

Аномальные корреляции космических лучей сверхвысоких энергий и лацертид с использованием данных Telescope Array

М.Куденко¹, М. Кузнецов¹, Г. Рубцов¹, С. Троицкий^{1, 2}

¹ИЯИ РАН

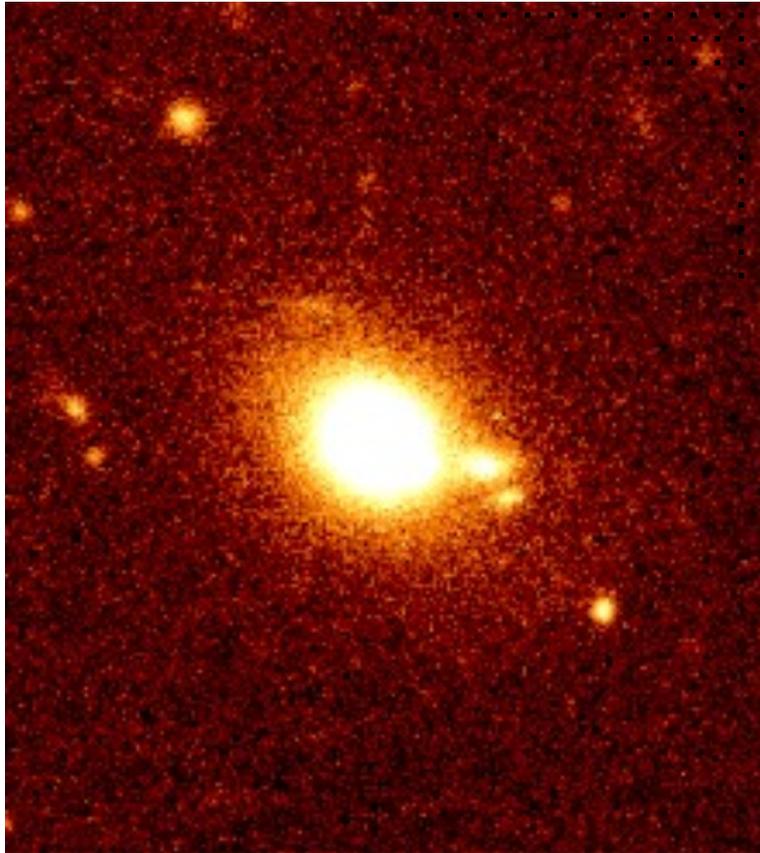
²МГУ

Коллаборация Telescope Array

11.03.2026

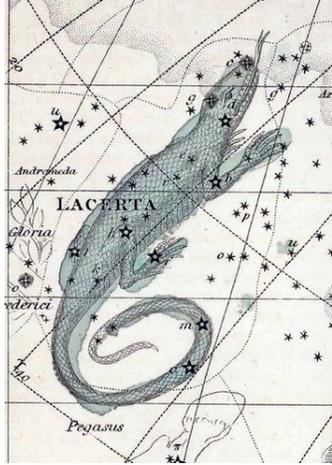


Лацертиды



Лацертиды – тип активных ядер галактик (АЯГ), которые расположены на больших расстояниях и имеют джеты, направленные на наблюдателя.

По сравнению с другими АЯГ лацертиды характеризуются отсутствием эмиссионных линий с эквивалентной шириной больше 5\AA .



High Resolution Fly's Eye

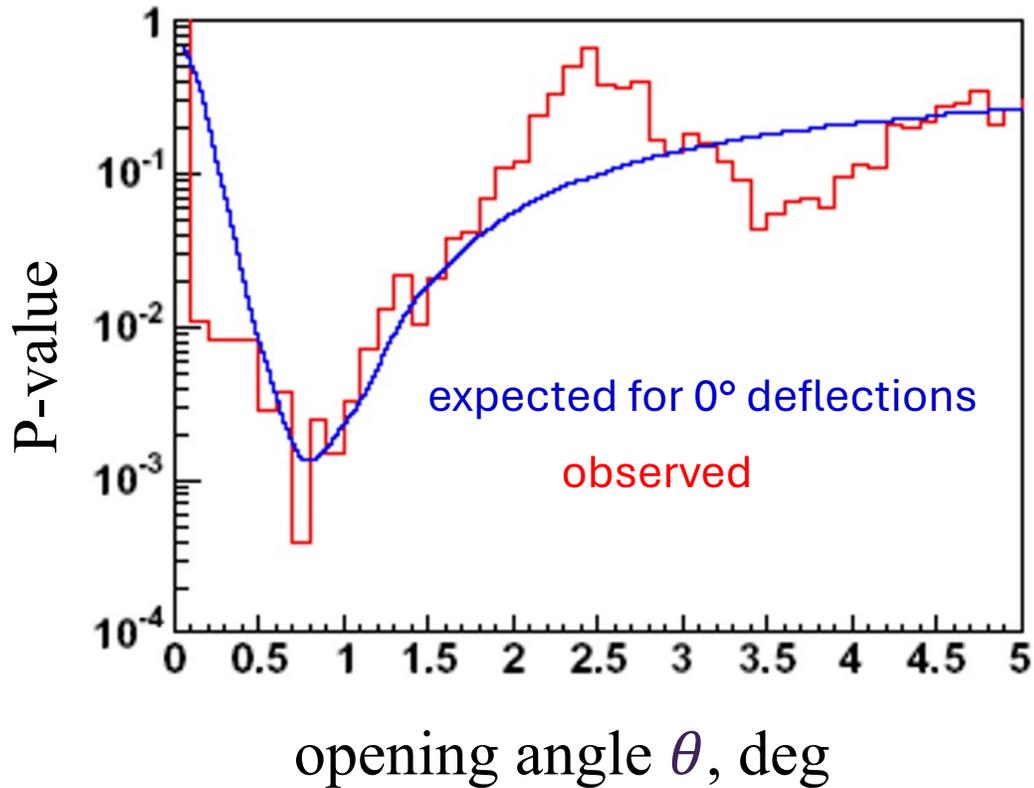


High Resolution Fly's Eye (HiRes)
– детектор космических лучей
ультравысоких энергий,
расположенный в штате Юта и
работавший с 1997 по 2006 год.

Мотивация

- В результате анализа данных о космических лучах, зарегистрированных детектором High Resolution Fly's Eye (HiRes) в стереоскопическом режиме, было обнаружено, что некоторые космические лучи сверхвысоких энергий приходят от лацертид без отклонения в магнитном поле (корреляции космических лучей с лацертидами).
 - В 2004 году в первоначальном анализе использовался метод подсчета пар.
 - В 2006 году для независимого подтверждения результата использовался метод максимального правдоподобия.
- Этот эффект указывал на существование нейтральных частиц сверхвысоких энергий, которые могут преодолевать большие расстояния, что было сложно объяснить в рамках стандартной физики.
- ✓ Эти корреляции не были проверены с независимым набором данных о космических лучах.

