

37

Всероссийская конференция по космическим лучам



Исследование анизотропии космических лучей ПэВ-ных энергий с помощью групп мюонов

*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

*Туринская Астрофизическая обсерватория
– INAF, Италия*

Научно-образовательный центр



Амельчаков М.Б., Богданов А.Г., Дмитриева А.Н., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г.,
Маннокки Дж., Петрухин А.А., Тринкоро Дж., Хохлов С.С., Шульженко И.А., Шутенко В.В.,
Юрина Е.А., Яшин И.И.

27 июня – 2 июля 2022 г.

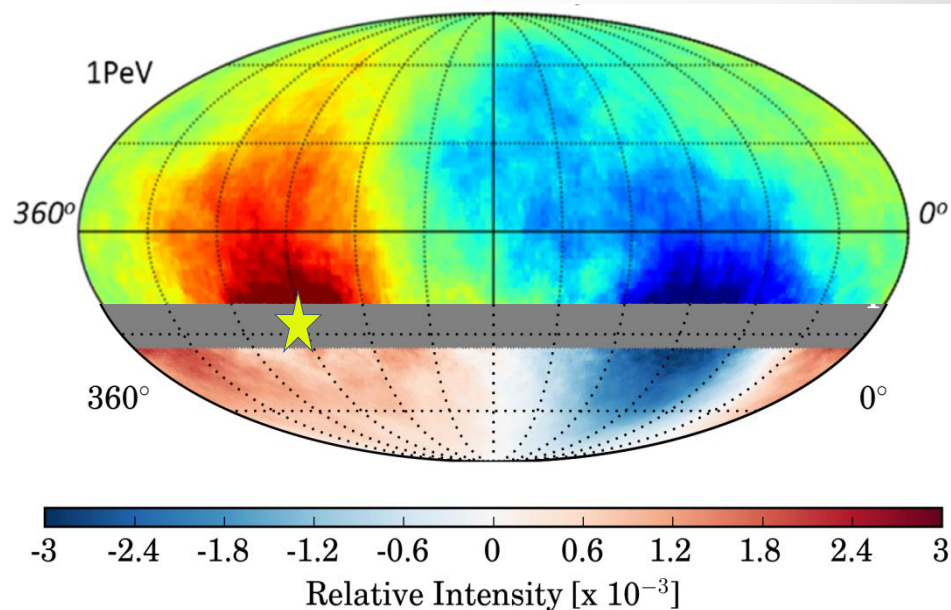
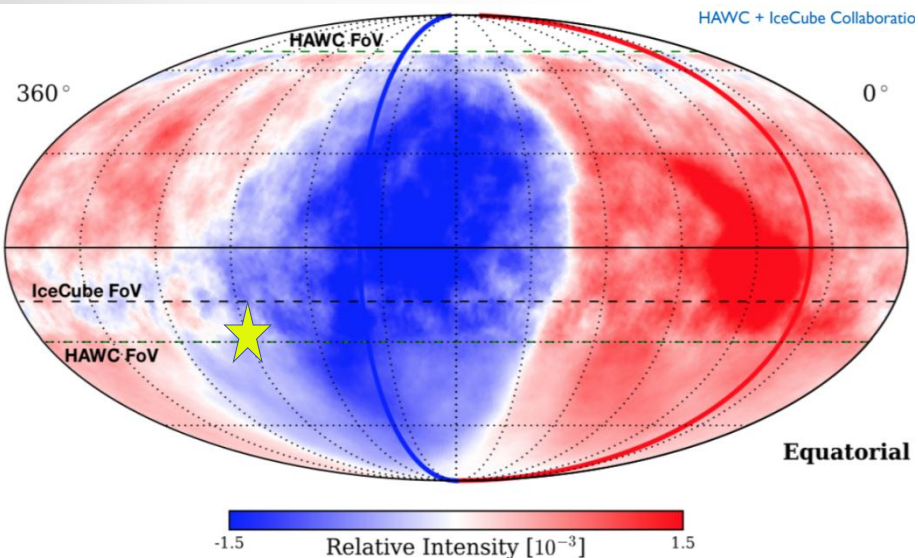
Исследование анизотропии КЛ

