

Аномальные корреляции космических лучей и лацертид с использованием данных Telescope Array

М. А. Куденко^{1,2}, М. Ю. Кузнецов¹, Г. И. Рубцов¹, С. В. Троицкий^{1,2}

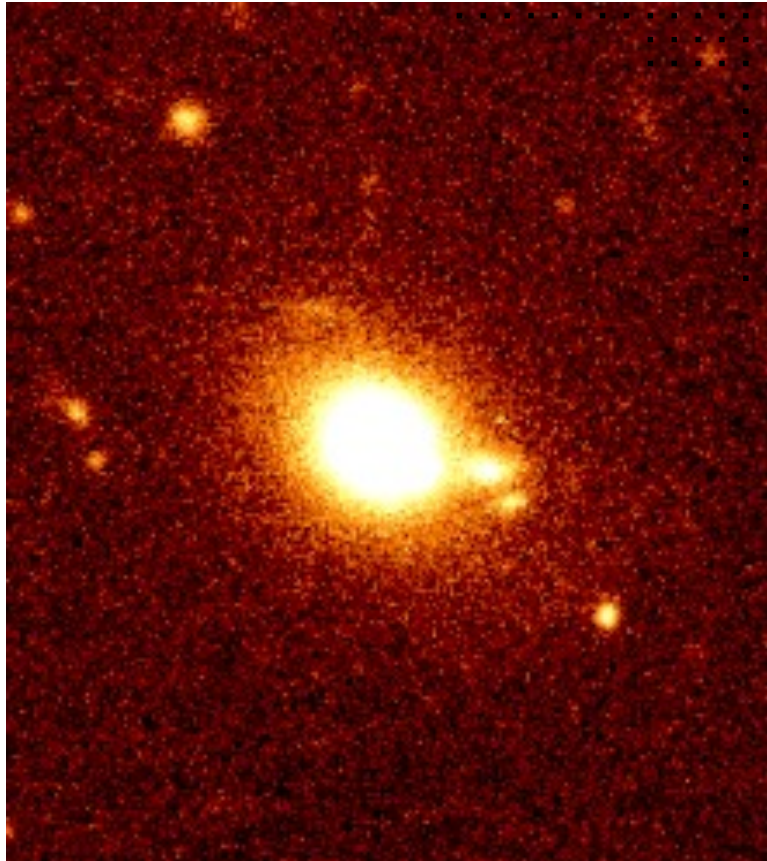
¹ИЯИ РАН

²МГУ

Telescope Array Collaboration

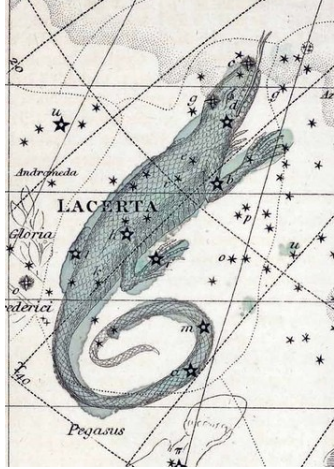


Лацертиды



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

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

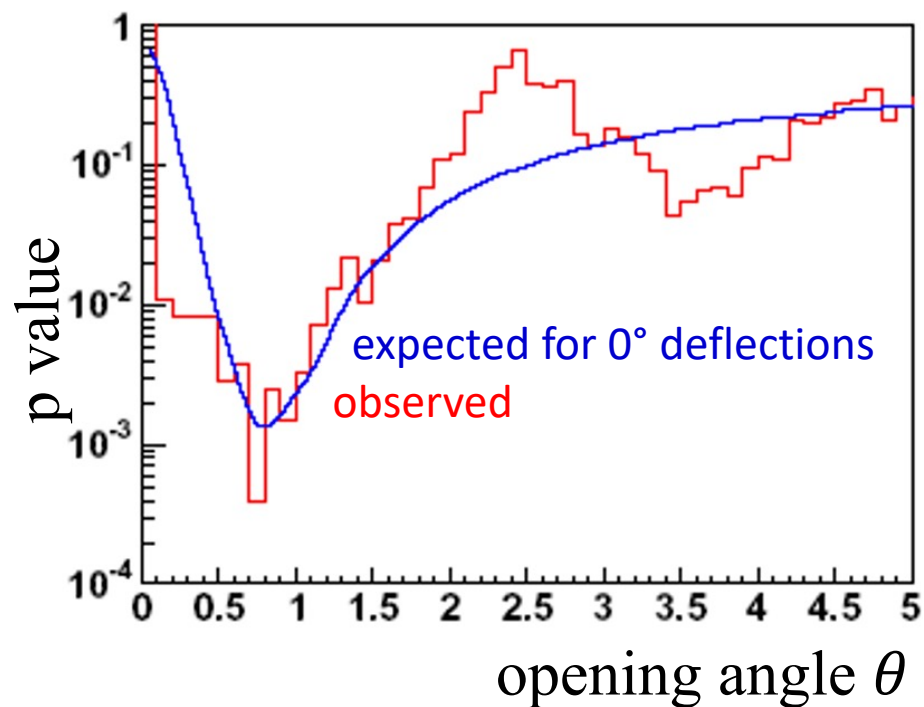


