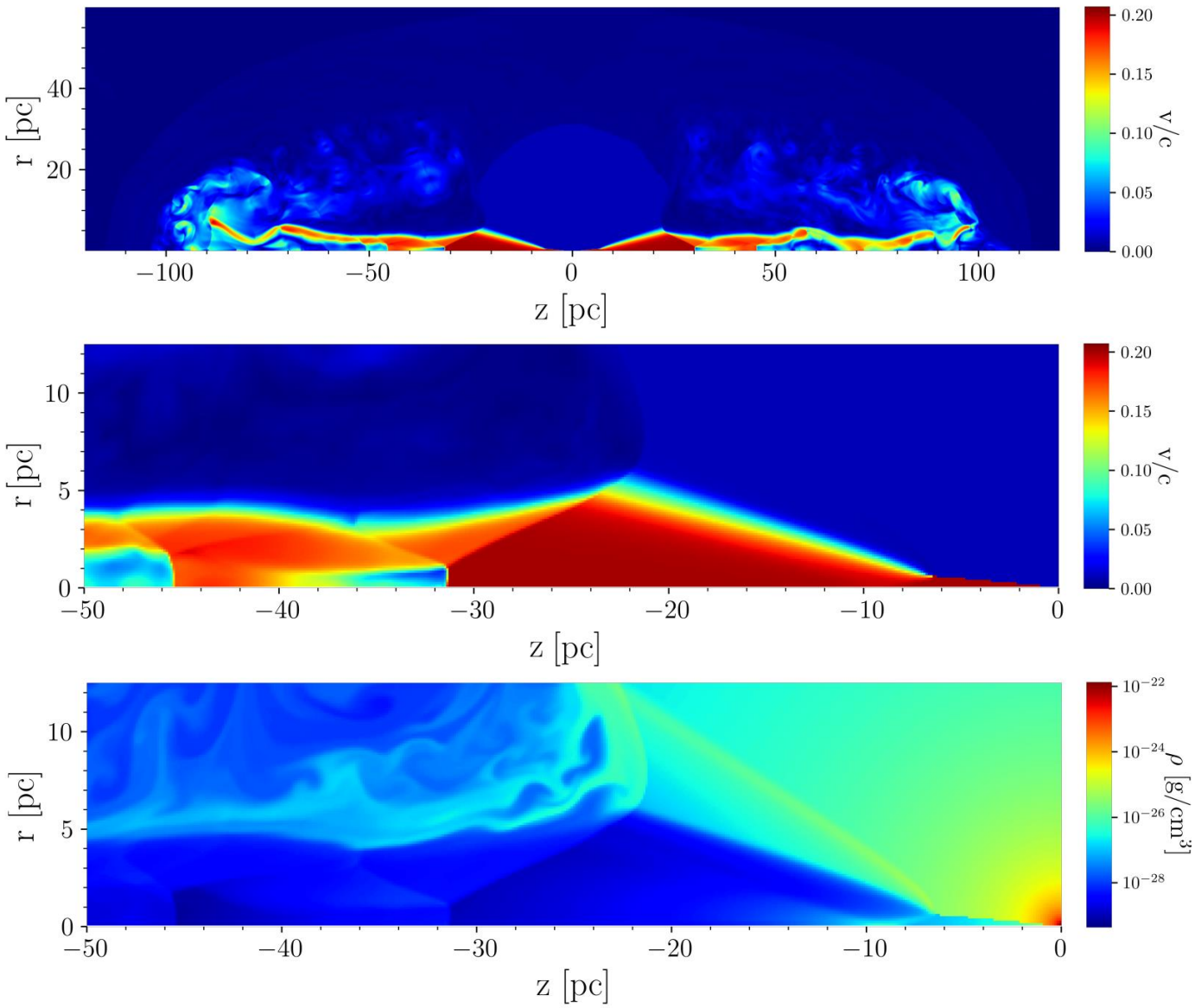
Схема моделирования





Использовался код PLUTO Mignone et. al. ApJSS 170 (2007)

