

Вклад близких источников в
наблюдаемый спектр и анизотропию
космических лучей сверхвысоких
энергий

В.Н.Зиракашвили, В.С.Птускин, С.И.Роговая

ИЗМИРАН

Ускорение частиц в релятивистских выбросах (джетах) активных галактических ядер

Cygnus A (Steenbrugge, Blundell 2008)

$$E_{\max} = 1.7 \cdot 10^{19} \text{ eV } Z \beta^{1/2} \left(\frac{L_{\text{mag}}}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{1/2}$$

доускорение частиц,
попадающих в джет сбоку

Caprioli 2015



тороидальное
магнитное поле

сдвиговое течение
Фрикционное ускорение
Бережко 1981

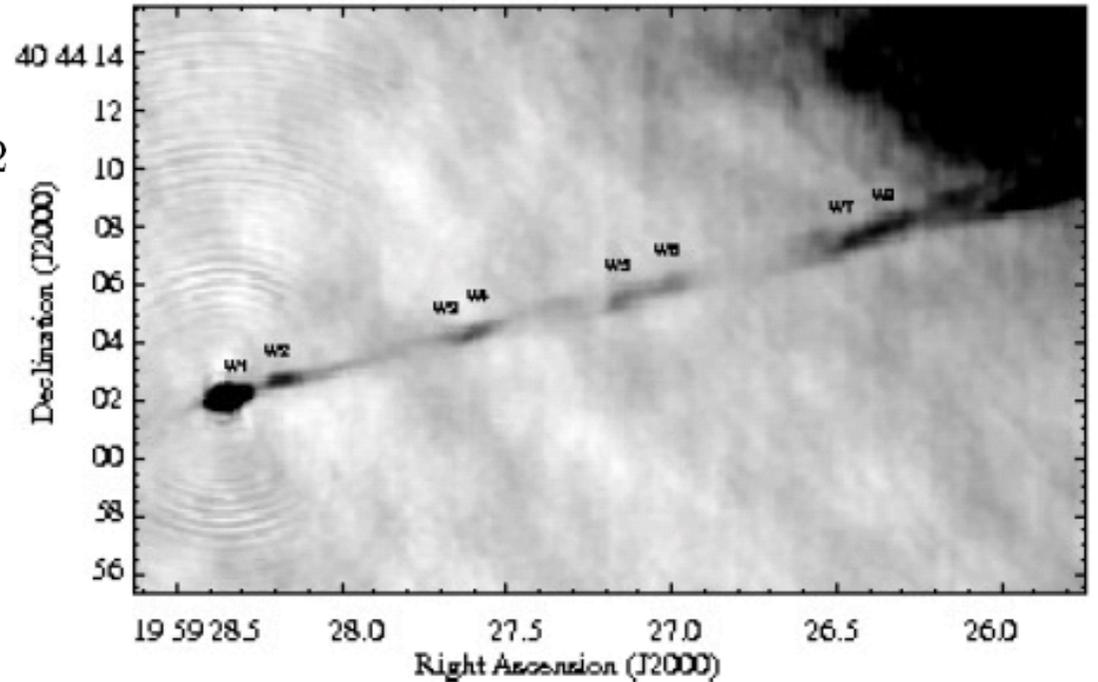
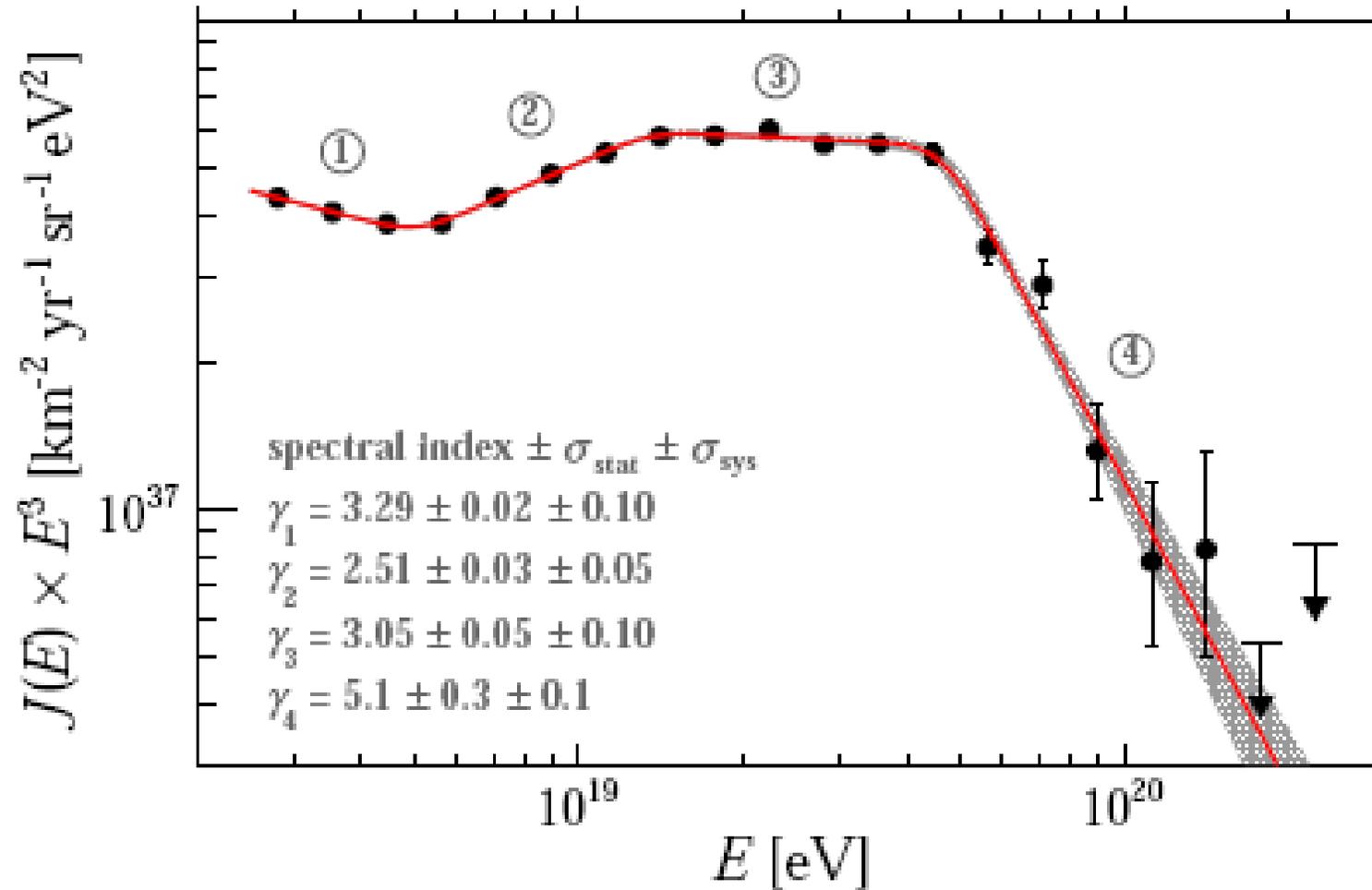