High Resolution Fly's Eye



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

HiRes стерео & 156 лацертид



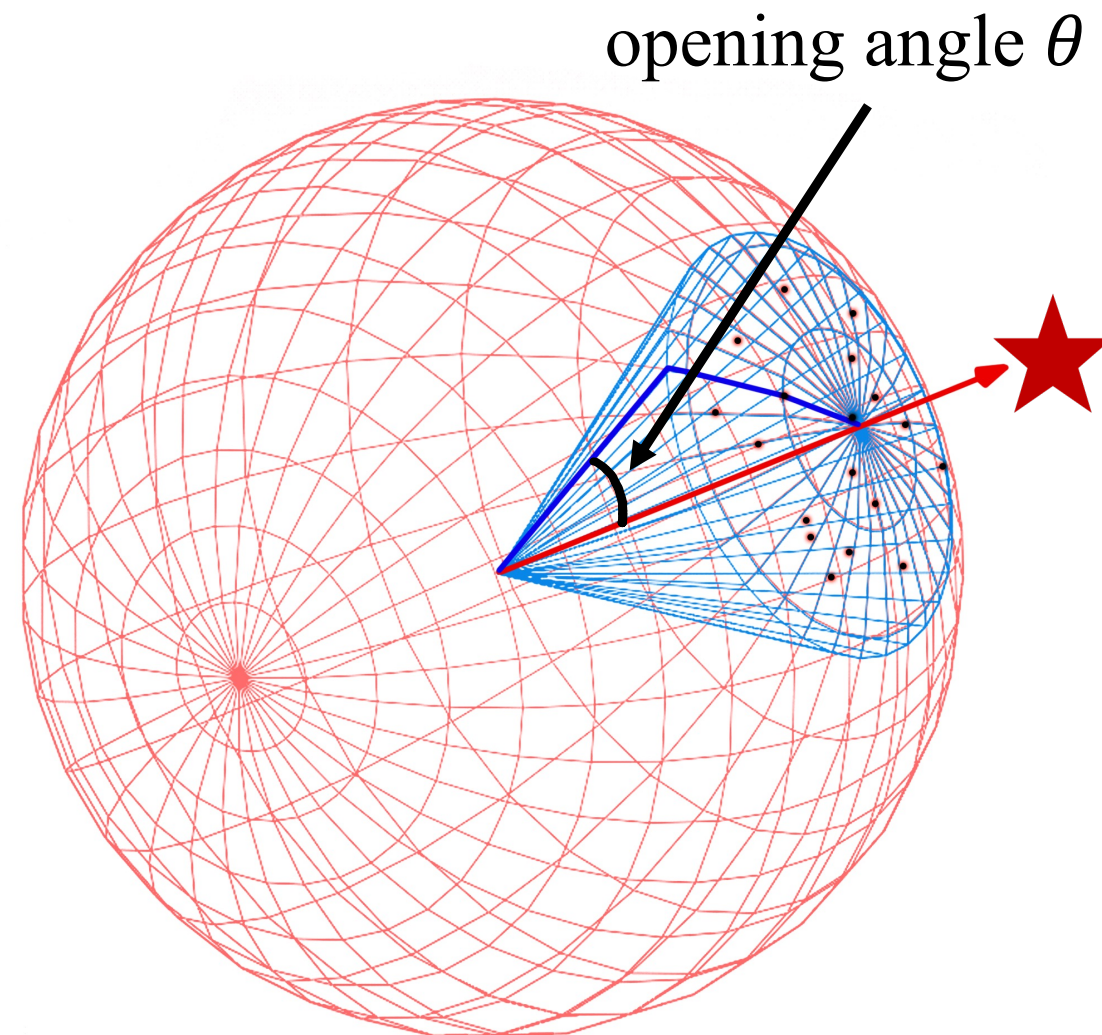
- Набор 156 лацертид
 - 271 событие с $E \geq 10^{19}$ эВ
 - 11 пар “лацертида-космический луч” наблюдается
 - 3 пары ожидается при изотропии
 - Post-trial p-value = 10^{-3} при $\theta = 0.8^\circ$
 - Угловое разрешение HiRes 0.6°
- (D. Gorbunov et al., JETP letters, 2004)