Результаты МГД моделирования



Кинетическая мощность

2×10^{39} эрг/с

Скорость ветра

3×10^{8} см/с

Скорость джета

6×10^{9} см/с

Внешняя плотность

0.005 см$^{-3}$

Внешняя температура

8×10^{4} К

Внешнее поле

1 мкГс

Bykov, A. M. et. al. Phys. Rev. D, 112(6), 063017 (2025)

Моделирование ускорения частиц методом Монте-Карло

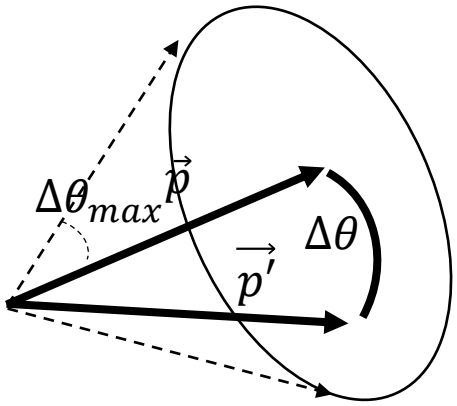
Код разработан А. Владимировым, Д. Элисоном, С. Осиповым

A. M. Bykov, D. C. Ellison, S. M. Osipov, and A. E. Vladimirov, ApJ 789, 137 (2014)

- Одномерная стационарная модель
- Рассеяние частиц по феноменологическому закону рассеяния
- Турбулентное магнитное поле характеризуется спектральной плотностью энергии W(x,k)
- Учитывается усиление магнитного поля за счет неустойчивостей вызванных током ускоренных частиц
- Итеративный процесс по подбору профиля УВ, сохраняющего закон сохранения импульса