HAWC

$E \sim 20 \text{ ТэВ}$

$E \sim 1 \text{ ПэВ}$

Tibet AS γ



IceCube

IceTop

$E \text{ от } 10^{12} \text{ до } 10^{17} \text{ эВ}$

$A \in (10^{-4} - 10^{-3})$

Анизотропия имеет в основном дипольный характер

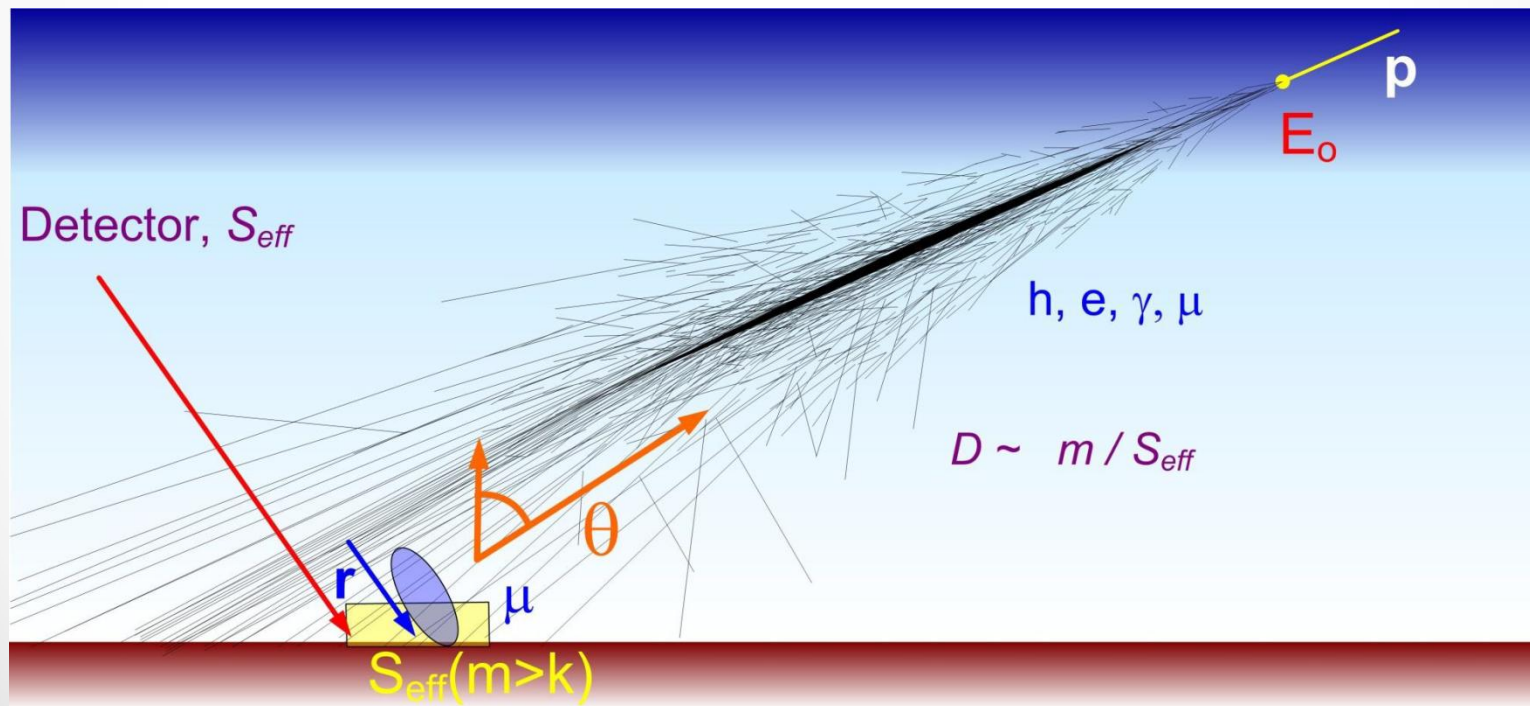
Основной причиной является диффузия

Группы мюонов

Группы мюонов это генетически связанные мюоны с квази-параллельными треками.

Группы мюонов генерируются вблизи оси ШАЛ и могут прилетать в широком диапазоне зенитных углов.

Группы мюонов с хорошей точностью сохраняют направление прилёта первичной частицы и поэтому могут использоваться в качестве инструмента для исследования анизотропии КЛ.



Экспериментальный комплекс НЕВОД



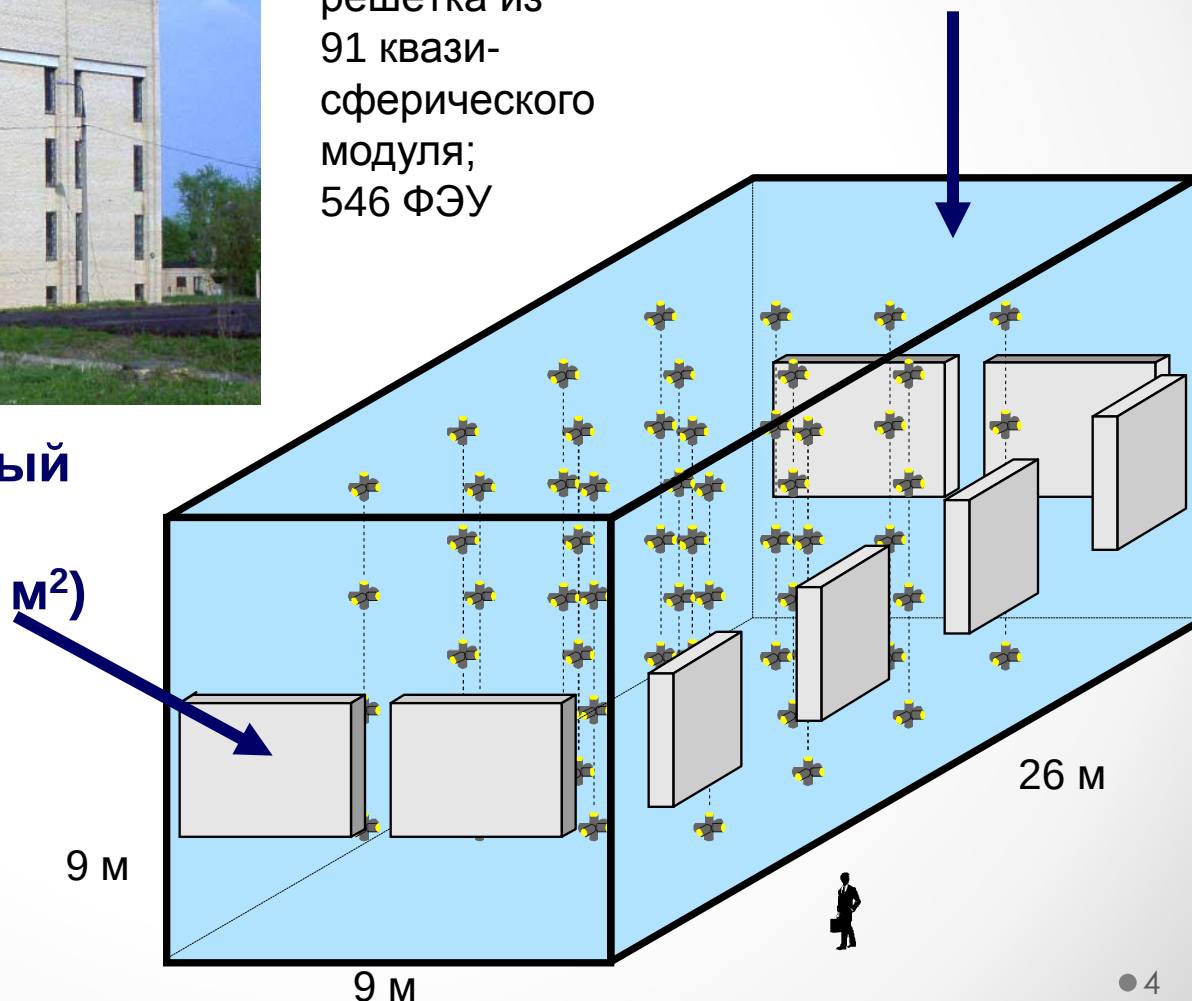
Координатно-трековый детектор ДЕКОР (общая площадь $\sim 70 \text{ м}^2$)