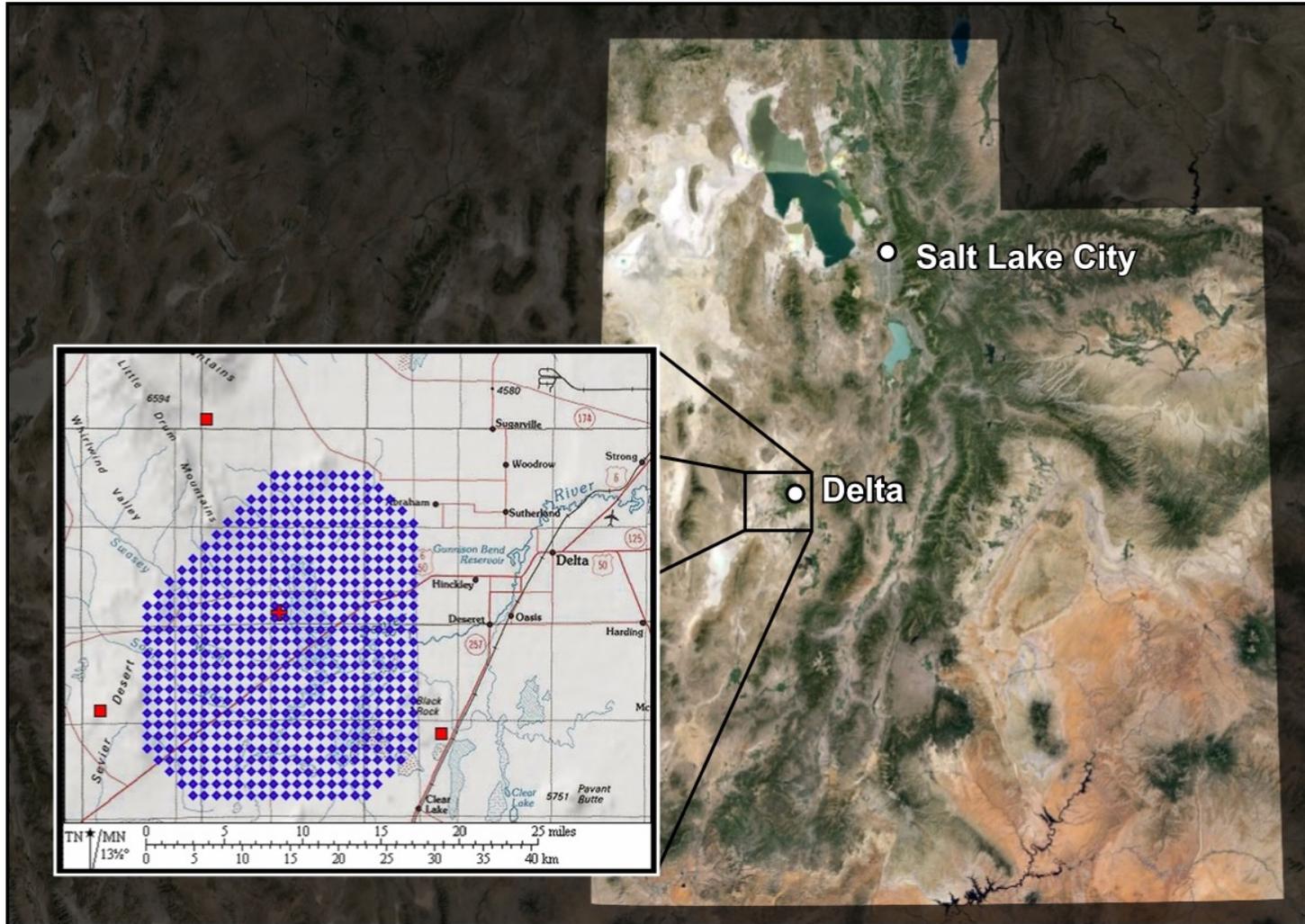
Метод подсчета пар в 2004



- Набор из 156 лацертид
 - 271 космический луч с $E \geq 10^{19}$ эВ
 - 11 пар “лацертида– космический луч” наблюдается
 - 3 пары ожидается в случае отсутствия источников
 - Post-trial p-value = 1×10^{-3} при $\theta = 0.8^\circ$
 - Угловое разрешение HiRes stereo 0.6°
- (D. Gorbunov et al., JETP letters, 2004)

Отклонение протонов в магнитном поле Галактики
сильно больше, чем получившийся угол!