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

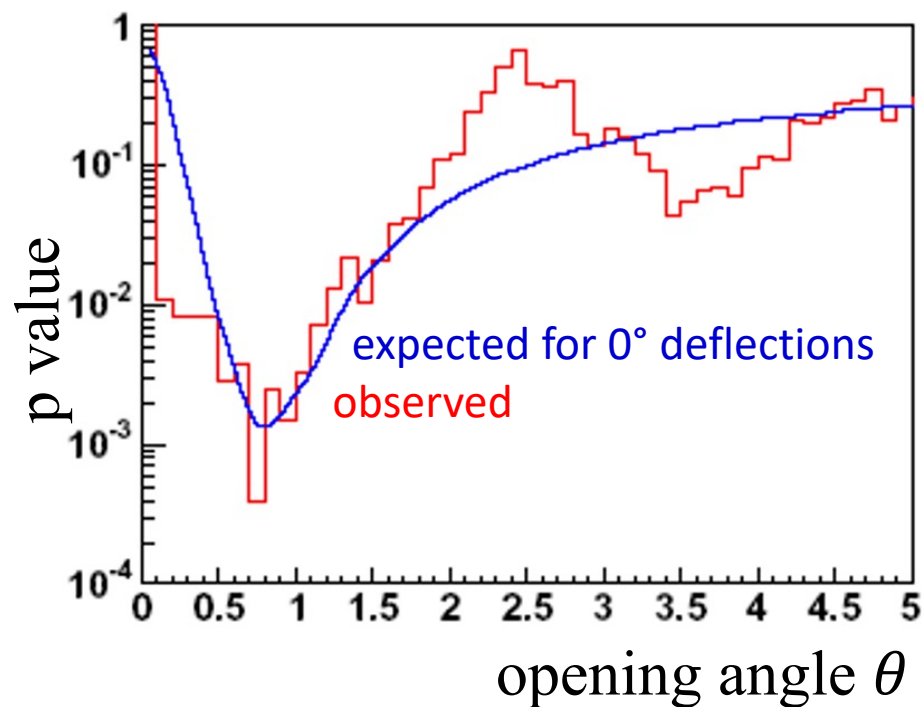
Метод расчета пар

Для выбранного набора лацертид, космических лучей и фиксированного угла θ можно посчитать, сколько космических лучей находятся от источников на угловом расстоянии меньше θ . Затем можно заменить набор реальных космических лучей набором Монте Карло и повторить процедуру.

Таким образом, можно рассчитать p-value, которое будет измерять вероятность получить наблюдаемое или большее значение пар случайно.



HiRes стерео & 156 лацертид



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

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

HiRes стерео & 156 лацертид

TABLE 4
HiRES — BL LAC CORRELATION SUMMARY: FRACTION \mathcal{F} OF
SIMULATED HiRES SETS WITH STRONGER CORRELATION SIGNAL.

Source Sample (# Obj.)	All Energies	$E > 10 \text{ EeV}$
<u>“BL” Objects, $m < 18$ (157)</u>	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Confirmed BL Lacs, $m < 18$ (204)	5×10^{-4}	10^{-5}
Confirmed TeV Blazars (6)	10^{-3}	2×10^{-4}

NOTE. — All samples are contained within Table 2 of the Veron 10th Catalog. The samples overlap and are *not* independent: “Confirmed BL Lacs” combines “BL” and “HP” classified BL Lacs; TeV Blazars are a subset of the confirmed BL Lacs.

- Набор 156 ± 1 лацертид
 - Метод максимального правдоподобия
 - n_s — число событий от лацертид в качестве параметра
 - $E \geq 10^{19}$ эВ: $n_s = 9$, p-value = $2 \cdot 10^{-4}$
 - **Все E**: $n_s = 31$, p-value = $2 \cdot 10^{-4}$
- (HiRes Collaboration, ApJ, 2006)

Результат был подтвержден другим методом!

HiRes стерео & 156 лацертид

~ 31 из 4495 событий

~ 9 из 271 событий с $E \geq 10^{19}$ эВ



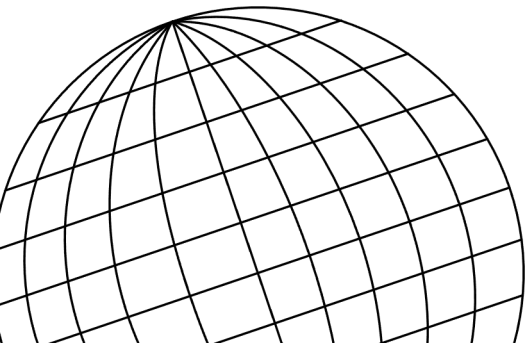
Пришли от лацертид без отклонений в магнитном поле!

Лацертиды находятся на расстоянии $\gtrsim 150$ Мпк.