$$B_{ls}(x,k_{res}) = \sqrt{4\pi \int_{k_{min}}^{k_{res}} W(x,k)dk + B_0^2}$$

$$\frac{k_{res}pc}{qB_{ls}(x,k_{res})} = 1$$

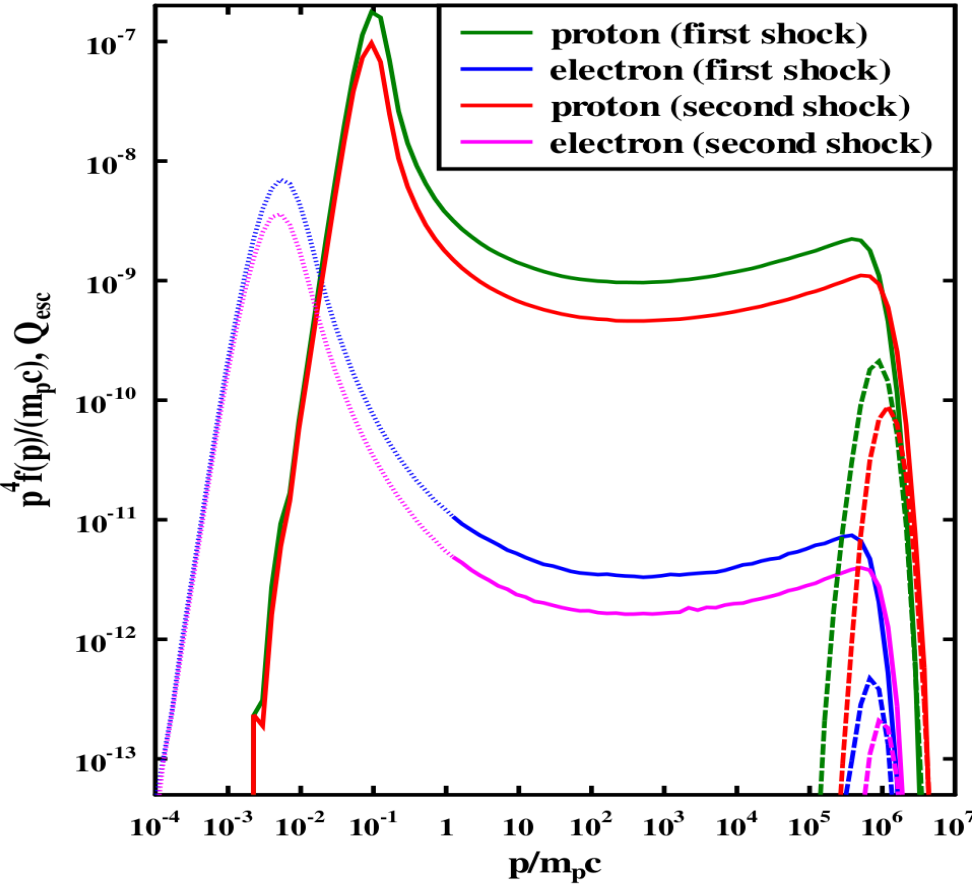


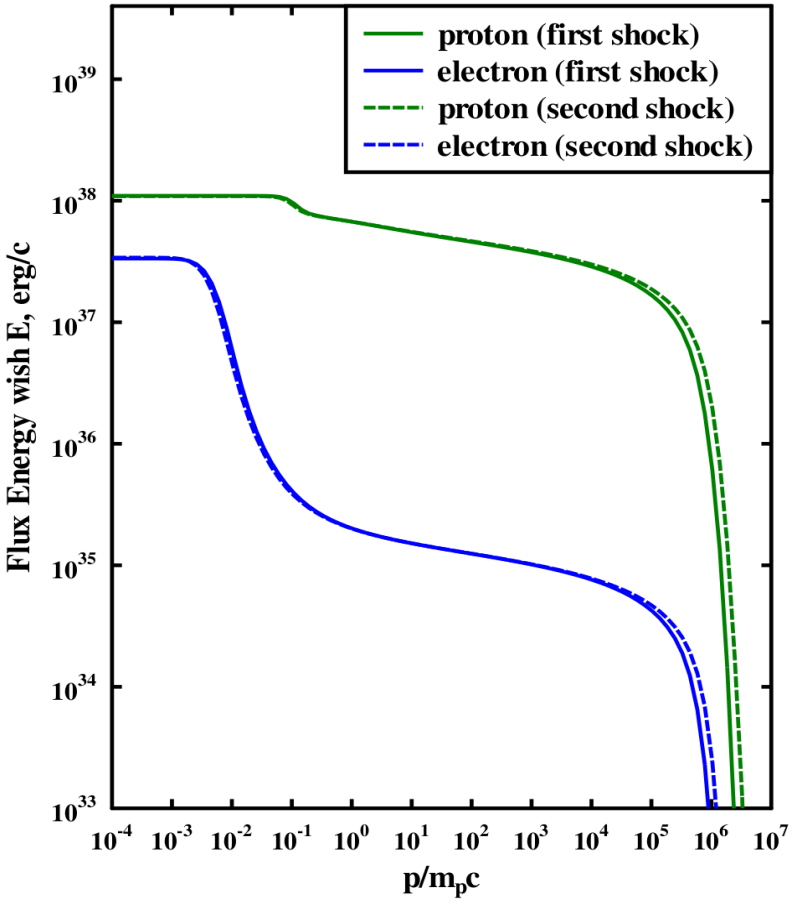
$$\lambda(x,p) = \frac{cp}{qB_{ls}(x,p)}$$