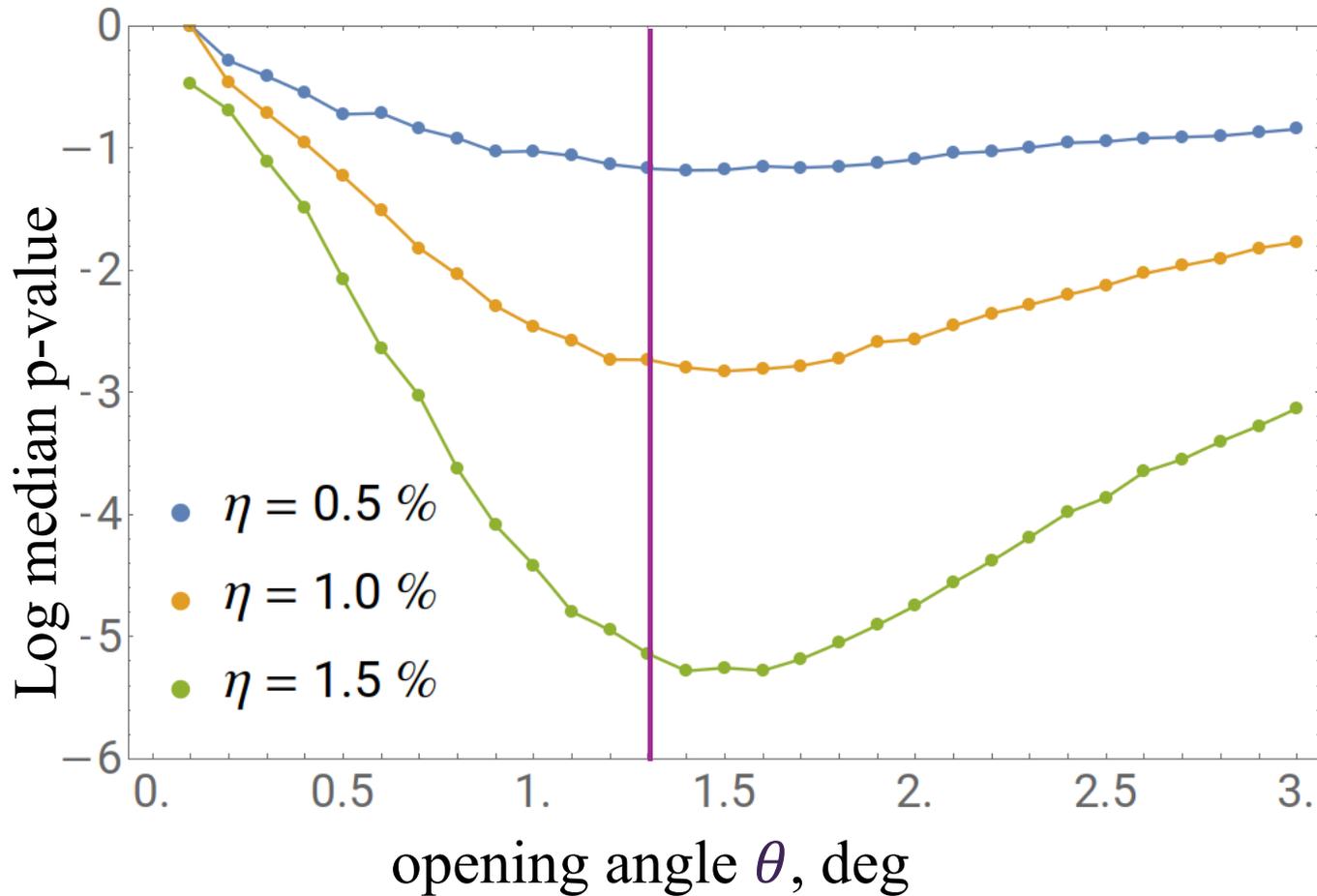
Telescope Array



Telescope Array (TA) – детектор космических лучей ультравысоких энергий, расположенный в штате Юта и работающий с 2008 года.

Состоит из сцинтилляционных «наземных» детекторов (SD) и флуоресцентных телескопов (FD).

Метод подсчета пар в 2026: «фальшивые» наборы с источниками

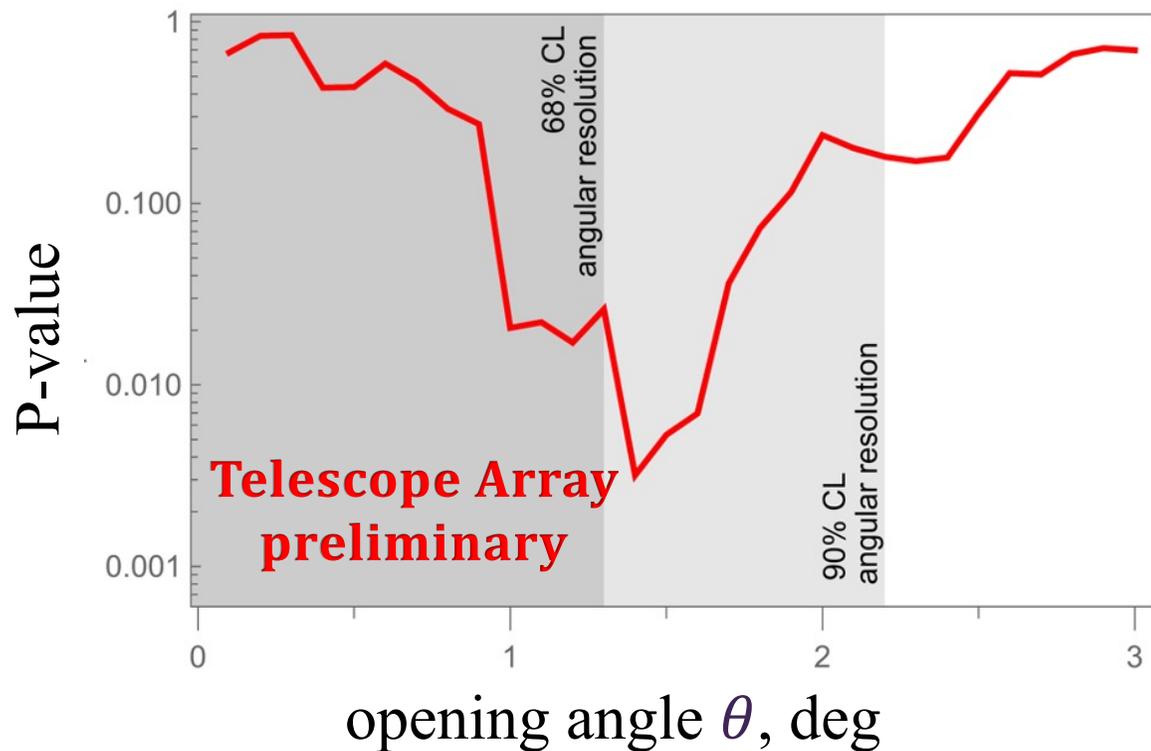


- Набор 156 лацертид
- 6712 «фальшивых» событий с $E \geq 10^{19}$ эВ
- Угловое разрешение TA SD 1.3°
- η — доля событий от источников
- Каждый источник «размывается» с помощью распределения фон Мизеса-Фишера:

$$f_\psi(\alpha) = \frac{\exp(2 \cos \alpha / \psi^2)}{2\pi\psi^2 \sinh 2/\psi^2},$$

где ψ — это угловое разрешение.

