

# Протяженное гамма-излучение блазаров в межгалактическом магнитном поле

Михайлов Артём

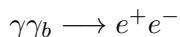
Научный руководитель: к.ф.-м. н., Рубцов Г. И.

Кафедра физики частиц и космологии,  
Физический факультет МГУ

Москва, 2016.

Исследовать формирование гало вокруг блазара Mrk 421, обусловленное наличием внегалактического магнитного поля, при помощи численного моделирования.

$\gamma$ -кванты с энергиями  $E_\gamma > 100$  ГэВ способны образовывать пары, взаимодействуя с фоновыми фотонами.



$e^+e^-$  отклоняются в межгалактическом магнитном поле и рассеиваются на фоновых фотонах.

$$D_{IC} = \frac{3m_e^2}{4\sigma_T\rho_{cmb}E_e} \simeq 0.3 \left( \frac{E_e}{1\text{ТэВ}} \right)^{-1} \text{Мпк}$$

Образуется электромагнитный каскад.

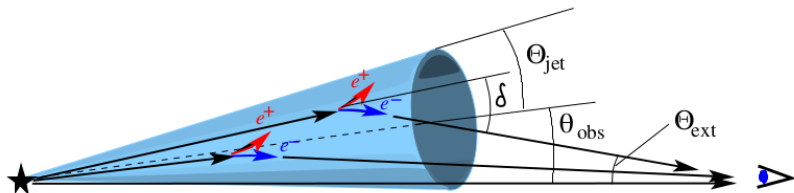


Рис. : Схематическое изображение джета

$$\delta = \frac{eBD_{IC}}{E_e}, \quad \lambda_B \gg D_{IC},$$

$$\delta = \frac{eB\sqrt{\lambda_B D_{IC}}}{E_e}, \quad \lambda_B \ll D_{IC},$$

Если:

$$B \gtrsim \frac{E_e}{eD_{IC}}, \quad \lambda_B \gg D_{IC},$$

$$B \gtrsim \frac{E_e}{e\sqrt{\lambda_B D_{IC}}}, \quad \lambda_B \ll D_{IC},$$

начинает происходить “размывание”.

При  $\lambda_B = 1$  Мпк,  $D_{IC} = 100$  Мпк,  $E_e = 1$  ТэВ

$$B_c \sim 10^{-15} \text{ Гс}$$

Используется программа TransportCR

В одном направлении запускается  $N$  частиц с распределением по энергии

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\alpha}$$

Параметры моделирования:  $V$ ,  $\lambda_B$ ,  $D$ ,  $E_{min}$ ,  $E_{max}$ ,  $\alpha$ ,  $E_{cut}$

# Построение изображения в точке наблюдения

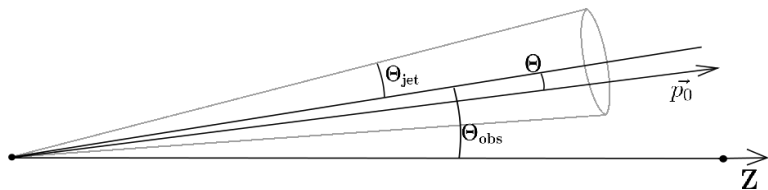


Рис. : Схематическое изображение джета

Параметры источника:

$$z \sim 0.031 (\approx 130 \text{ Мпк}).$$

$$\text{Спектр: } F(E) = I_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} \exp \left( -\frac{E}{E_c} \right),$$

где  $I_0 = (32.0 \pm 1.2) \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2} \text{ ТэВ}^{-1}$ ,  $E_0 = 1 \text{ ТэВ}$ ,  
спектральный индекс  $\alpha = 2.111 \pm 0.057$ , энергия обрезания  
 $E_c = 4 \text{ ТэВ}$ .

Для моделирования выберем следующие значения:

$$E_{min} = 0.1 \text{ ТэВ}, E_{max} = 2 \text{ ТэВ}, \alpha = 2.1, \lambda_B = 1 \text{ Мпк},$$

$$\Theta_{jet} = 1^\circ$$



Положим первичное гамма-излучение в джете имеет Гауссово распределение в зависимости от угла.