$$cos\Delta\theta = 1 - \epsilon(1 - cos\Delta\theta_{max})$$

$$dt = \frac{\lambda(x,p)}{v}\frac{\Delta\theta^2{}_{max}}{4}$$

Спектр ускоренных частиц



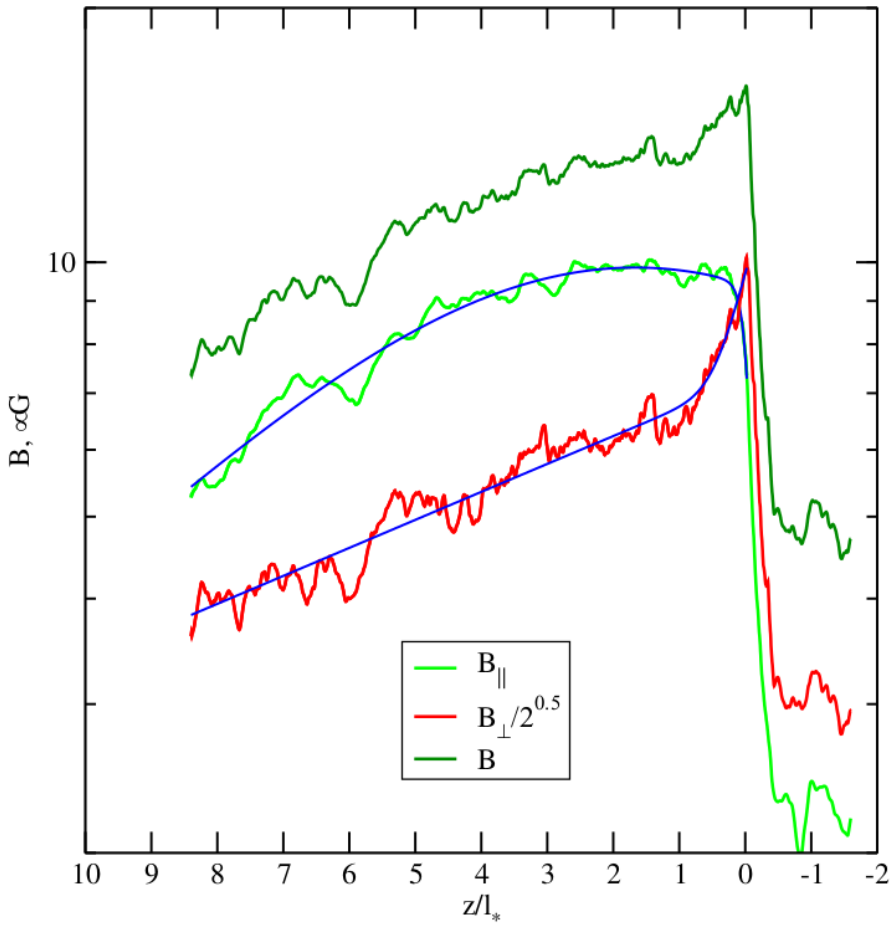


Спектр ускоренных частиц, полученный Монте-Карло моделированием.
Протоны ускоряются до энергий порядка нескольких ПэВ

Кинетическая мощность в частицах с импульсами больше данного

Bykov, A. M. et. al. Phys. Rev. D, 112(6), 063017 (2025)

Усиление турбулентного магнитного поля



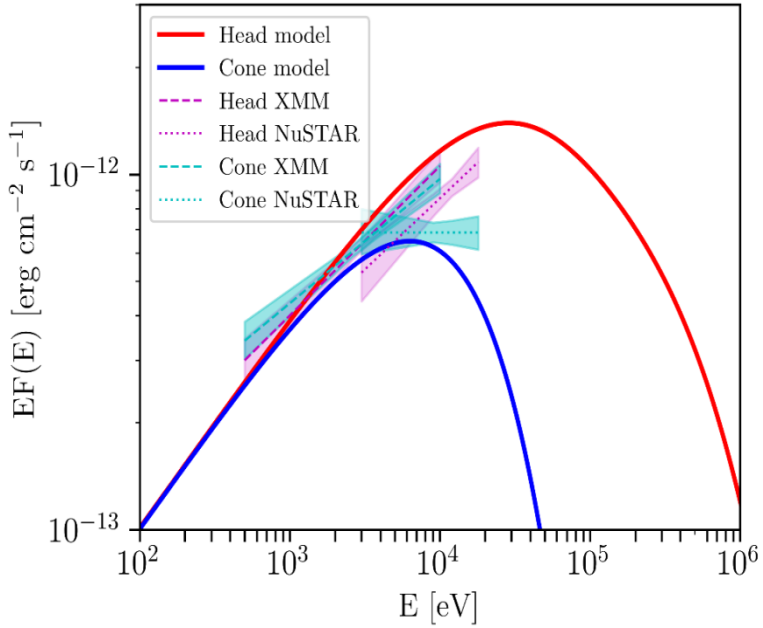
Прохождения турбулентности, созданной белловской неустойчивостью, через фронт ударной волны приводит к анизотропии турбулентности.