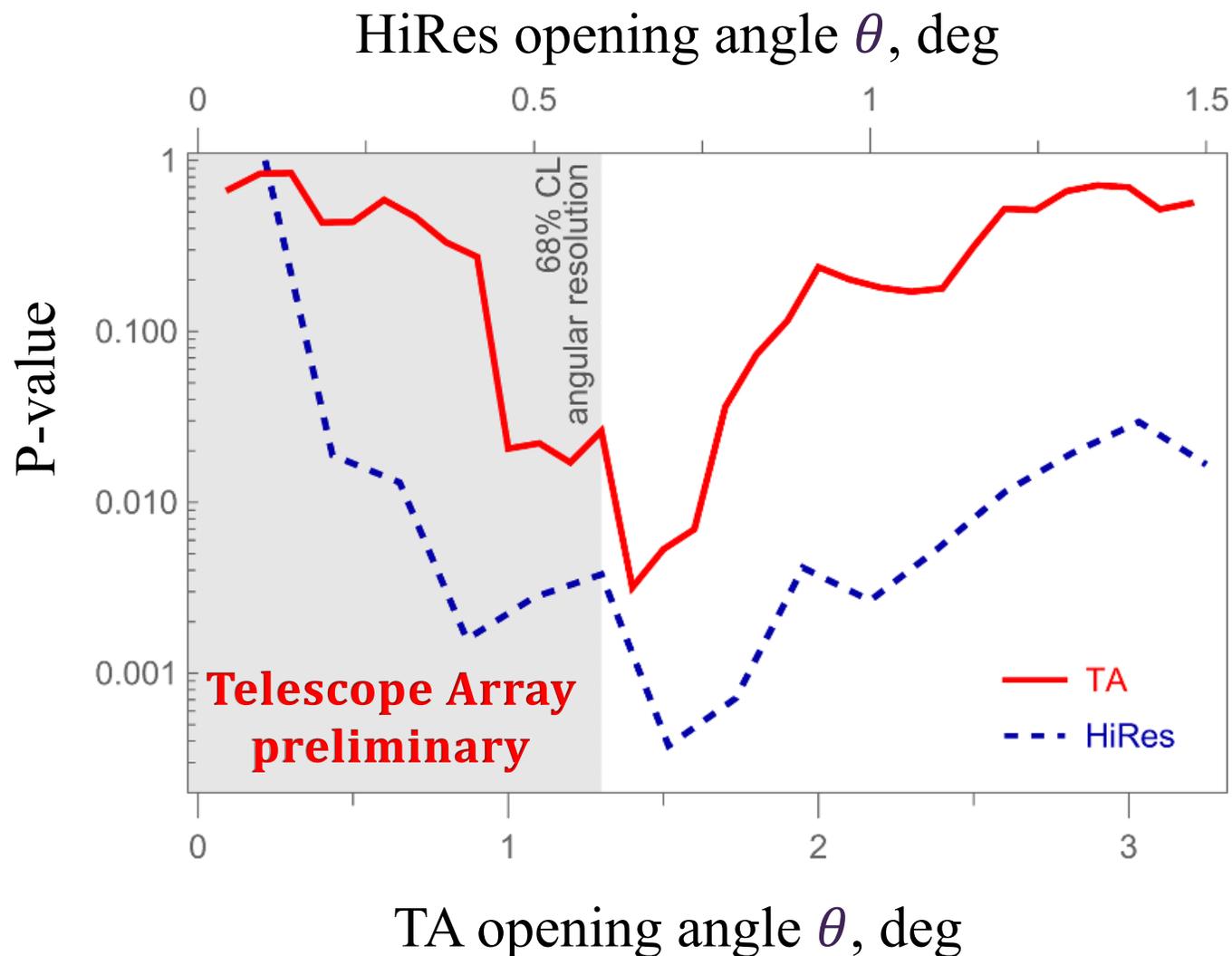
Метод подсчета пар в 2026



- Набор 156 лацертид
- 6712 космических лучей TA SD с $E \geq 10^{19}$ эВ.
- 279 пар “лацертида– космический луч” наблюдается
- 235 пар ожидается в случае отсутствия источников
- Минимальное p-value = 3×10^{-3} при $\theta = 1.4^\circ$
- Угловое разрешение TA SD is 1.3°
- Post-trial p-value = 3×10^{-2}

Отклонение протонов в магнитном поле Галактики
сильно больше, чем получившийся угол!

Метод подсчета пар в 2026: результаты



Результаты согласуются, но сигнал в TA SD слабее.

Доля «избыточных» событий от лацертид в данных:

Data set	fraction, %	68% CL	95% CL
HiRes stereo	3.0	± 1.2	$+2.7$ -2.0
TA SD	0.66	± 0.25	$+0.50$ -0.47

Метод максимального правдоподобия в 2006

$$Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^M R(\mathbf{s}_j) Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j) / \sum_{k=1}^M R(\mathbf{s}_k)$$

$$P_i(\mathbf{x}_i) = \frac{n_s}{N} Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i) + \frac{N-n_s}{N} R(\mathbf{x}_i)$$

$$\mathcal{L}(n_s) = \prod_{i=1}^N P_i(\mathbf{x}_i)$$

$$\mathcal{R}(n_s) = \frac{\mathcal{L}(n_s)}{\mathcal{L}(0)} = \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{n_s}{N} \left(\frac{Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i)}{R(\mathbf{x}_i)} - 1 \right) + 1 \right\}$$

n_s – число событий от источника

N – все события

M – число источников

$\mathbf{s}_j, \mathbf{x}_i$ – направление на источник и направление прихода события

$R(\mathbf{s}_j)$ – плотность вероятности прихода фонового события (зависит от экспозиции)

$Q_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}_j)$ – плотность вероятности прихода события от источника (зависит от углового разрешения)

Идея метода в том, чтобы изменять параметр n_s для того, чтобы максимизировать \mathcal{R} .

(HiRes Collaboration, ApJ, 2006)

Метод максимального правдоподобия в 2006

TABLE 2
HiRES — BL LAC CORRELATION RESULTS: FRACTION
 \mathcal{F} OF SIMULATED HiRES SETS WITH STRONGER
CORRELATION SIGNAL.

Source Sample (# Obj.)	All Energies	$E > 10 \text{ EeV}$
“BL” (157)	2×10^{-4}	2×10^{-4}
“HP” (47)	0.3	6×10^{-3}
“BL” + “HP” (204)	5×10^{-4}	10^{-5}

NOTE. — Correlations are with confirmed BL Lacs in Table 2 of the Veron 10th Catalog (Veron-Cetty & Veron 2001), classified as either “BL” or “HP,” with $m < 18$.

\mathcal{F} обозначает долю смоделированных наборов, в которых значение $\ln(\mathcal{R})$ больше или равно тому, что получено из реальных данных.

- Для всего набора данных $\ln(\mathcal{R}) = 6.16$ при $n_s = 31$, и $\mathcal{F} = 2 \times 10^{-4}$

(HiRes Collaboration, ApJ, 2006)

Метод максимального правдоподобия 2026

$$Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i) = \sum_{j=1}^M R(\mathbf{s}_j, E_i) Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i) / \sum_{k=1}^M R(\mathbf{s}_k, E_i)$$

$$P_i(\mathbf{x}_i, E_i) = \frac{n_s}{N} Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i) + \frac{N-n_s}{N} R(\mathbf{x}_i, E_i)$$

$$\mathcal{L}(n_s) = \prod_{i=1}^N P_i(\mathbf{x}_i, E_i)$$

$$\mathcal{R}(n_s) = \frac{\mathcal{L}(n_s)}{\mathcal{L}(0)} = \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{n_s}{N} \left(\frac{Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i)}{R(\mathbf{x}_i, E_i)} - 1 \right) + 1 \right\}$$

n_s — число космических лучей от источника

N — число всех космических лучей

M — число источников

$\mathbf{s}_j, \mathbf{x}_i$ — направление на источник и направление прихода космических лучей

E_i — энергия космического луча

$R(\mathbf{s}_j, E_i)$ — экспозиция

$Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i)$ — плотность вероятности прихода события от источника (зависит от углового разрешения)

Идея метода в том, чтобы изменять параметр n_s для того, чтобы максимизировать \mathcal{R} .

$Q_i(\delta, \Theta_i, E_i)$: Функция рассеяния точки

$Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i) = Q_i(\delta, \Theta_i, E_i)$ — плотность вероятности прихода события от источника (зависит от углового разрешения). Это функция рассеяния точки (ФРТ).