8 супермодулей на
стримерных трубках

Основной особенностью
является вертикальное
расположение и хорошие
пространственное и угловое
разрешения (1 см и $\sim 1^\circ$).

Черенковский водный детектор (2000 м^3)

Пространственная
решётка из
91 квази-
сферического
модуля;
546 ФЭУ

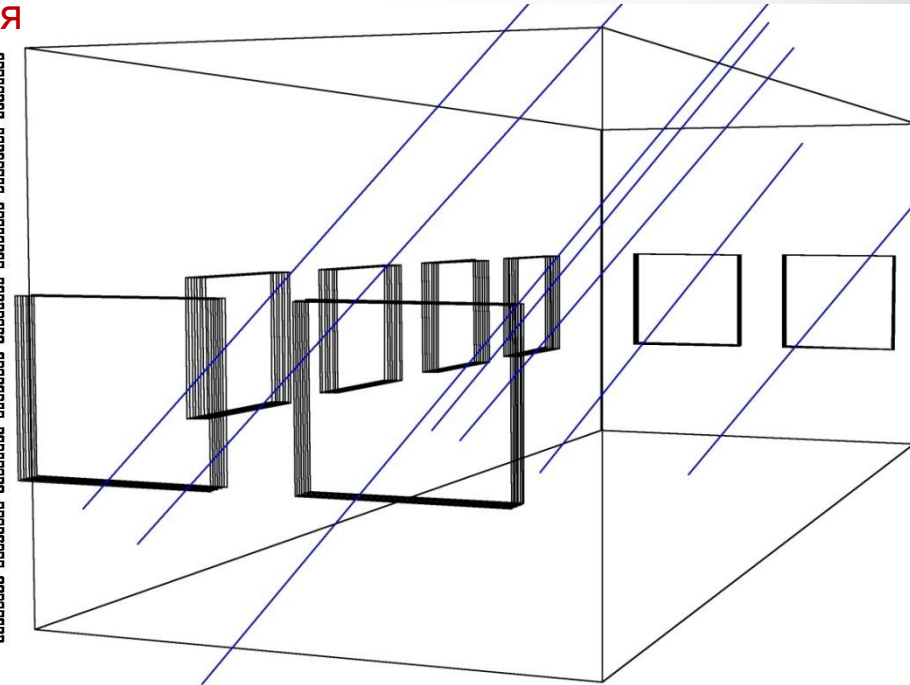
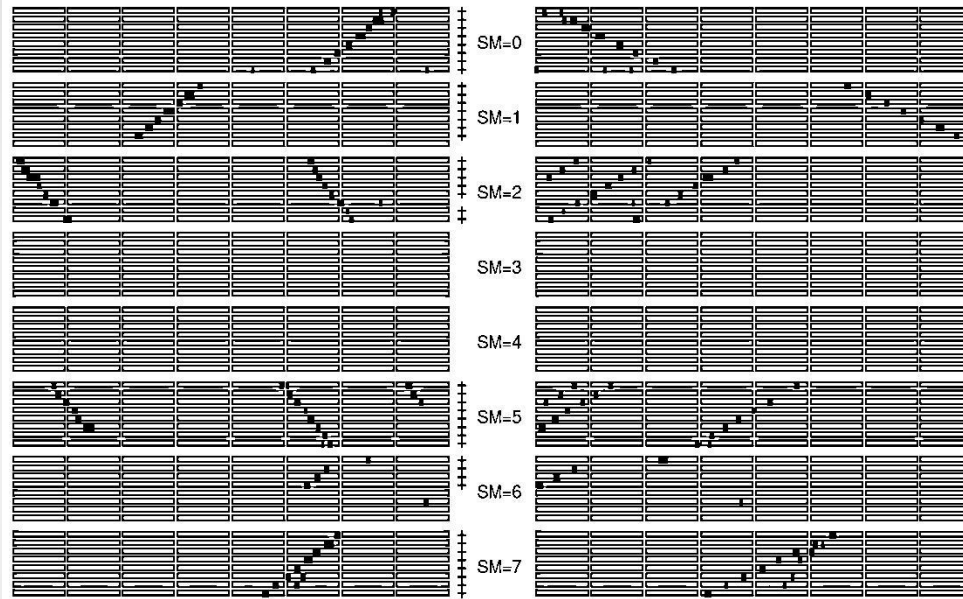


Отклик супермодулей на событие с группой мюонов

Треки в двух проекциях супермодулей

3D реконструкция

Горизонтальная проекция Вертикальная проекция



Две выборки событий:

1. Не менее 3 треков в 3 супермодулях.
2. Не менее 5 треков в 3 супермодулях.