Профиль магнитного поля важен для профиля интенсивности и поляризации

Моделирование рентгеновского излучения

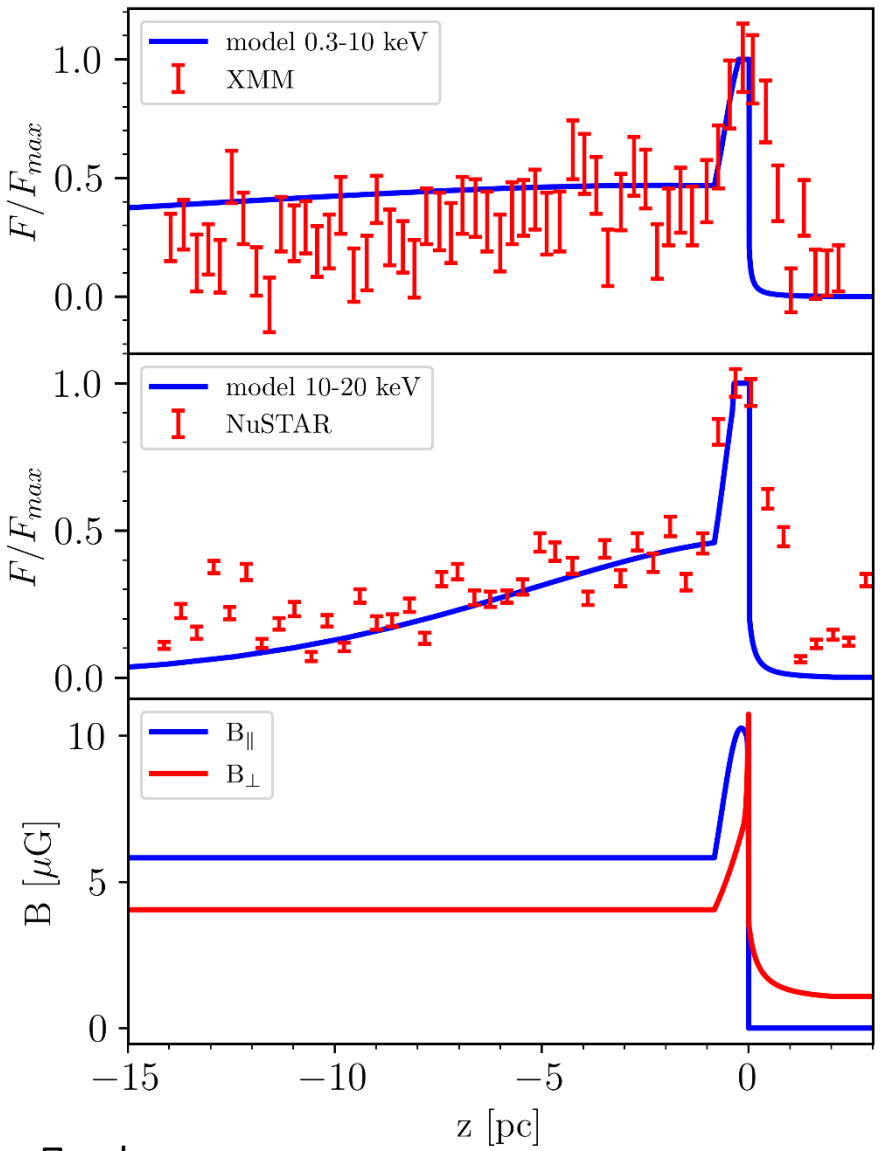
Адвекционный перенос электронов в downstream с учетом потерь энергии на излучение.