δ — угловое расстояние между реконструированным и истинным направлением прихода события,

Θ_i — реконструированный зенитный угол направления прихода события,

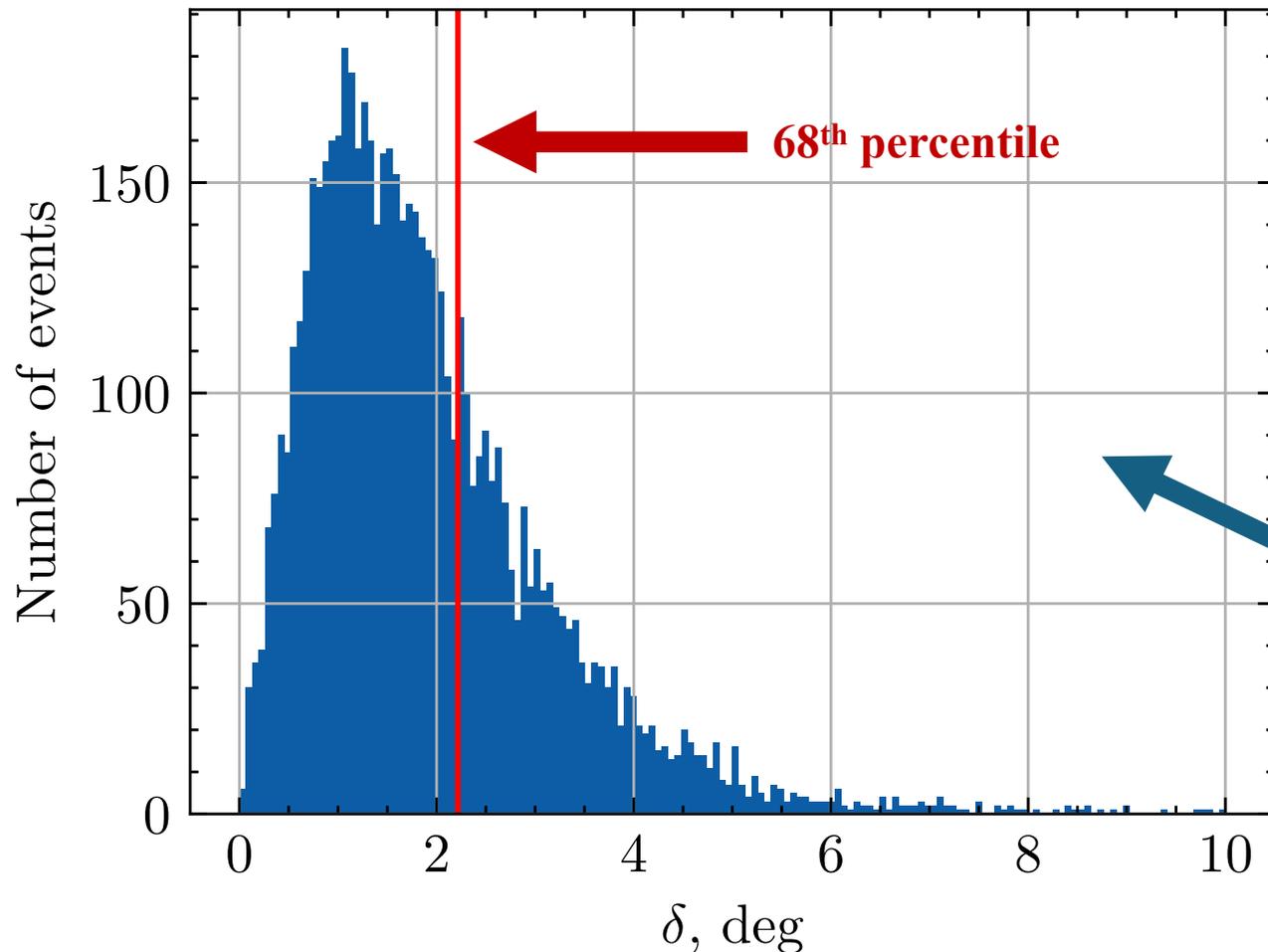
E_i — реконструированная энергия события.

$$Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i) = \sum_{j=1}^M R(\mathbf{s}_j, E_i) Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i) / \sum_{k=1}^M R(\mathbf{s}_k, E_i)$$

$$\mathcal{R}(n_s) = \frac{\mathcal{L}(n_s)}{\mathcal{L}(0)} = \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{n_s}{N} \left(\frac{Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i)}{R(\mathbf{x}_i, E_i)} - 1 \right) + 1 \right\}$$

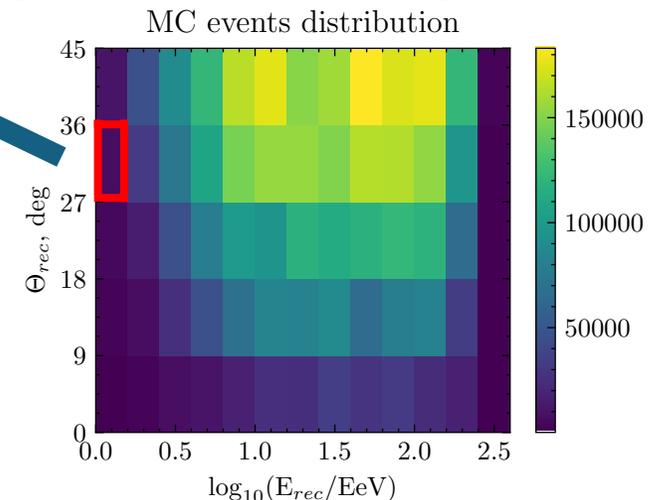
$Q_i(\delta, \Theta_i, E_i)$: Функция рассеяния точки