$$p(\Theta) \sim \exp(-\Theta^2/\Theta_{jet}^2)$$

Для получения потока  $\gamma$ -квантов или энергии нужно домножить вес каждого фотона на нормировочный множитель  $C$ , который определяется выражением:

$$C \cdot n = \int_{E_{cut}}^{E_{max}} F(E) dE,$$

# Результаты моделирования

$$B = 10^{-15} \text{ Гс}, E_{cut} = 10 \text{ ГэВ}$$

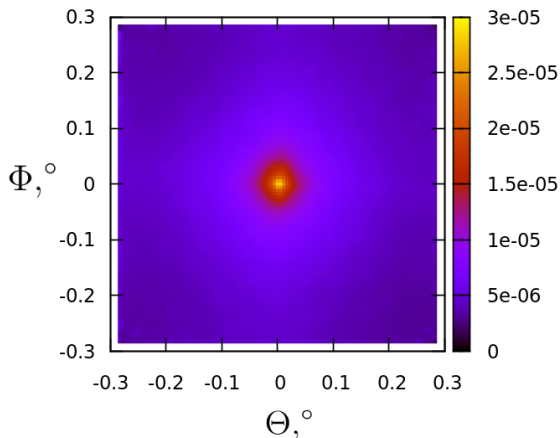


Рис. : Относительная плотность числа вторичных фотонов при  $\Theta_{obs} = 0^\circ$

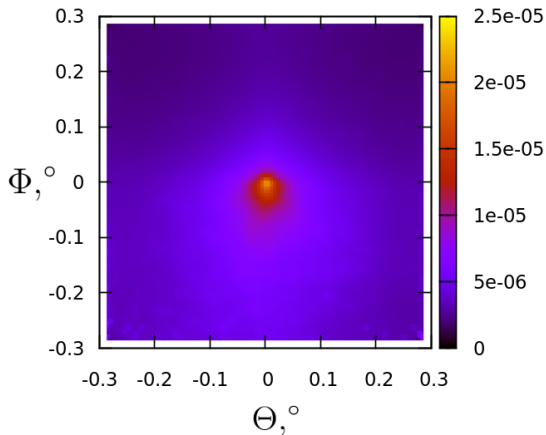


Рис. : Относительная плотность числа вторичных фотонов при  $\Theta_{obs} = 0.99^\circ$

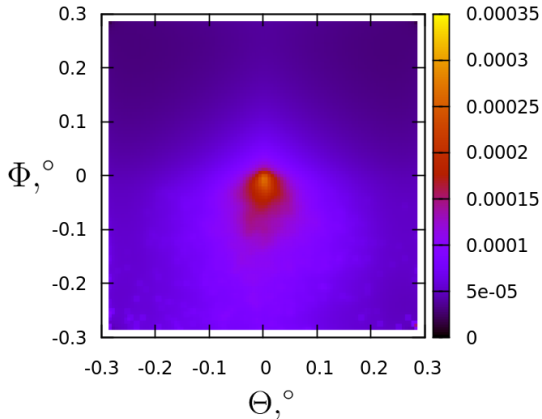


Рис. : Относительная плотность числа вторичных фотонов при  $\Theta_{obs} = 1.01^\circ$

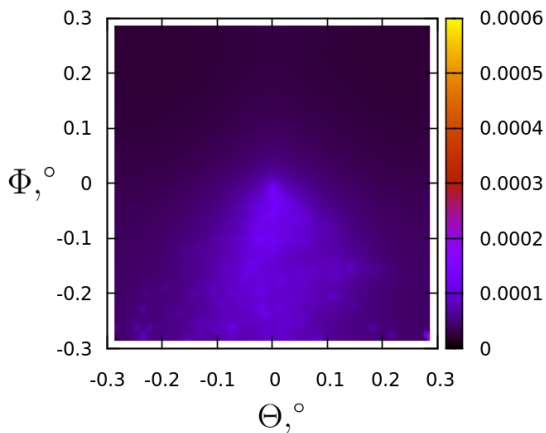


Рис. : Относительная плотность числа вторичных фотонов при  $\Theta_{obs} = 1.2^\circ$

# Экспериментальные ограничения на основе данных VERITAS

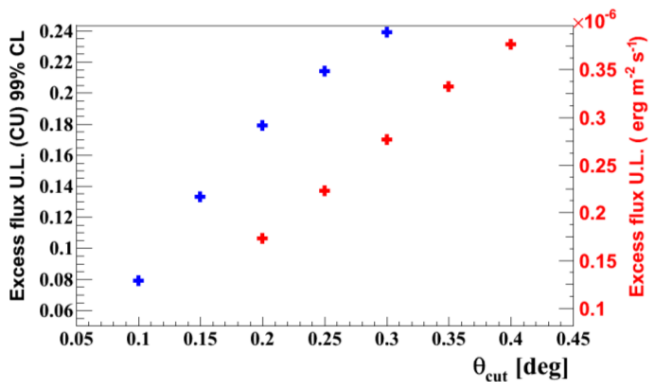


Рис. : Верхний предел плотности избыточного потока протяженного излучения при  $0^\circ \leq \theta \leq \theta_{cut}$  (синие крестики) и  $0.1^\circ \leq \theta \leq \theta_{cut}$  (красные крестики)