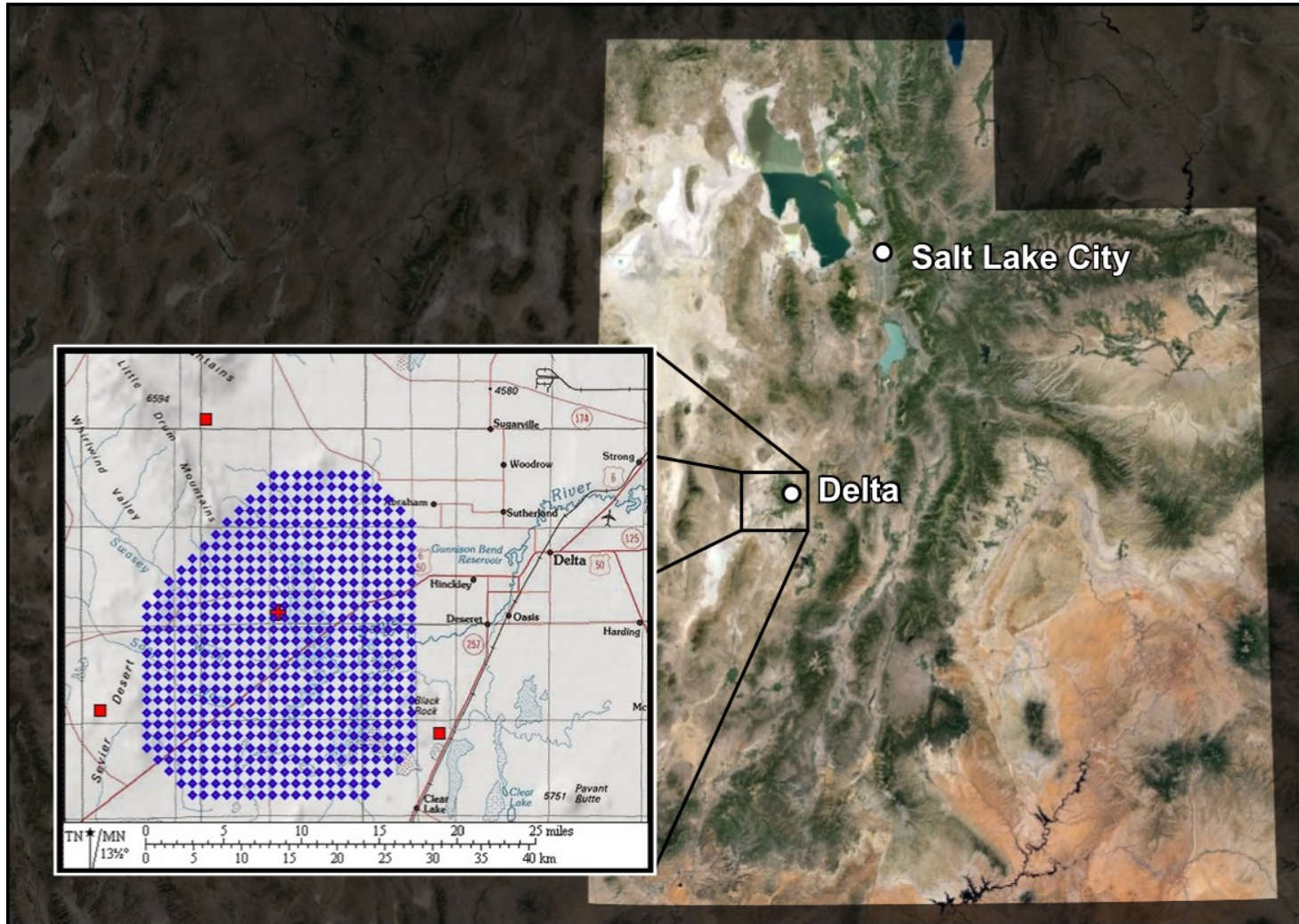
Нейтральная первичная частица



Нужно больше тестов!