$\log_{10}(E_{rec}/EeV) = 0.1, \Theta_{rec} = 31.5^\circ$

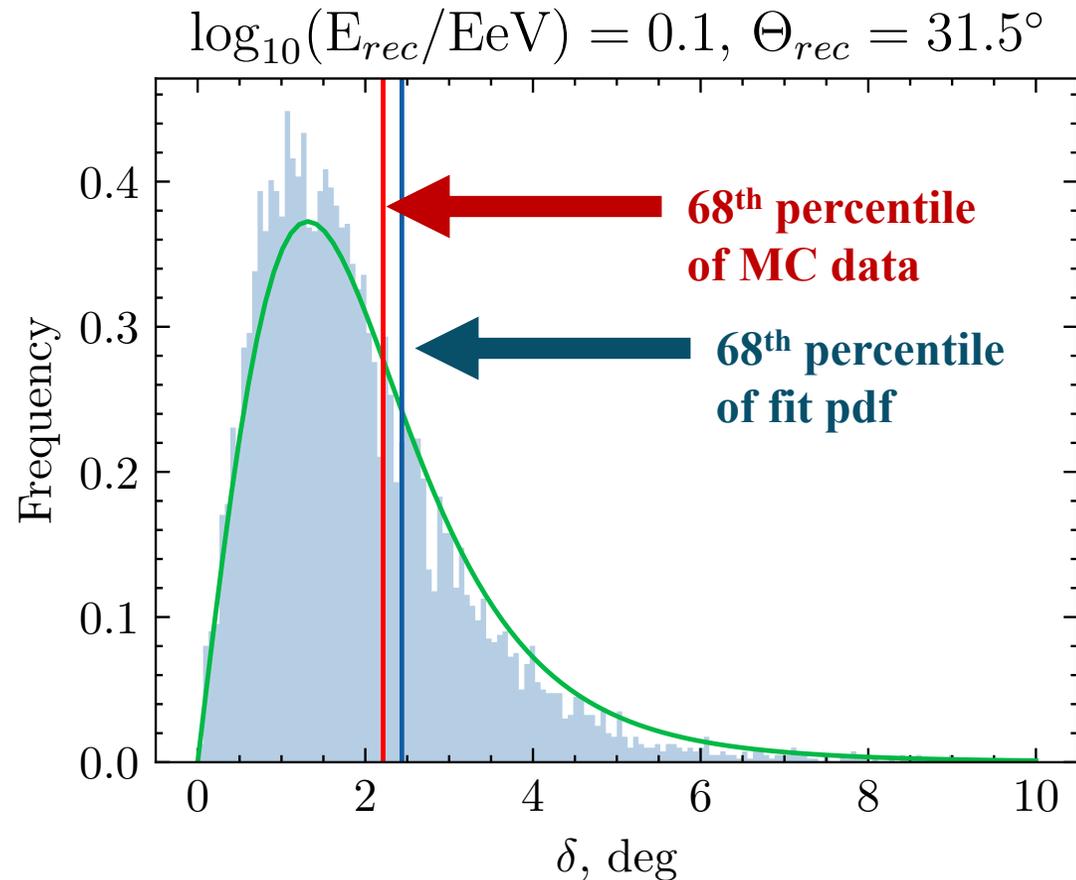


Для создания ФРТ протонное Монте-Карло было разделено на бины по энергии и зенитному углу.

Внутри каждого бина рассчитывалось угловое расстояние δ между истинным и реконструированным направлениями прихода лучей.



$Q_i(\delta, \Theta_i, E_i)$: Функция рассеяния точки



Для создания ФРТ необходимо фитировать распределения по угловым расстояниям в каждом бине. Лучшая функция для фита имеет вид:

$$f(\delta) = N \cdot \sin(\delta) \cdot \left(1 + \frac{\delta^2}{2\sigma_1^2}\right)^{-\sigma_2}$$

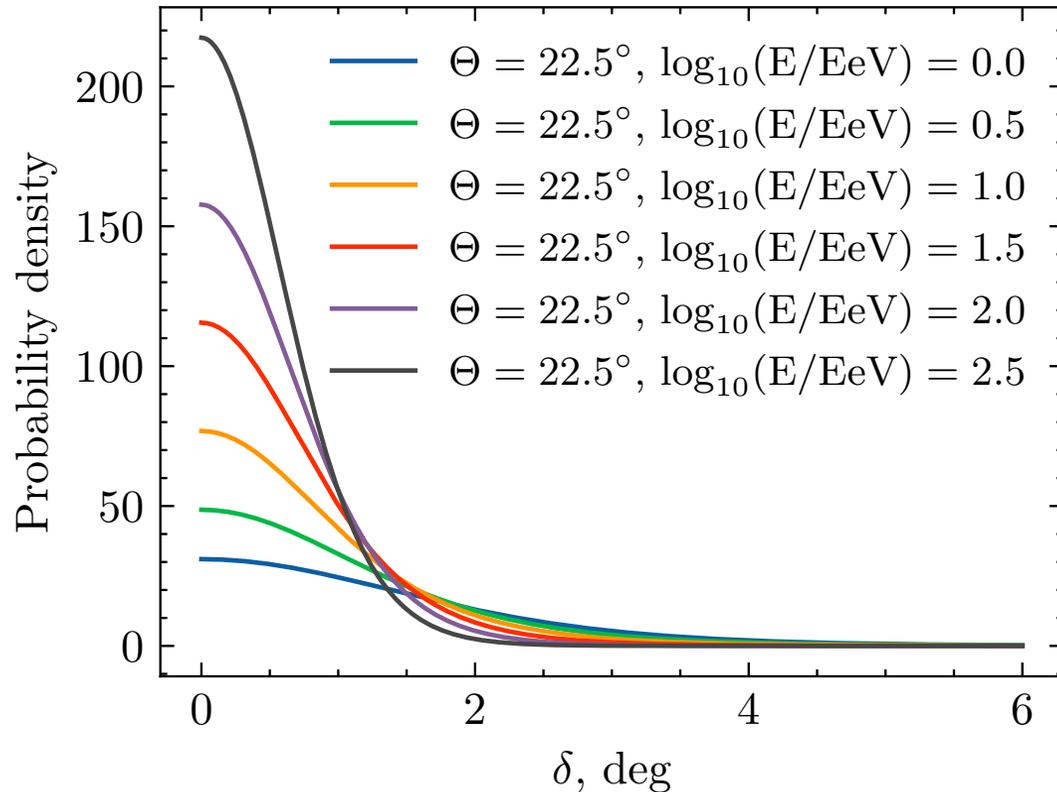
Затем каждый параметр σ_1 и σ_2 должен быть зафитирован как функция реконструированной энергии и угла.

$$\sigma_1(\Theta, E) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot \log_{10}^i E \cdot \Theta + \sum_{i=0}^3 b_i \cdot \log_{10}^i E$$

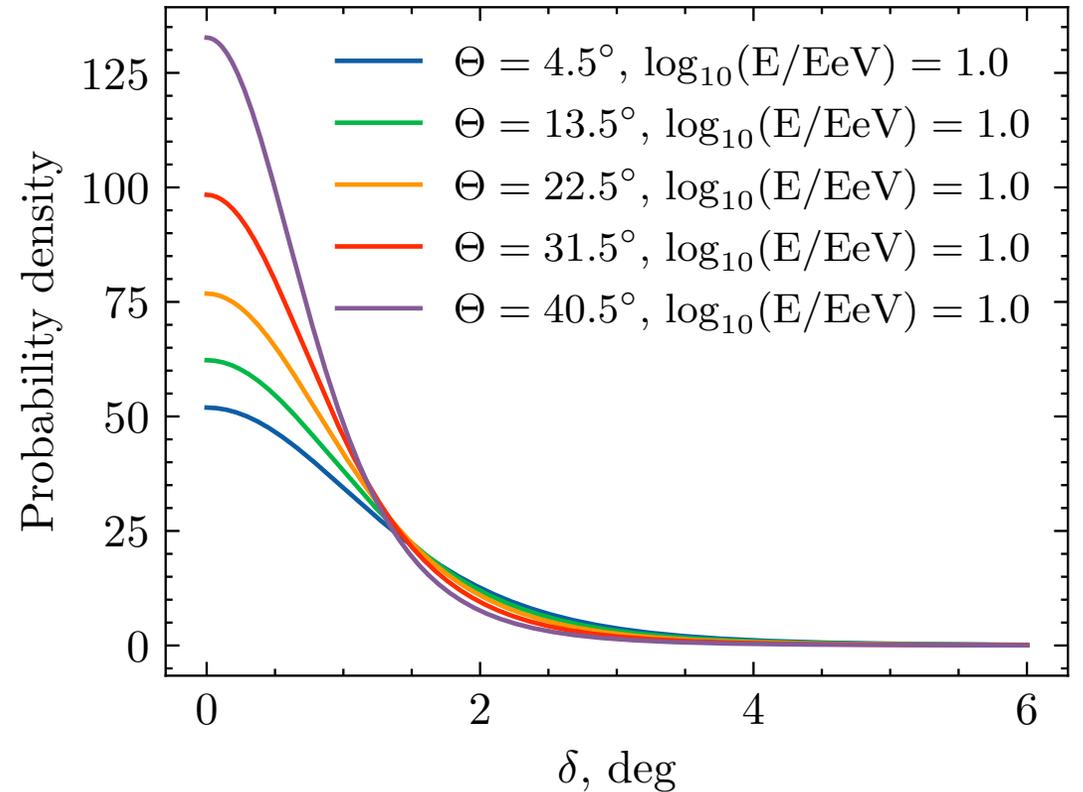
$$\sigma_2(\Theta, E) = \sum_{i=0}^2 c_i \cdot \log_{10}^i E \cdot \Theta + \sum_{i=0}^2 d_i \cdot \log_{10}^i E$$