Экспериментальные данные

Экспозиция с 03.05.2012 по 19.01.2022 г.

«Живое» время наблюдения ~ 57 тыс. часов (~ 6.5 лет).

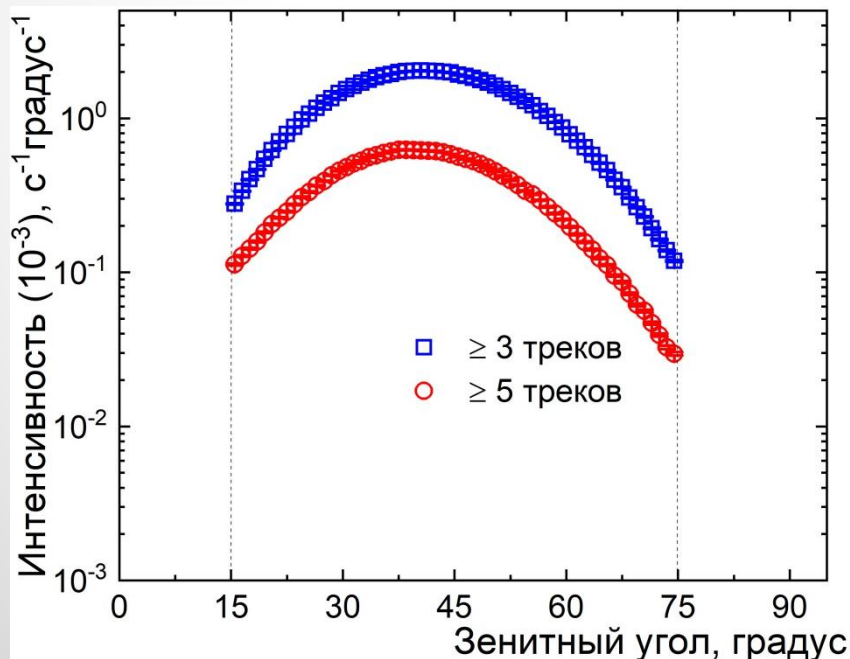
Зенитный угол ограничен диапазоном от 15° до 75° .

Число отобранных событий:

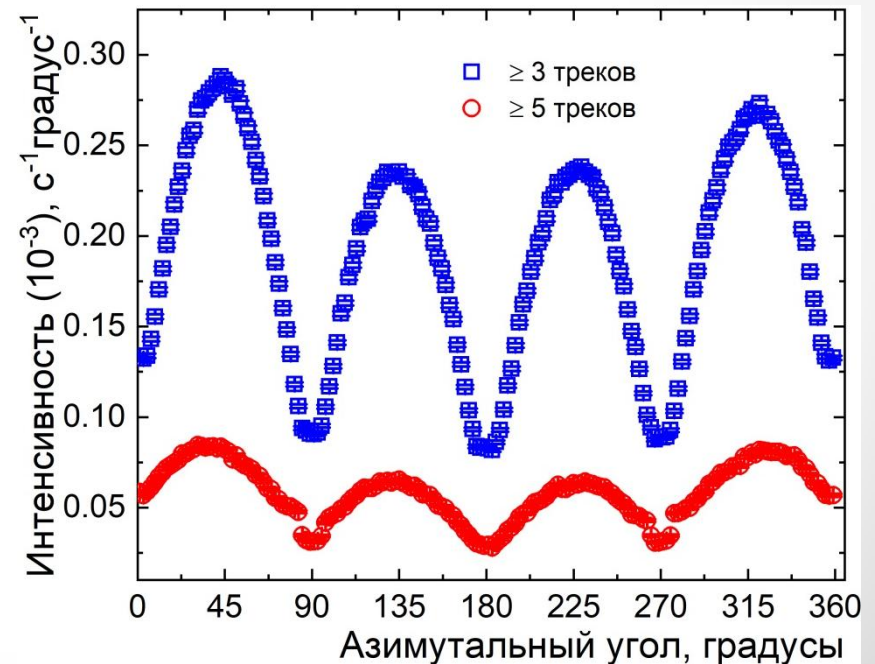
> 3 треков - ~ 14 млн.

> 5 треков - ~ 4 млн.