# Результаты моделирования

При  $E_{cut} = 100$  ГэВ, поле  $B = 10^{-15.5}$  Гс и различных углах  $\Theta_{obs}$

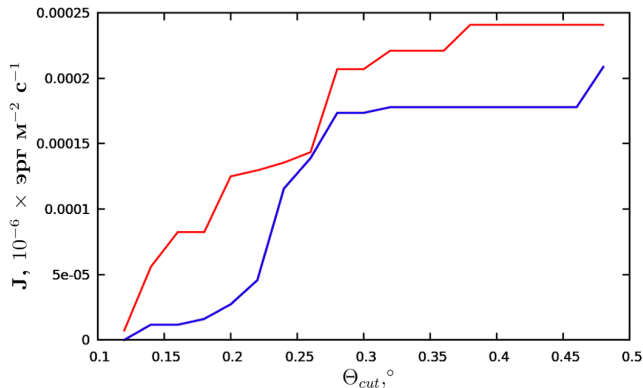


Рис. : Избыточная плотность потока протяженного излучения при  $0.1^\circ \leq \theta \leq \theta_{cut}$ ,  $B = 10^{-15.5}$  Гс для  $\Theta_{obs} = 0^\circ$  (красная линия) и для  $\Theta_{obs} = 0.9^\circ$  (синяя линия)

При  $E_{cut} = 100$  ГэВ, угле  $\Theta_{obs} = 0$  и различных полях  $B$

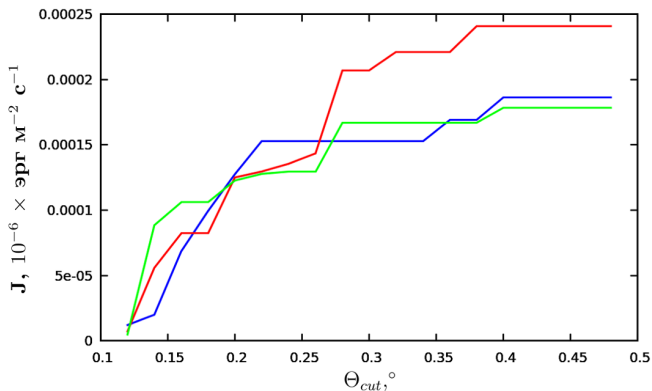


Рис. : Избыточная плотность потока протяженного излучения при  $0.1^\circ \leq \theta \leq \theta_{cut}$ ,  $\Theta_{obs} = 0^\circ$  для  $B = 10^{-15}$  Гс (синяя линия),  $B = 10^{-15.5}$  Гс (красная линия) и  $B = 10^{-16}$  Гс (зеленая линия)



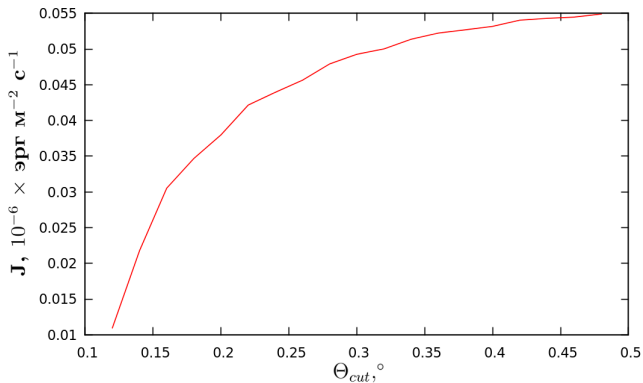


Рис. : Избыточная плотность потока протяженного излучения при  $0.1^\circ \leq \theta \leq \theta_{cut}$ ,  $\Theta_{obs} = 0^\circ$  и  $B = 10^{-15}$  Гс

- 1) Избыточный поток энергии протяженного гало Mrk 421, полученный при моделировании, не противоречит имеющимся экспериментальным ограничениям при любой величине поля и длине корреляции  $\lambda_B = 1$  Мпк;
- 2) Максимальное значение потока энергии вторичных фотонов в угловом диапазоне  $0.1^\circ \leq \theta \leq \theta_{cut}$  достигается при  $B$  между  $10^{-16}$  Гс и  $10^{-15}$  Гс и составляет величину примерно на 3 порядка меньшую, чем установленный верхний предел.

Перспективы: Ограничения на магнитные поля можно искать путем регистрации гало на энергиях 10 ГэВ с потоками  $\sim 10^{-5}$  эрг  $\text{м}^{-2}$   $\text{с}^{-1}$ . Для этого можно например провести анализ данных Fermi LAT.

Спасибо за внимание!