Уровень инжекции электронов, необходимый для объяснения излучения 8×10^{-3}



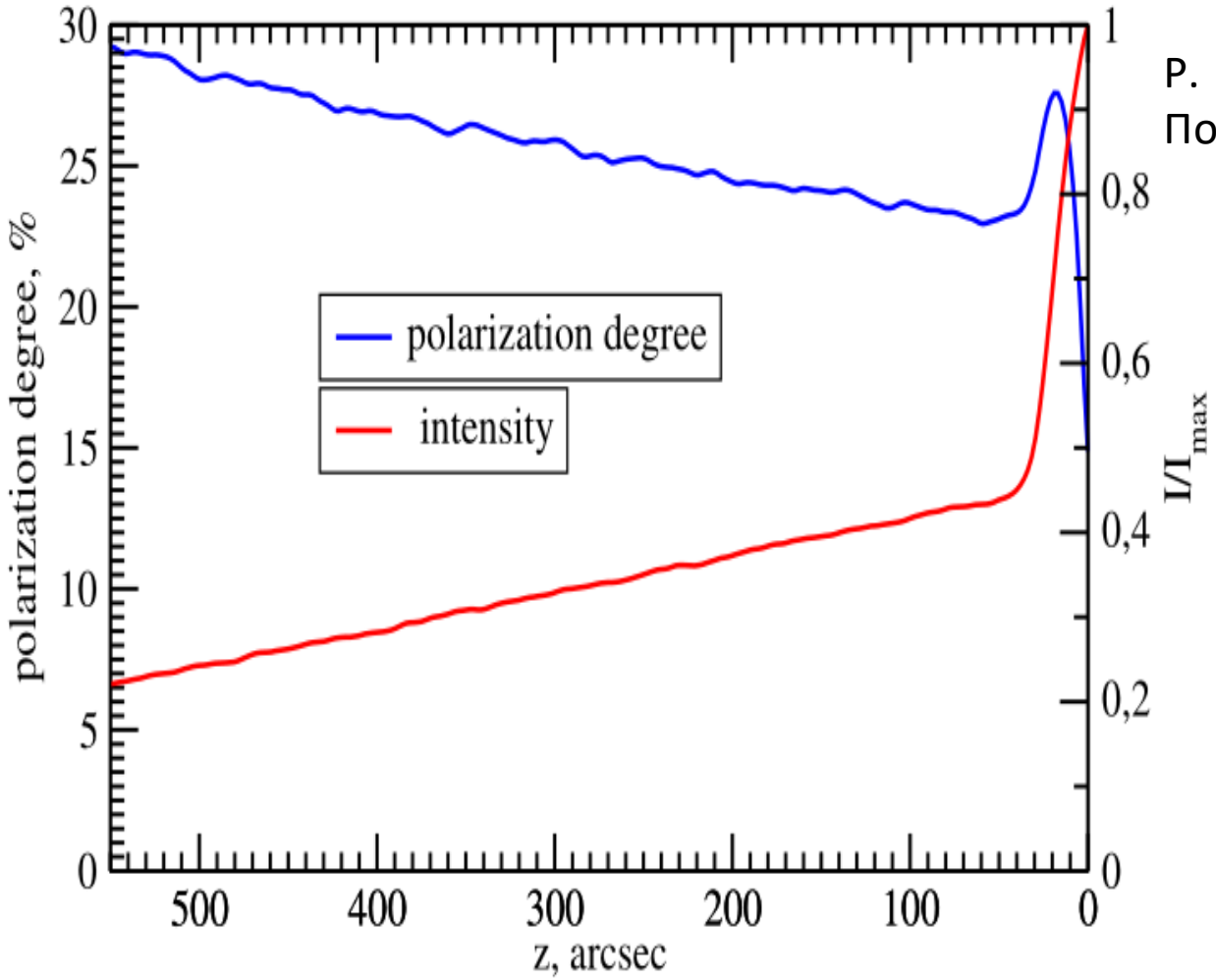
Спектр излучения в регионах Head и Cone

Турбулентность с характерным масштабом 3×10^{17} см и величиной поля на фронте 15 мкГс