Figure 2. The inner jet of Cygnus A observed at 5 GHz. Note the weak emission between W1 and W2 which extends about half way to W3. Thereafter, there are only hints of smooth emission between the jet knots, which become brighter from W7 onwards. The jet seems straight, but note the possible bend between W3 and W4. W7 and W8 are the first jet knots in what we call the 'outer jet'.

Особенности в наблюдаемом спектре (РАО 2020)



Проще объяснить в модели с одним основным источником

Диффузия от близкого источника

$$D = \frac{cl_c}{3} \left(4 \frac{E^2}{E_c^2} + 0.9 \frac{E}{E_c} + 0.23 \frac{E^{1/3}}{E_c^{1/3}} \right), \quad E_c = ZeBl_c \quad (\text{Harari et al. 2013})$$

Ближайшие джеты:

Галактика NGC 5128 (Центавр А), 4 Мпк
масса черной дыры $5 \cdot 10^7$ солнечных масс

галактика M87 в центре скопления Дева, 16 Мпк
масса черной дыры $6 \cdot 10^9$ солнечных масс

Березинский и др. (1988)
для протонного источника,
Mollerach & Roulet (2019)
для ядер и кратко-
временного источника

Wdowczyk & Wolfendale
(1979) для протонного
источника

Уравнения для протонов и ядер

$$\begin{aligned} -H(z)(z+1)\frac{\partial N}{\partial z} &= \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}r^2D(\epsilon, r, z)(z+1)^2\frac{\partial N}{\partial r} + H(z)\epsilon\frac{\partial N}{\partial \epsilon} + \frac{\partial}{\partial \epsilon}b(\epsilon)N \\ &\quad + 4\nu_{ph}(4)N_i(4) + \sum_{A=5}^{56}\nu_{ph}(A)N_i(A) + q(r, \epsilon, z) \end{aligned}$$

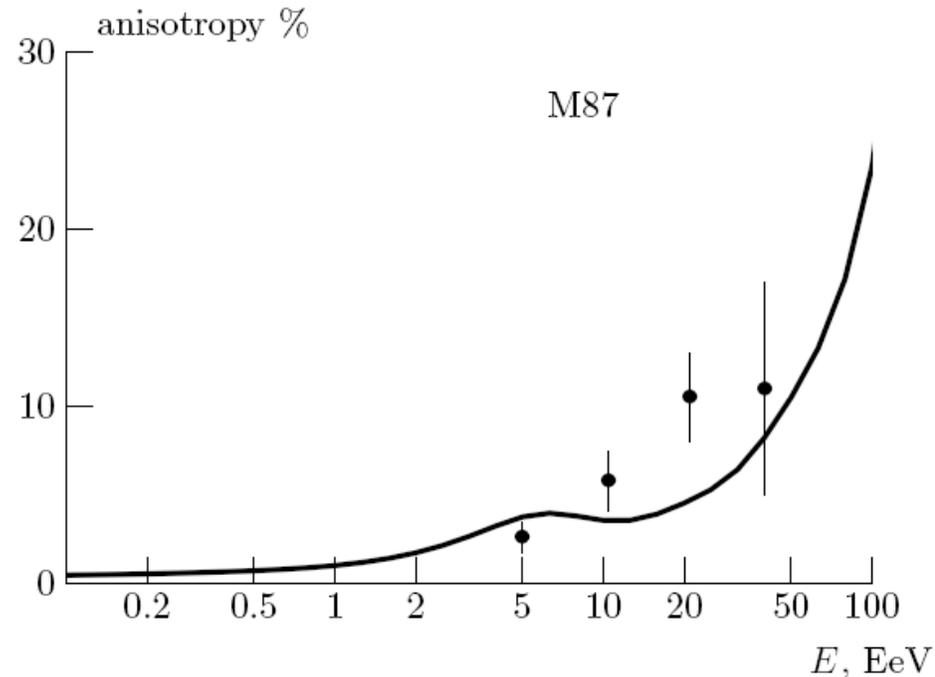
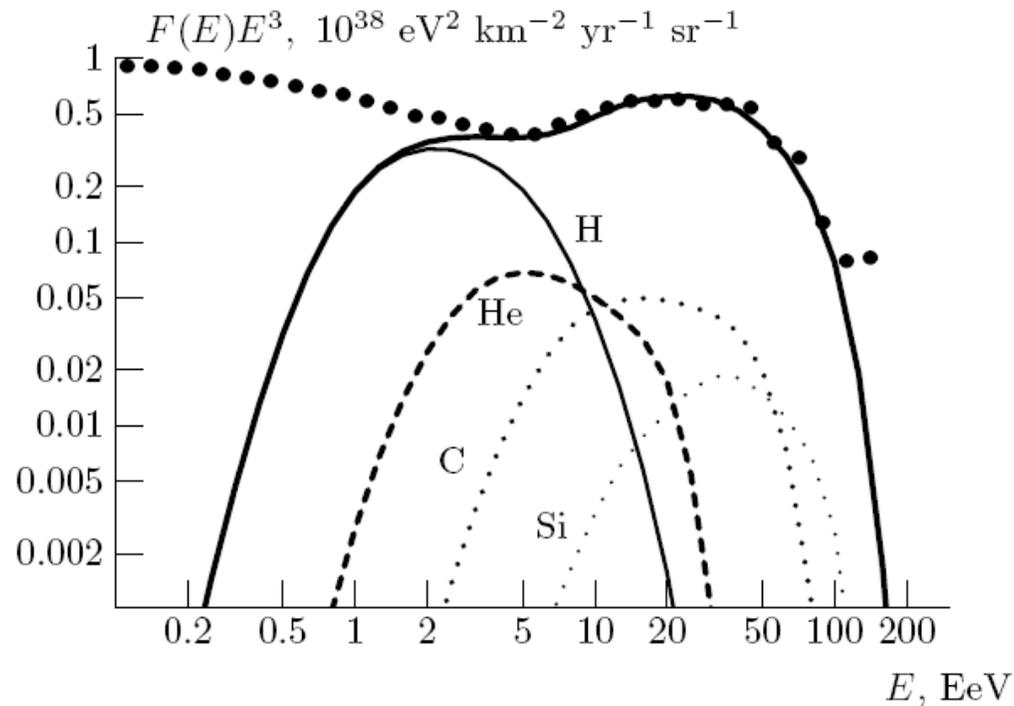
$$\begin{aligned} -H(z)(z+1)\frac{\partial N_i(A)}{\partial z} &= \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}r^2D_i(\epsilon, r, z)(z+1)^2\frac{\partial N_i(A)}{\partial r} + H(z)\epsilon\frac{\partial N_i(A)}{\partial \epsilon} + \frac{\partial}{\partial \epsilon}b(\epsilon)N_i(A) \\ &\quad - \nu_{ph}(A)N_i(A) + \nu_{ph}(A+1)N_i(A+1) + q_i(r, \epsilon, z) \end{aligned}$$