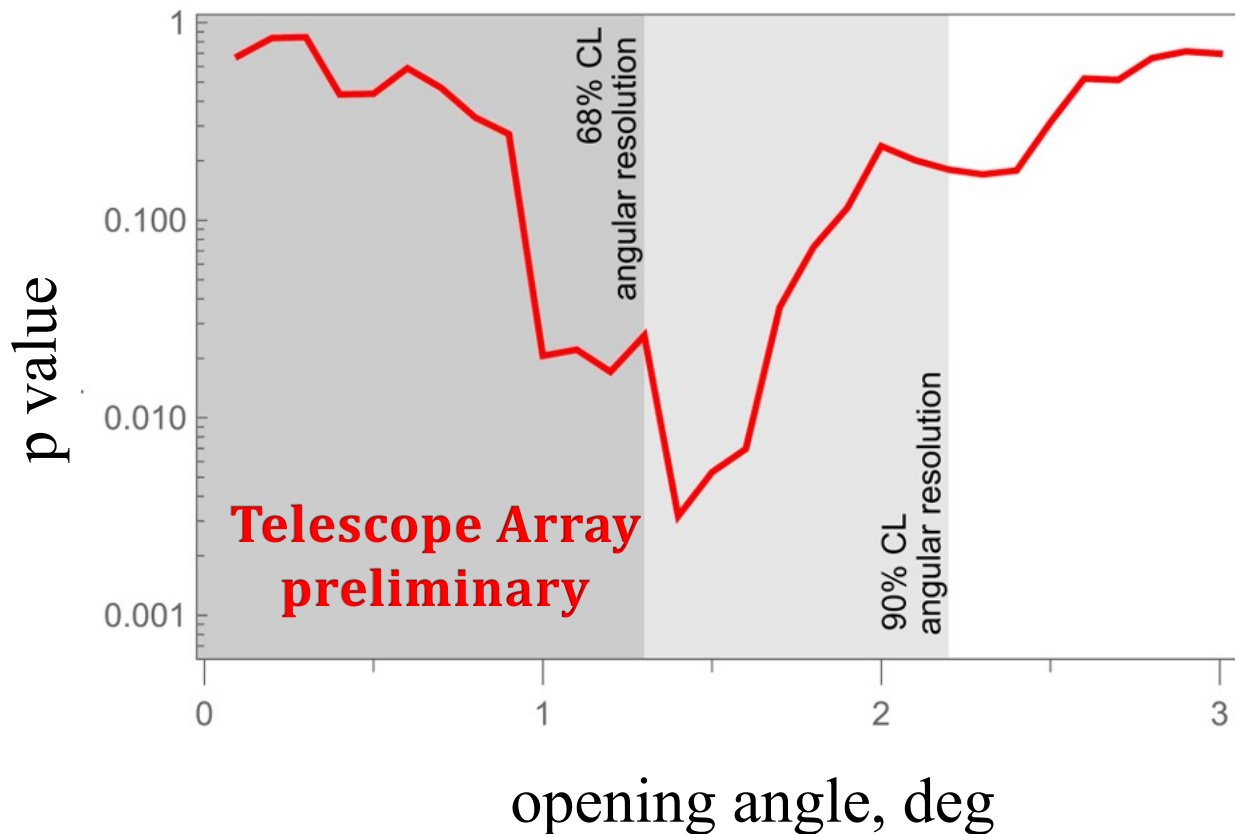
Telescope Array



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

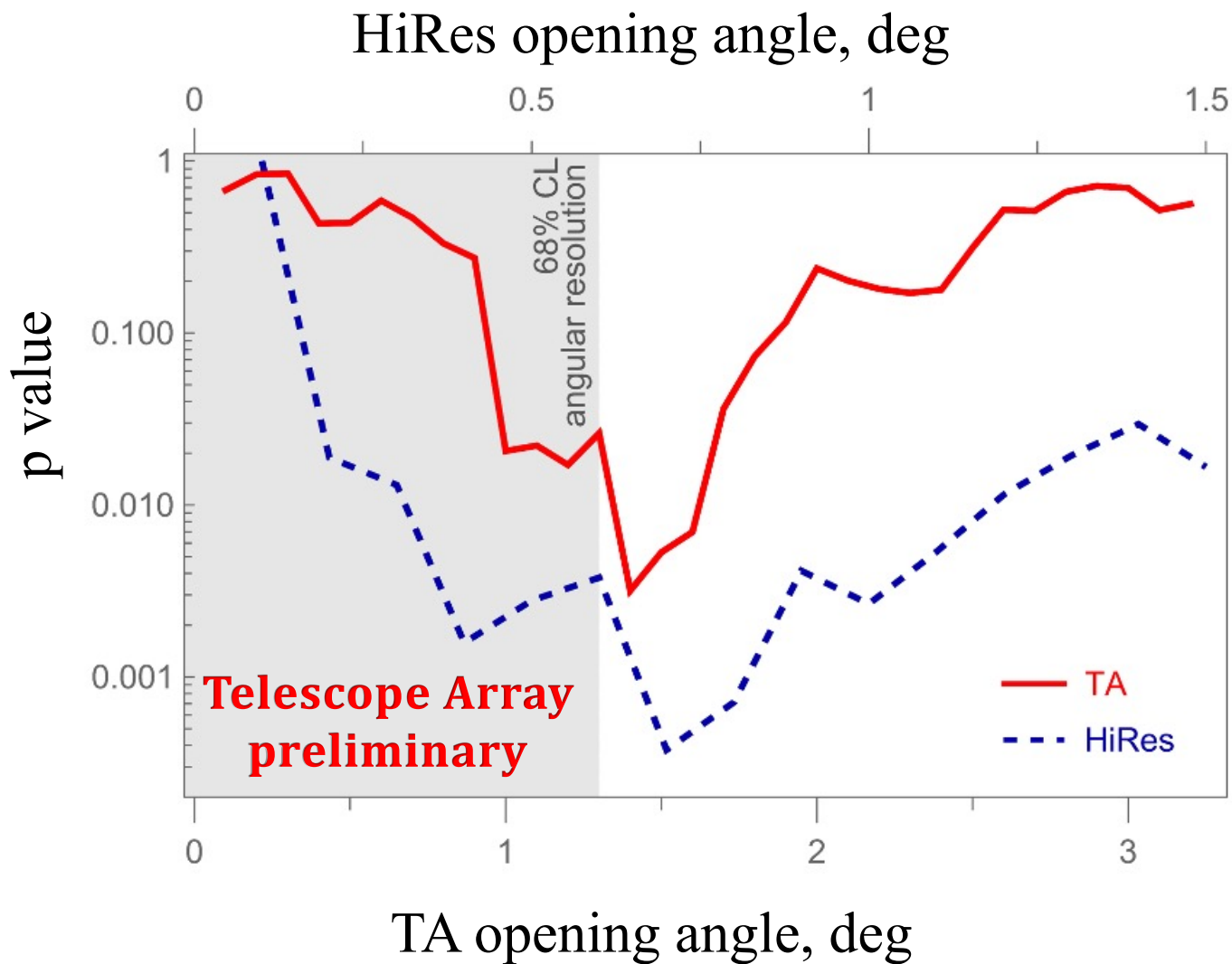
Состоит из сцинтилляционных «наземных» детекторов (SD) и флуоресцентных телескопов (FD).