Профиль интенсивности рентгеновского излучения

Поляризация излучения

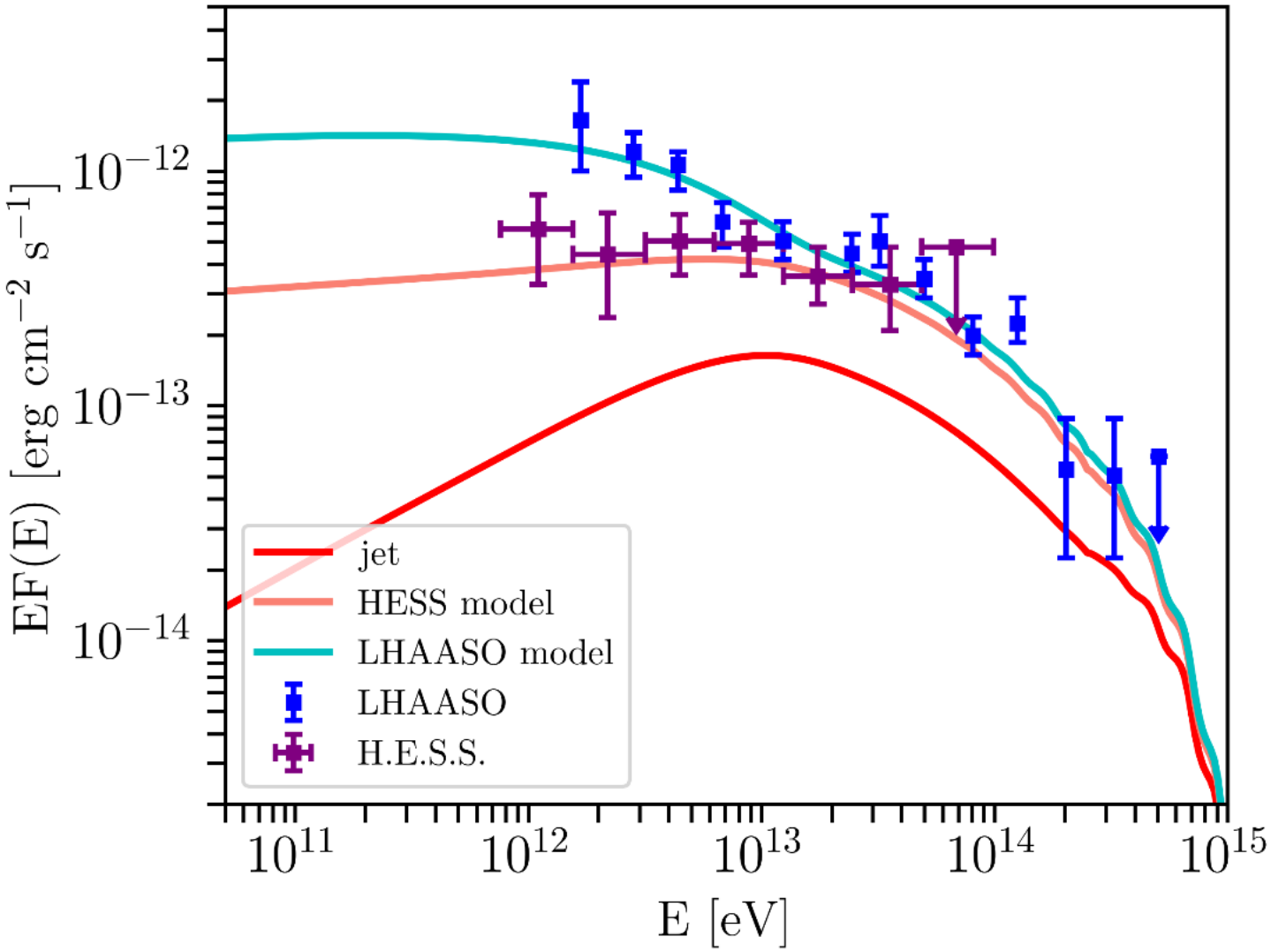


P. Kaaret et. al. ApJL 961 (2024)
Поляризация > 30%

Турбулентность с характерным масштабом 3×10^{17} см и величиной поля на фронте 15 мкГс