Зенитные углы



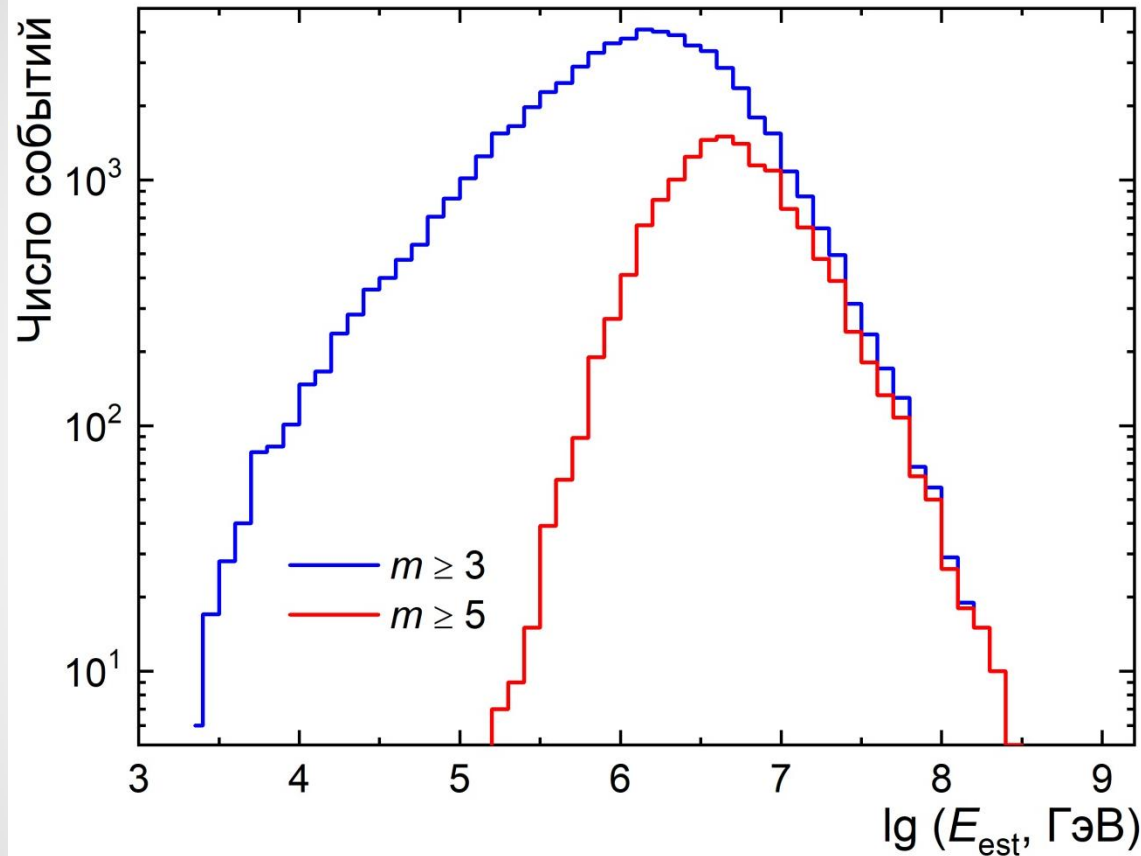
Азимутальные углы



Оценка первичной энергии

$$\langle \lg(E_{\text{est}}, \text{GeV}) \rangle \approx 7.03 + 1.07 \lg(D, \text{m}^{-2}) + 3.80 \lg(\sec \theta)$$

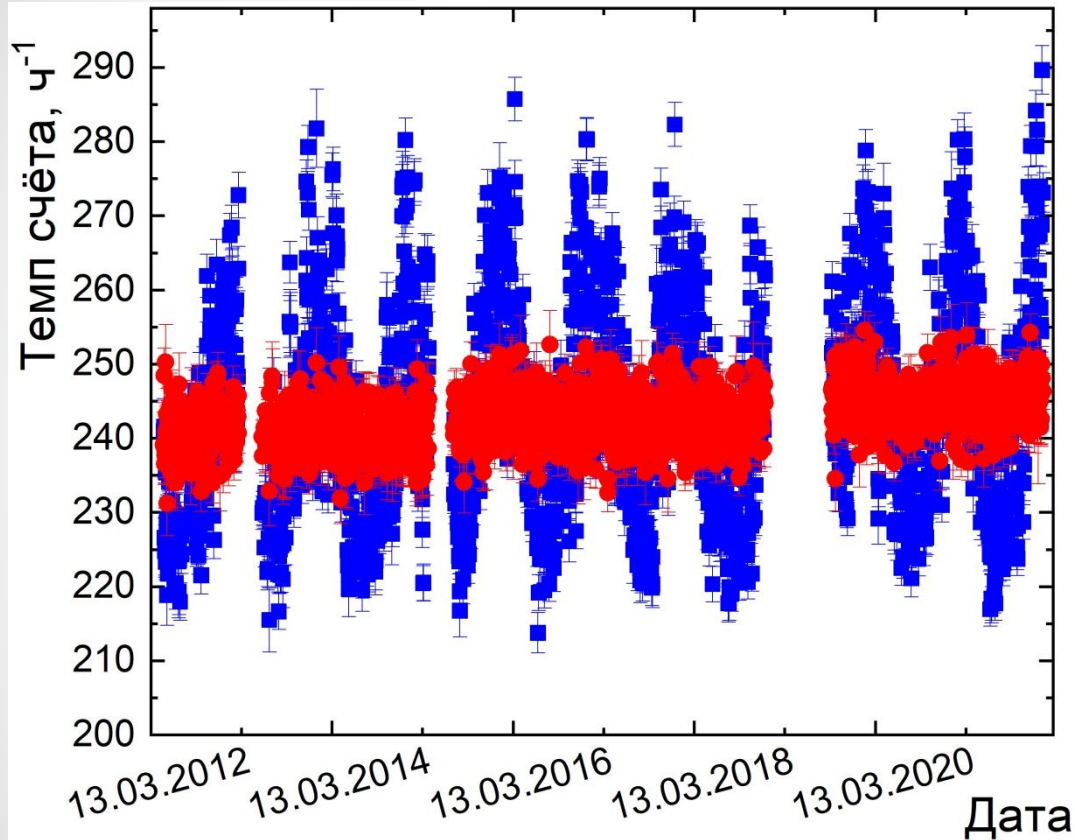
A. G. Bogdanov et al., 2010, Phys. At. Nucl. **73**, 1852.