Telescope Array SD & 156 лацертид



- Набор 156 лацертид
- 6712 событий с $E \geq 10^{19}$ эВ
- 279 пар “лацертида-космический луч” наблюдается
- 235 пары ожидается при изотропии
- Минимальное p-value = $3 \cdot 10^{-3}$ при $\theta = 1.4^\circ$
- Угловое разрешение 1.3°
- Post-trial p-value = $3 \cdot 10^{-2}$

TA SD & HiRes & 156 лацертид

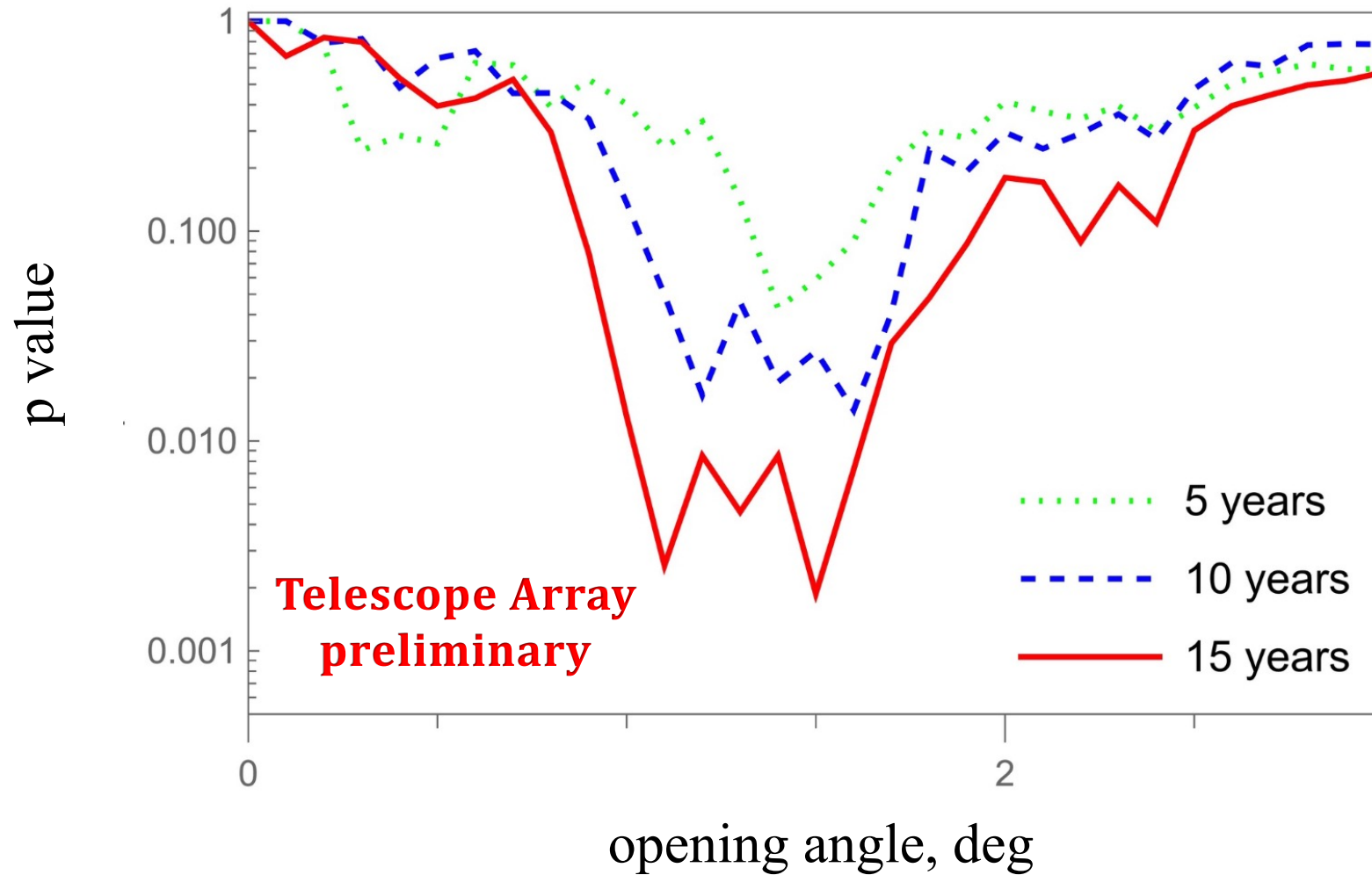


Видно, что результаты согласуются, но сигнал для Telescope Array слабее.

fraction of excess events from BLLs in the data set:

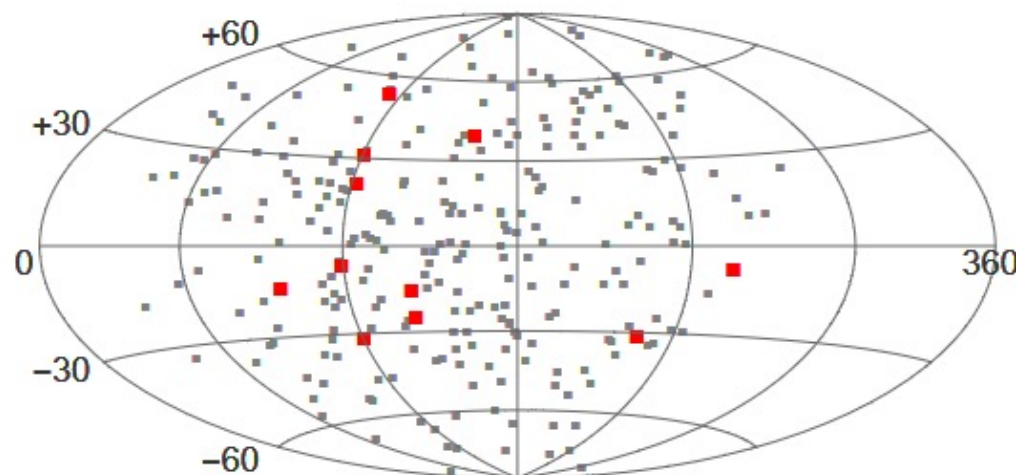
Data set	fraction, %	68% CL	95% CL
HiRes stereo	3.0	± 1.2	$+2.7$ -2.0
TA SD	0.66	± 0.25	$+0.50$ -0.47