$Q_i(\delta, \Theta_i, E_i)$: Функция рассеяния точки

Point spread function



Point spread function



$$Q(\delta, E, \Theta) = \frac{N}{2\pi} \cdot \left(1 + \frac{\delta^2}{2\sigma_1^2(\Theta, E)} \right)^{-\sigma_2(\Theta, E)}$$

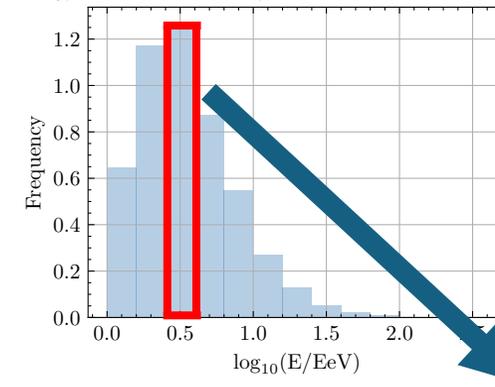
$$\int_0^\pi 2\pi \cdot \sin(\delta) \cdot Q(\delta, E, \Theta) d\delta = 1 \rightarrow N$$

$R(E_i, DEC_i)$: Экспозиция

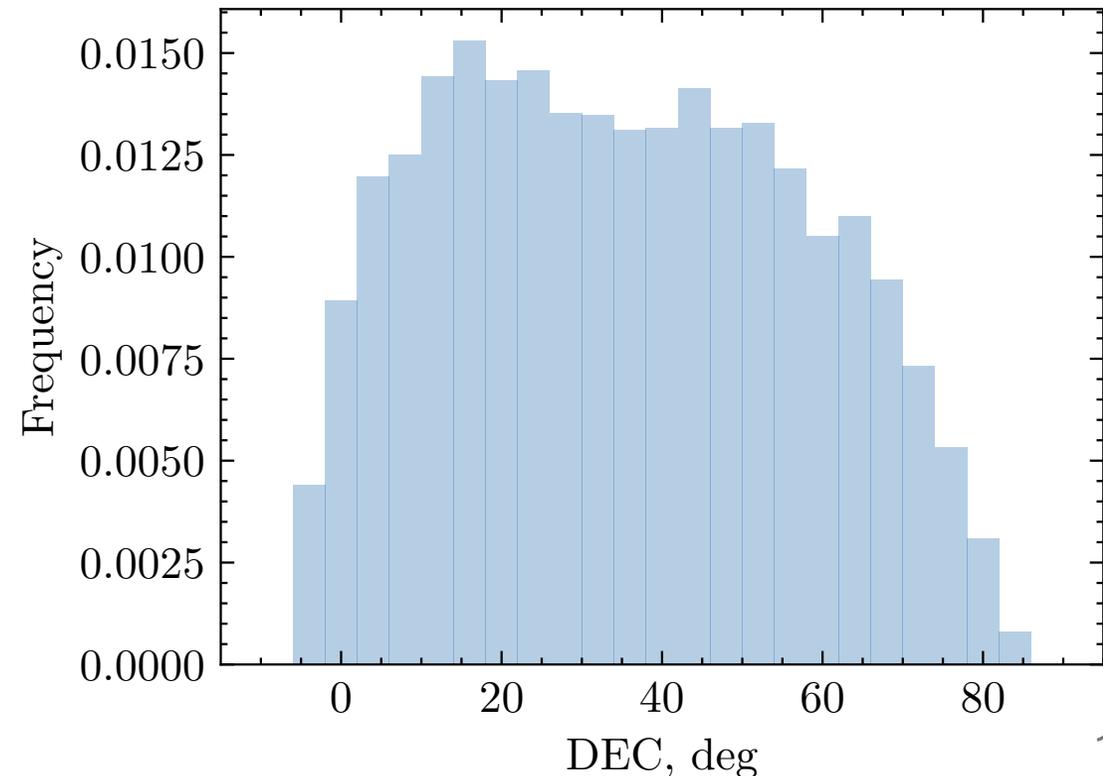
- $R(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i) = R(E_i, DEC_i)$ — экспозиция.
- Для событий с $E_{rec} \geq 10.0$ ЭэВ экспозиция является геометрической.
- Для событий с $E_{rec} \leq 10.0$ ЭэВ экспозиция из реальных данных.
- Распределение по прямому восхождению (RA) равномерно.
- Фит имеет вид:

$$\cos(DEC) \cdot \sum_{i=0}^3 \sigma_i(E) \cdot \sin^i(DEC)$$

Energy spectrum of 14 years events with spectral cuts

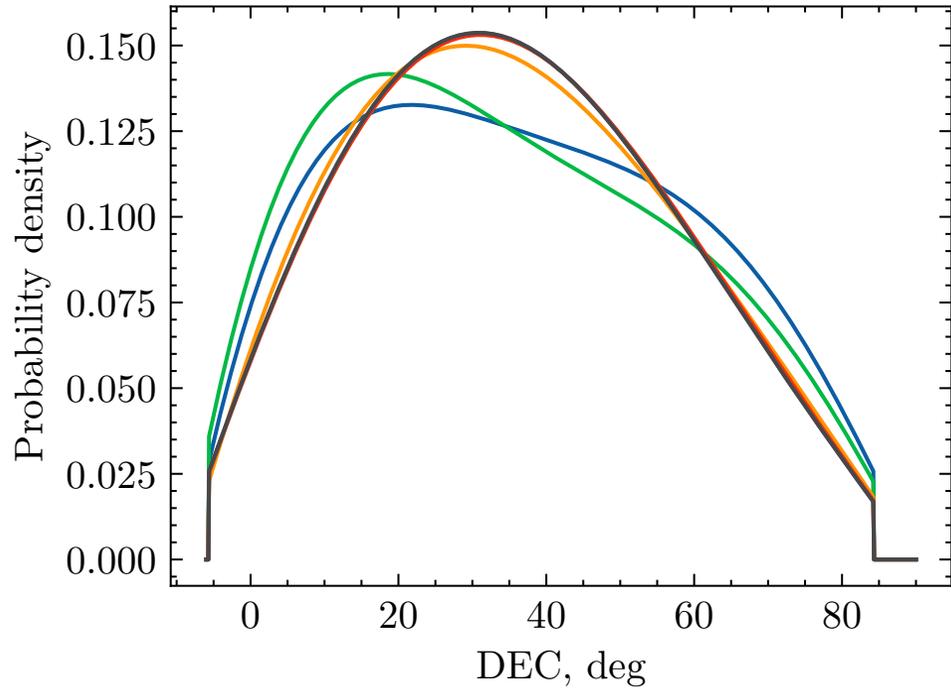


Distribution of real events with $\log_{10}(E/EeV) \in [0.4, 0.6]$



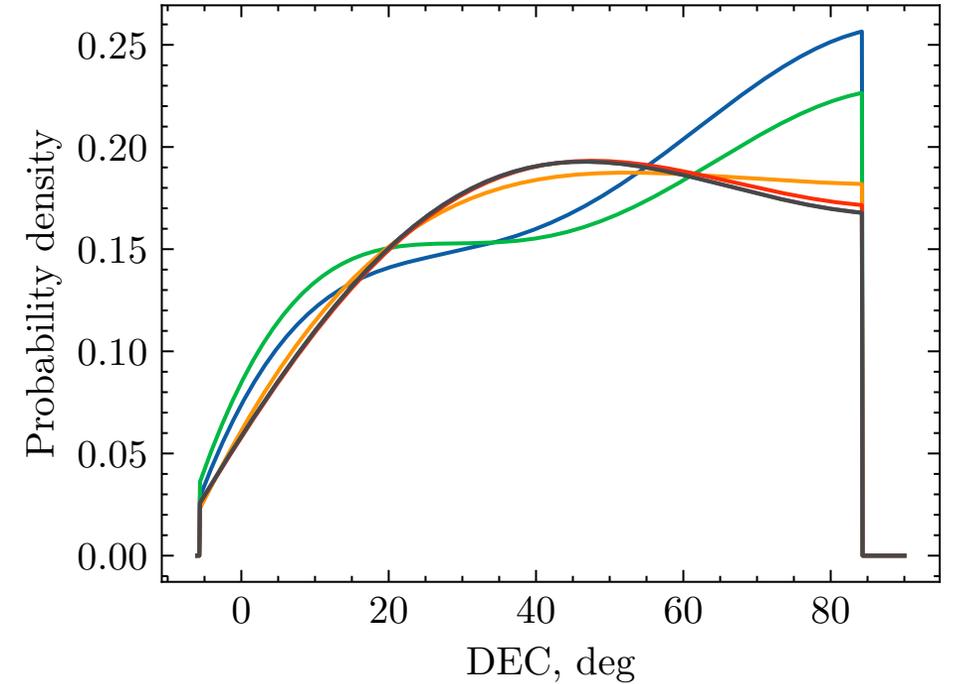
$R(E_i, \text{DEC}_i)$: ЭКСПОЗИЦИЯ

Declination distribution



- $\log_{10}(E/\text{EeV}) = 0.1$
- $\log_{10}(E/\text{EeV}) = 0.5$
- $\log_{10}(E/\text{EeV}) = 0.9$
- $\log_{10}(E/\text{EeV}) = 1.3$
- $\log_{10}(E/\text{EeV}) = 1.7$
- $\log_{10}(E/\text{EeV}) = 2.1$

Declination distribution after division by cosine



$$R(\text{RA}, \text{DEC}, E) = \frac{N}{2\pi} \cdot \sum_{i=0}^3 \sigma_i(E) \cdot \sin^i(\text{DEC})$$

$$\int_{-5.6 \frac{\pi}{180}}^{84.3 \frac{\pi}{180}} \int_0^{2\pi} R(\text{RA}, \text{DEC}) d\text{DEC} d\text{RA} = 1 \rightarrow N$$

Метод максимального правдоподобия 2026

$$Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i) = \sum_{j=1}^M R(\mathbf{s}_j, E_i) Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i) / \sum_{k=1}^M R(\mathbf{s}_k, E_i)$$

$$P_i(\mathbf{x}_i, E_i) = \frac{n_s}{N} Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i) + \frac{N-n_s}{N} R(\mathbf{x}_i, E_i)$$

$$\mathcal{L}(n_s) = \prod_{i=1}^N P_i(\mathbf{x}_i, E_i)$$

$$\mathcal{R}(n_s) = \frac{\mathcal{L}(n_s)}{\mathcal{L}(0)} = \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{n_s}{N} \left(\frac{Q_i^{tot}(\mathbf{x}_i, E_i)}{R(\mathbf{x}_i, E_i)} - 1 \right) + 1 \right\}$$

n_s — число космических лучей от источника

N — число всех космических лучей

M — число источников

$\mathbf{s}_j, \mathbf{x}_i$ — координаты источников и направлений прихода космических лучей

E_i — энергия космического луча

$R(\mathbf{s}_j, E_i)$ — плотность вероятности прихода фонового события (зависит от экспозиции)

$Q_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{s}_j, E_i)$ — плотность вероятности прихода события от источника (зависит от углового разрешения)

Идея метода в том, чтобы изменять параметр n_s для того, чтобы максимизировать \mathcal{R} .

Метод максимального правдоподобия 2026: результаты

\mathcal{F} обозначает долю смоделированных наборов, в которых значение $\ln(\mathcal{R})$ больше или равно тому, что получено из реальных данных.

E, eV	$\ln(\mathcal{R})$	$\langle \ln(\mathcal{R}) \rangle$	$\sigma_{\ln \mathcal{R}}$	\mathcal{F}
$E \geq 10^{19}$	1.62	0.27	0.58	4×10^{-2}
$E \geq 10^{18}$	2.09	0.45	0.80	5×10^{-2}

**Telescope Array
preliminary**

Заключение:

- Проверка корреляций была выполнена с помощью независимых данных с использованием двух методов: метода подсчета пар и метода максимального правдоподобия.
- Post-trial p-value с помощью метода подсчета пар 3×10^{-2} для событий с $E \geq 10^{19}$ эВ для 16 лет данных с анизотропными катами.
- P-value с помощью метода максимального правдоподобия 5×10^{-2} для событий с $E \geq 10^{18}$ эВ для 14 лет данных со спектральными катами.
- Результаты корреляций с данными TA SD согласуются с предыдущими результатами, полученными с использованием данных HiRes, но сигнал слабее.



Спасибо за внимание

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 22-12-00253-П



Российский
научный
фонд