Выбор.	> 3 тр.	> 5 тр.
$E_0, \text{эВ}$	10^{15}	5×10^{15}
$\sigma(\lg E_{\text{est}})$	0.689	0.439
$\sigma(\lg E_0)$	0.80	0.59

Темп счёта групп мюонов

Долговременные исследования выявили сезонные и кратковременные вариации темпа счёта групп мюонов:



$$F(t) = F_0 \left(\frac{H_{500}(t)}{H_0} \right)^\lambda = \eta(t) F_0$$

(Yurina E. A. et al, 2019, J. Phys.: Conf. Series 1189, 012010)

Значения H_{500} из базы данных GDAS :

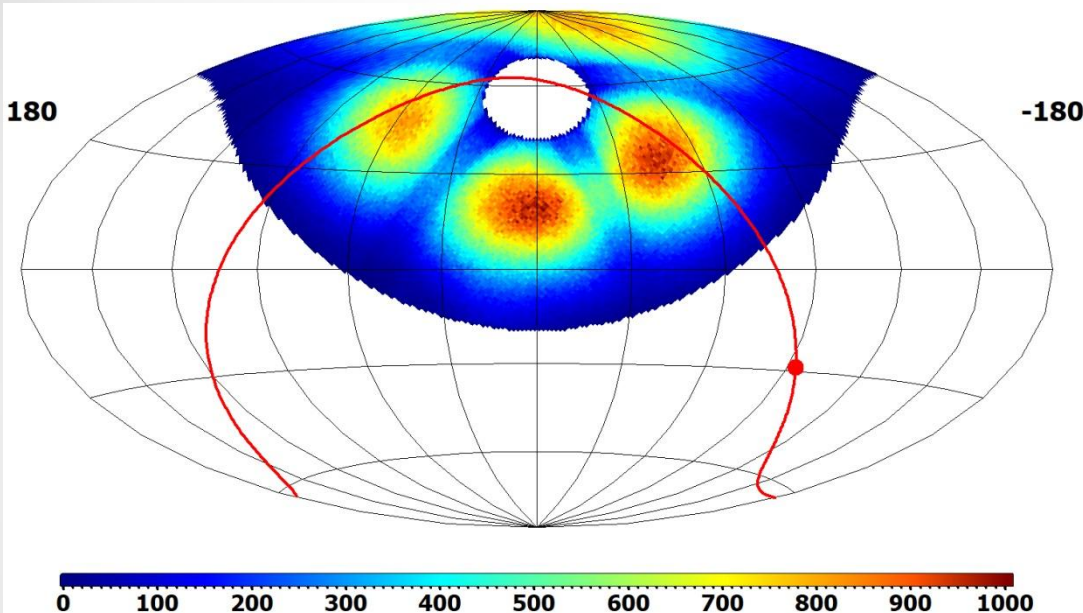
NOAA Air Resources Laboratory (ARL)
2015

<http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php>

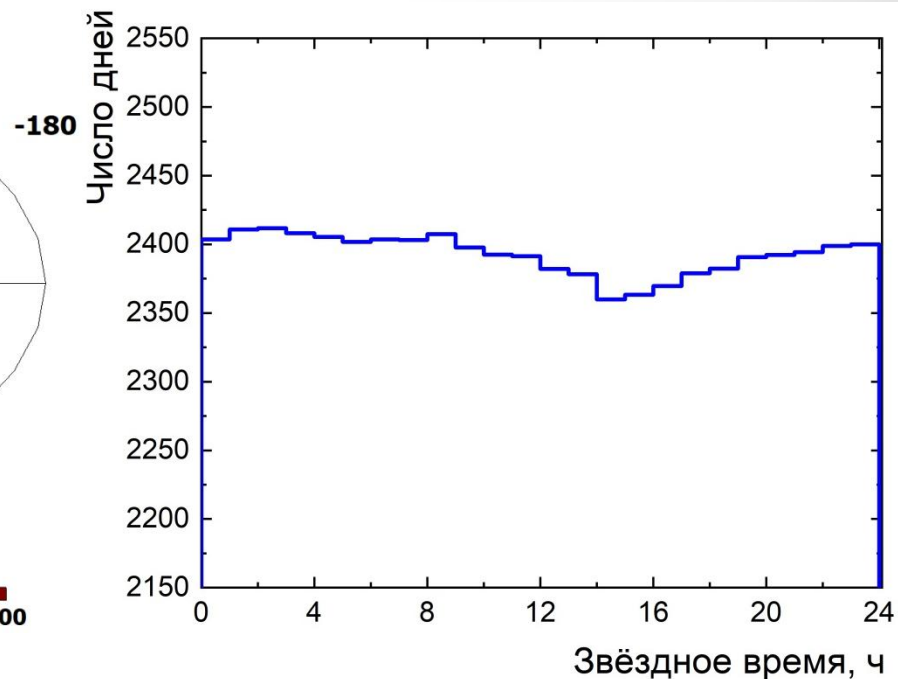
Среднеквадратичный разброс темпа счёта уменьшился в 4 раза и стал практически равным статистической погрешности.

Учёт влияния светосилы детектора

Карта зарегистрированных событий при отсутствии вращения Земли вокруг своей оси.