Telescope Array SD & 156 лацертид



- Видно, что эффект накапливается!

HiRes стерео & 156 лацертид



Красные точки – коррелирующие космические лучи с $E \geq 10^{19}$ эВ.

Серые точки – все космические лучи HiRes.

Сверхгалактические координаты.

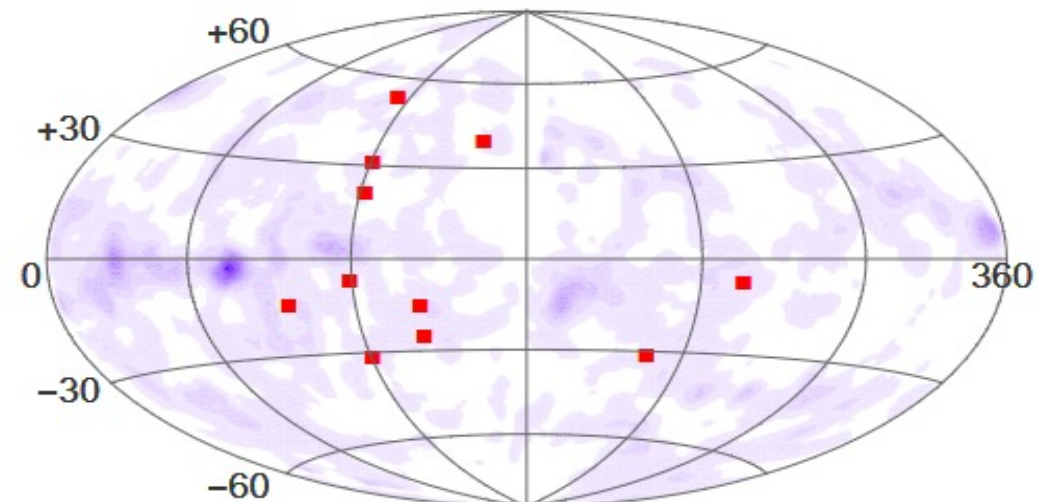


График плотности – взвешенная плотность ближайших (≈ 30 Мпк) галактик.

Красные точки – коррелирующие лацертиды

Сверхгалактические координаты.

(S. Troitsky, EPJ, 2021)

Заключение

- Аномальные корреляции, обнаруженные 20 лет назад в данных HiRes, наблюдаются в данных Telescope Array
- Предполагается наличие нейтральных частиц от очень далеких источников
- Ключ к улучшению анализа – угловое разрешение

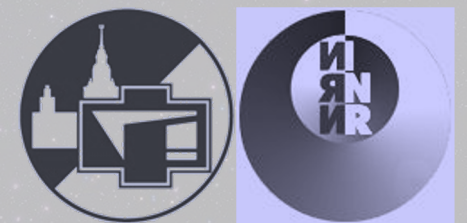
Дальнейшие планы

- Провести анализ с помощью метода максимального правдоподобия, который позволит расширить результат на более низкие энергии
- Использовать события, зарегистрированные в стерео режиме, как было у HiRes
- Исследовать тип первичных частиц, ответственных за корреляции