Профиль поляризации и интенсивности излучения

Гамма-излучение



Наблюдаемый и моделированный спектр гамма излучения в лептонной модели

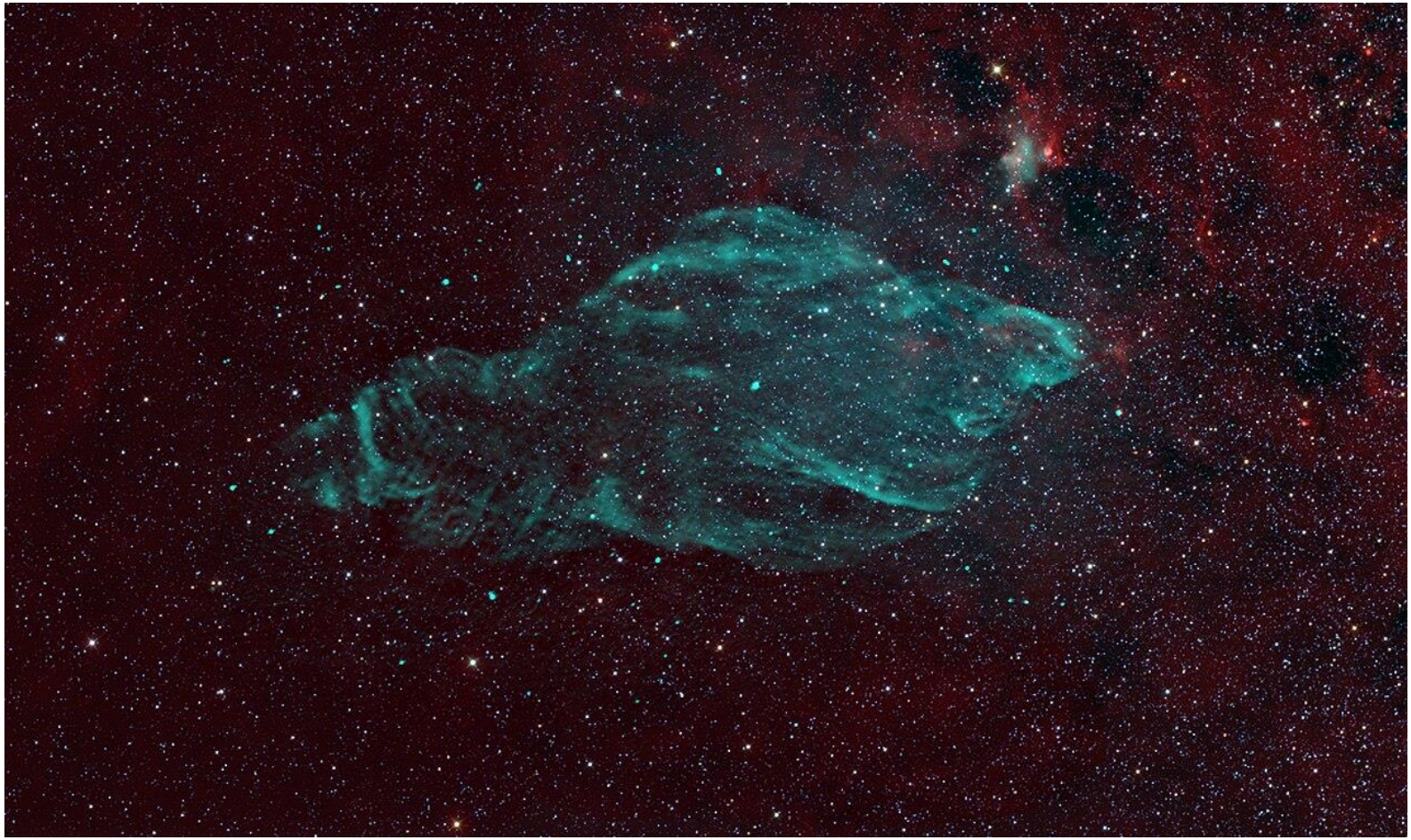
Выводы

1) Результаты совместного гидродинамического и Монте-Карло моделирования указывают на то, что галактические микроквазары могут являться источниками космических лучей с энергиями выше петаэлектрон-вольта

2) Модель позволяет объяснить наблюдаемый спектр, профиль и поляризацию нетеплового рентгеновского излучения

3) Так же лептонная модель позволяет объяснить наблюдаемый спектр высокоэнергичного гамма излучения

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



NRAO/AUI/NSF, K. Golap, M. Goss; NASA’s Wide Field Survey Explorer (WISE)