Распределение “живого” времени наблюдения



1 пиксель соответствует 2.6×10^{-4} ср

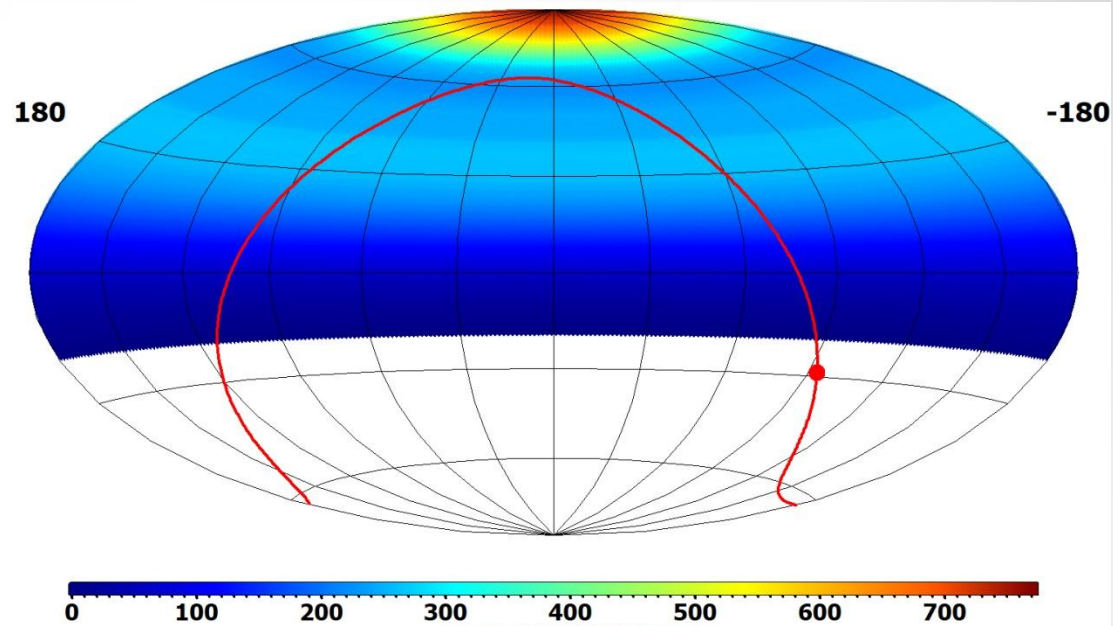
Для получения карты ожидаемых событий, необходимо нормировать снимки на «живое» время наблюдения для каждого интервала звёздного времени.