$$H(z) = H_0\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Lambda}, \quad \epsilon = E/A$$

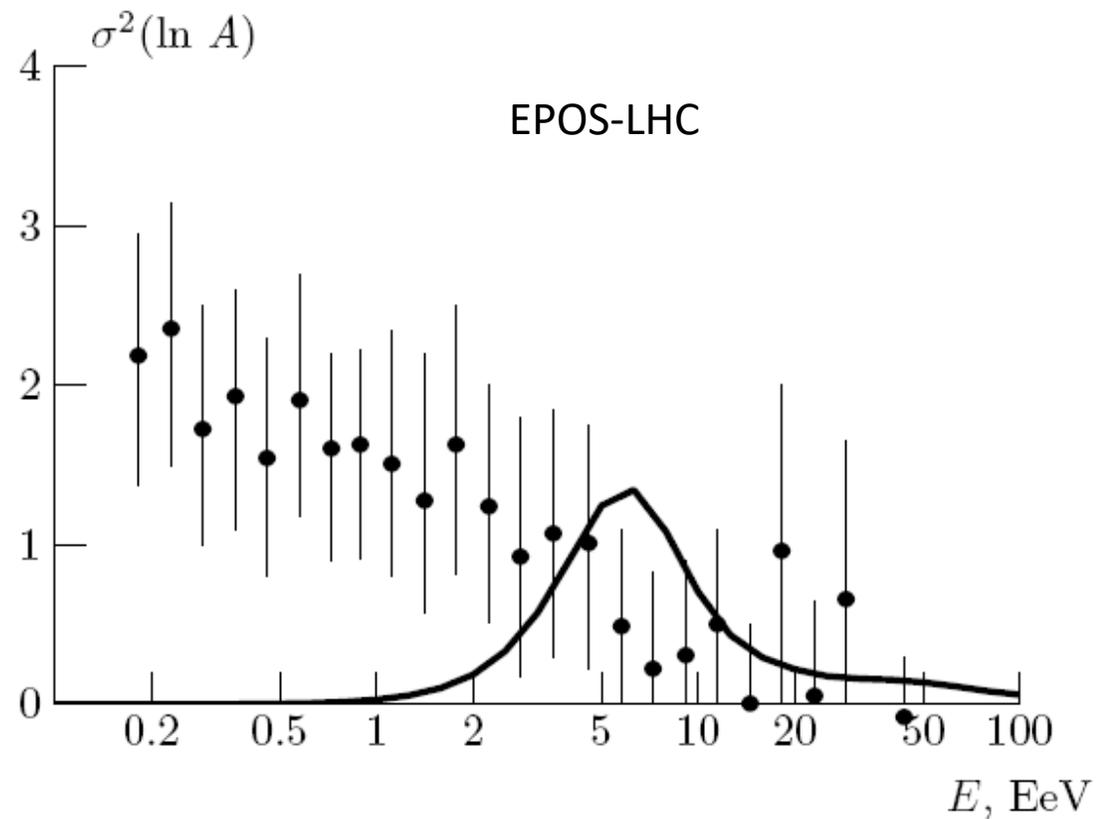
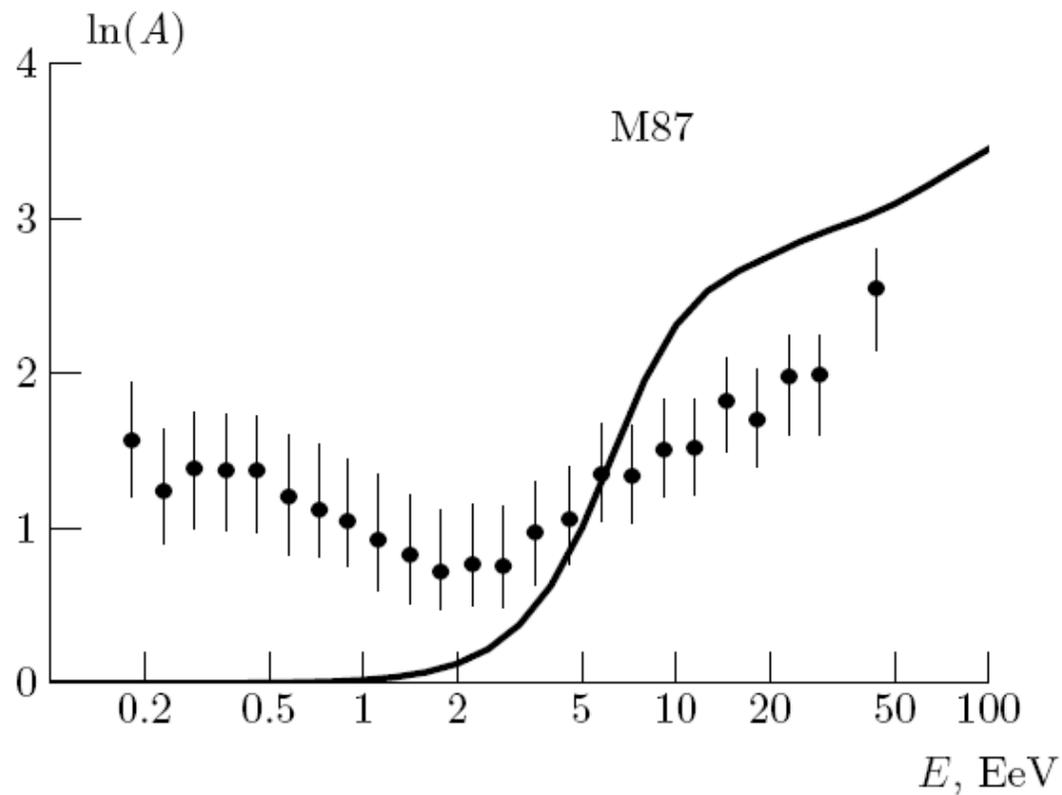
Спектры и анизотропия для M87

$l_c = 0.04$ Мпк, $B = 10^{-7}$ Гс, $E_{max} = Z \cdot 3 \cdot 10^{18}$ эВ,

спектр источника $q \sim E^{-2} e^{-E/E_{max}}$, обогащение ядер тяжелее гелия пропорционально квадрату A , пониженное количество (в 2 раза) протонов в источнике, светимость в КЛ - 10^{43} эрг/с



Химический состав



Заключение

1. Наблюдаемый спектр и анизотропия КЛ сверхвысоких энергий могут быть объяснены в модели постоянного близкого источника - галактики M87 в скоплении Дева.
2. Источник должен быть обогащен тяжелыми ядрами и обеднен протонами. Примерно такой состав ожидается, если галактические КЛ доускоряются релятивистским джетом (Caprioli 2015).