Спасибо за внимание

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

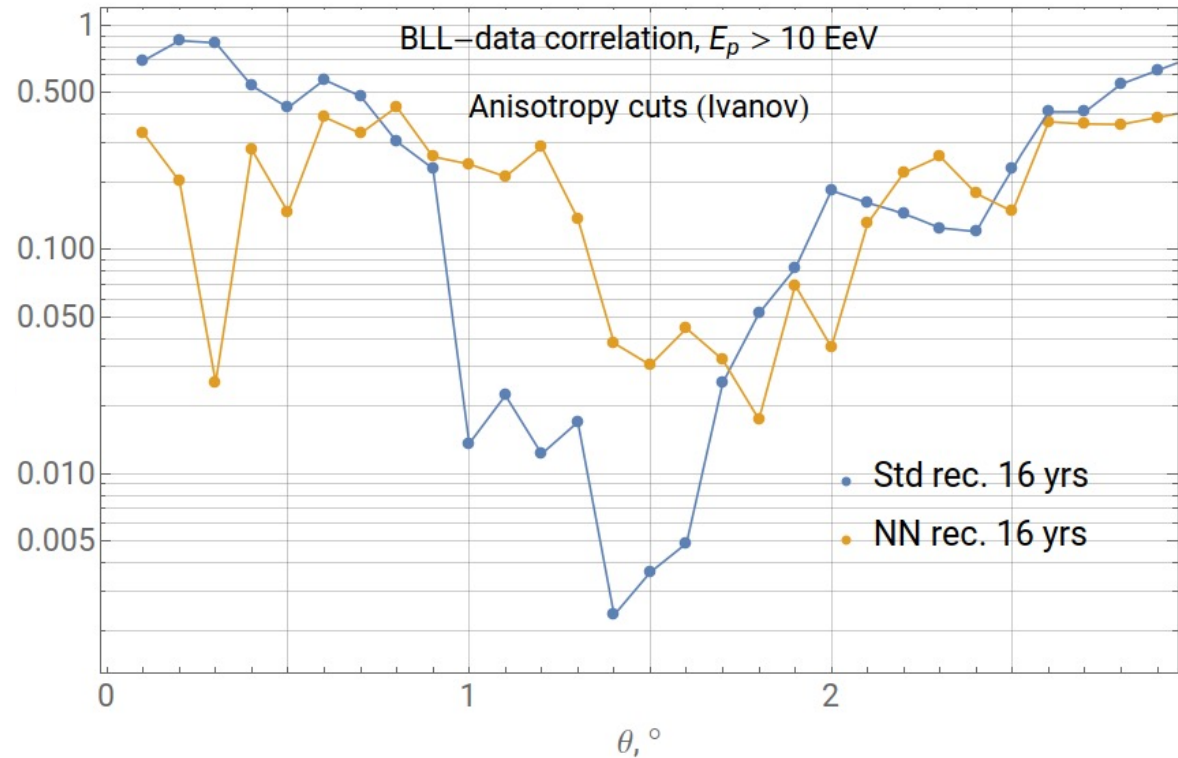
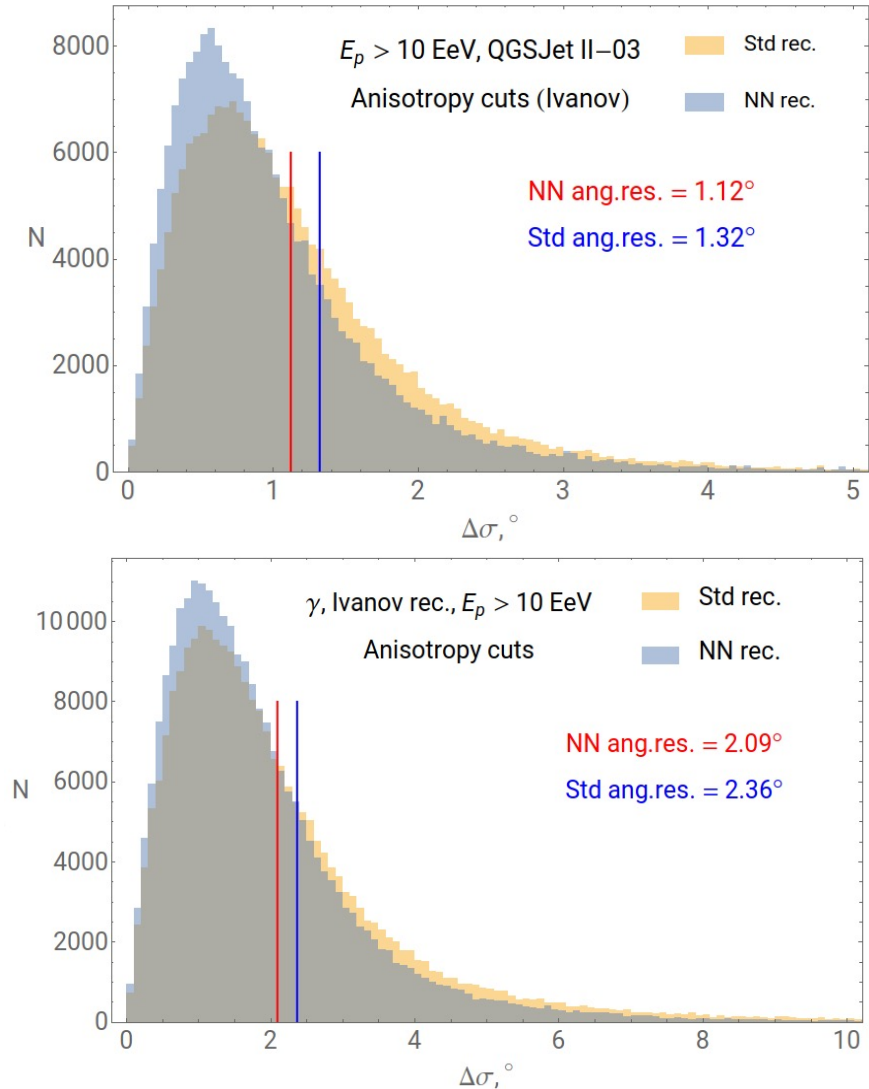
Докладчик благодарит фонд «Базис» за стипендию по договору 24-2-1-59-1



Back up



Нейронные сети и данные TA SD



- Нейронная сеть натренирована на наборе QGSJETII-04 Fe+p mix
- Улучшено угловое разрешение
- Post-trial p-value 0.048

(D. Ivanov et al. 2001)