Распределение ожидаемых событий

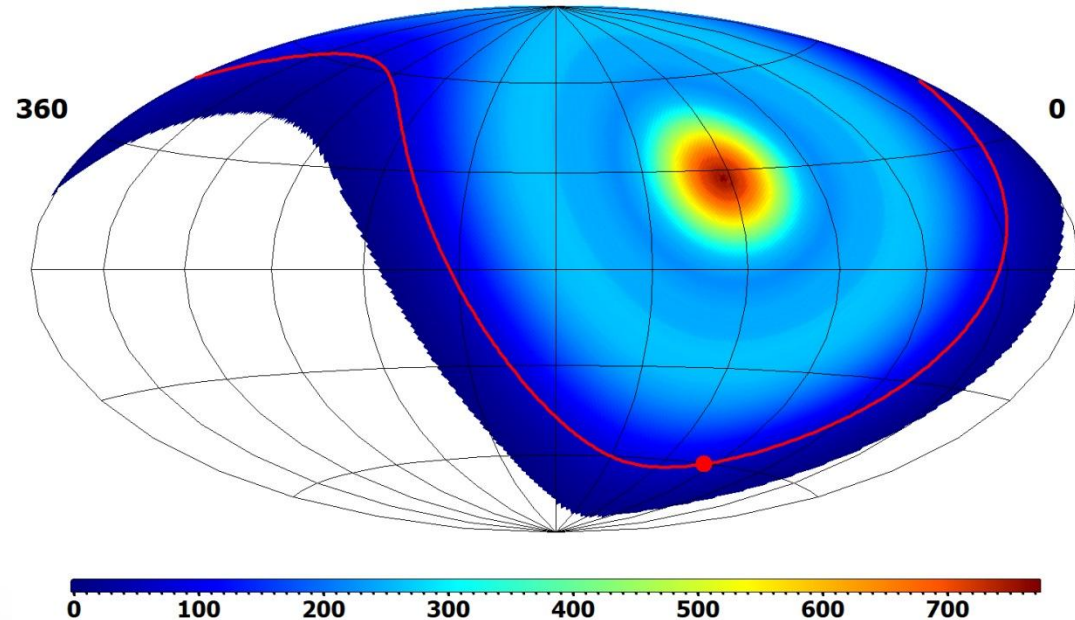
Во II Экваториальной системе

Диапазон склонений
от -20° до 90°

Нет возможности
наблюдать галактический
центр



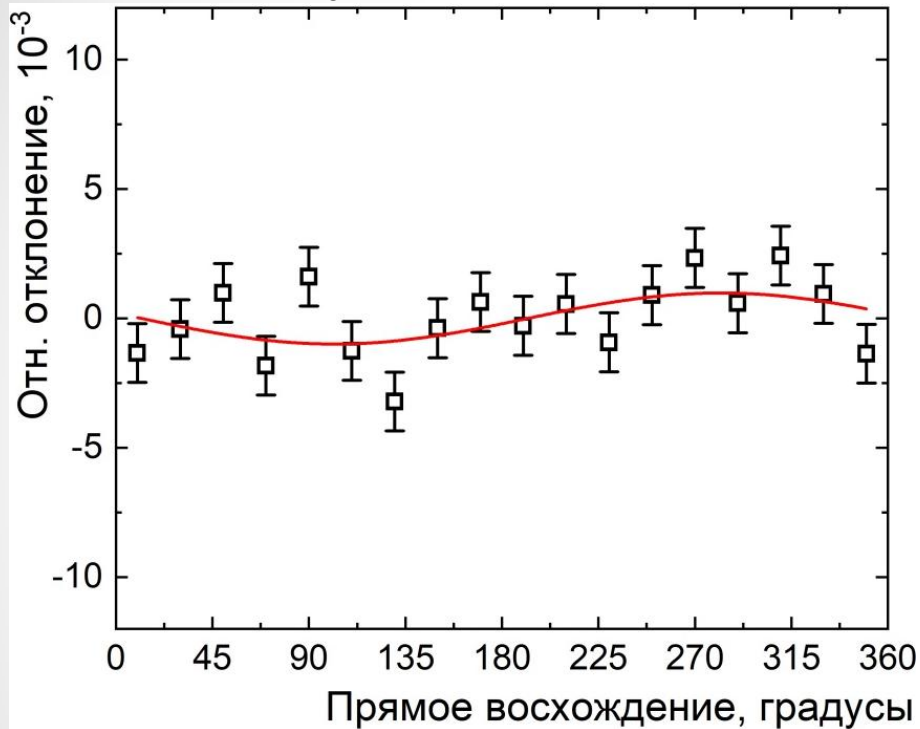
В галактической системе



Анизотропия КЛ

II экваториальная система

$E_0 \sim 1$ ПэВ

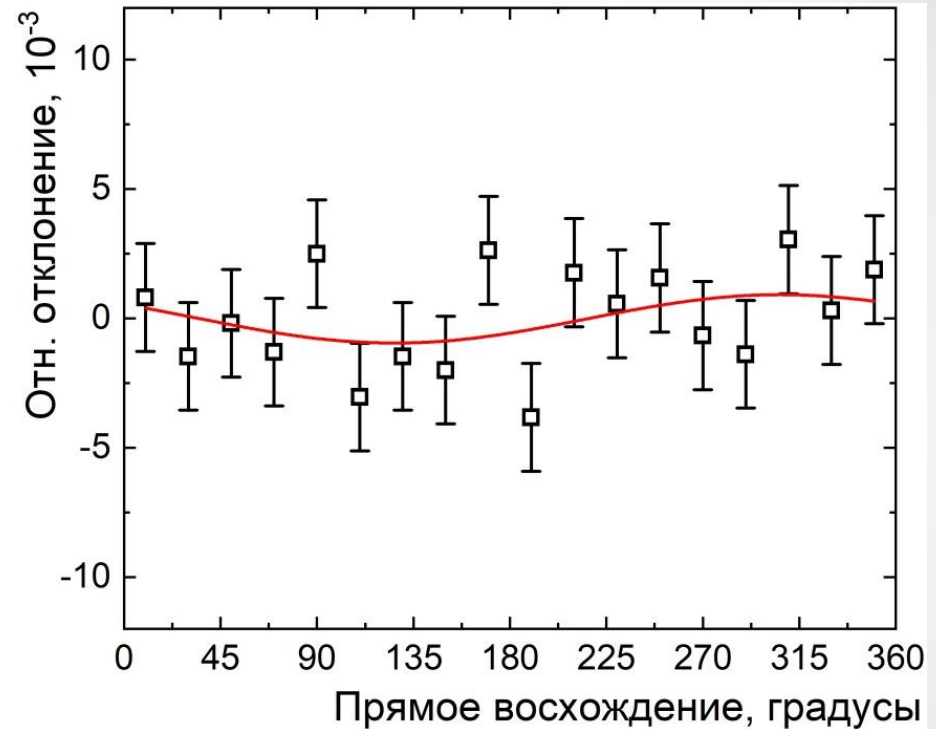


$$A = (1.01 \pm 0.38) \times 10^{-3};$$

$$\Delta\phi = 16^\circ \pm 22^\circ$$

Значимость 2.6σ

$E_0 \sim 5$ ПэВ



$$A = (0.95 \pm 0.69) \times 10^{-3};$$

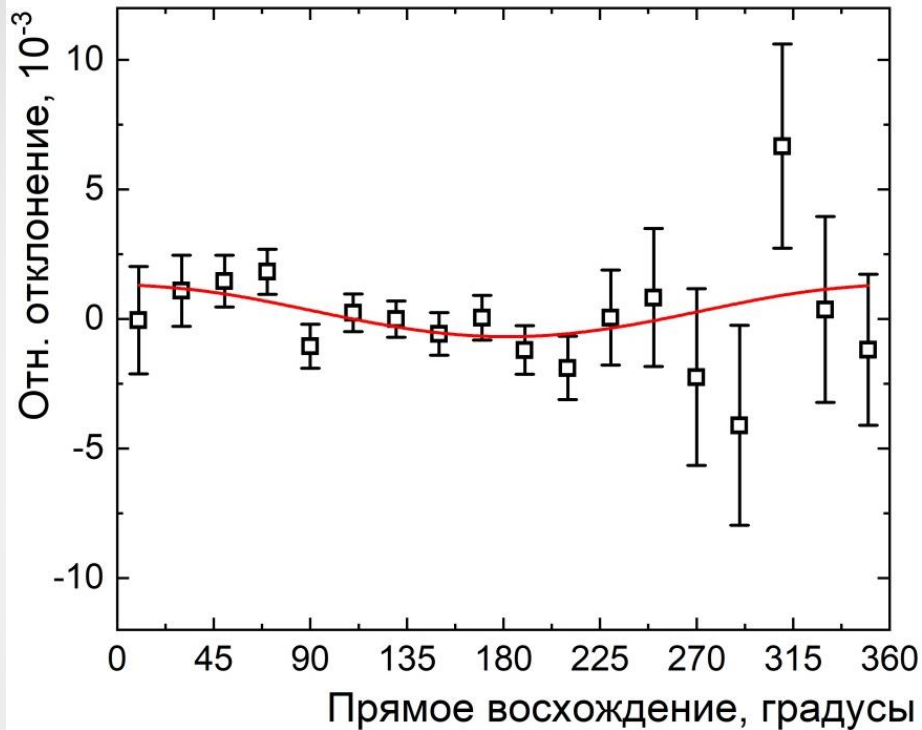
$$\Delta\phi = 40^\circ \pm 42^\circ$$

Значимость 1.4σ

Анизотропия КЛ

галактическая система

$E_0 \sim 1$ ПэВ

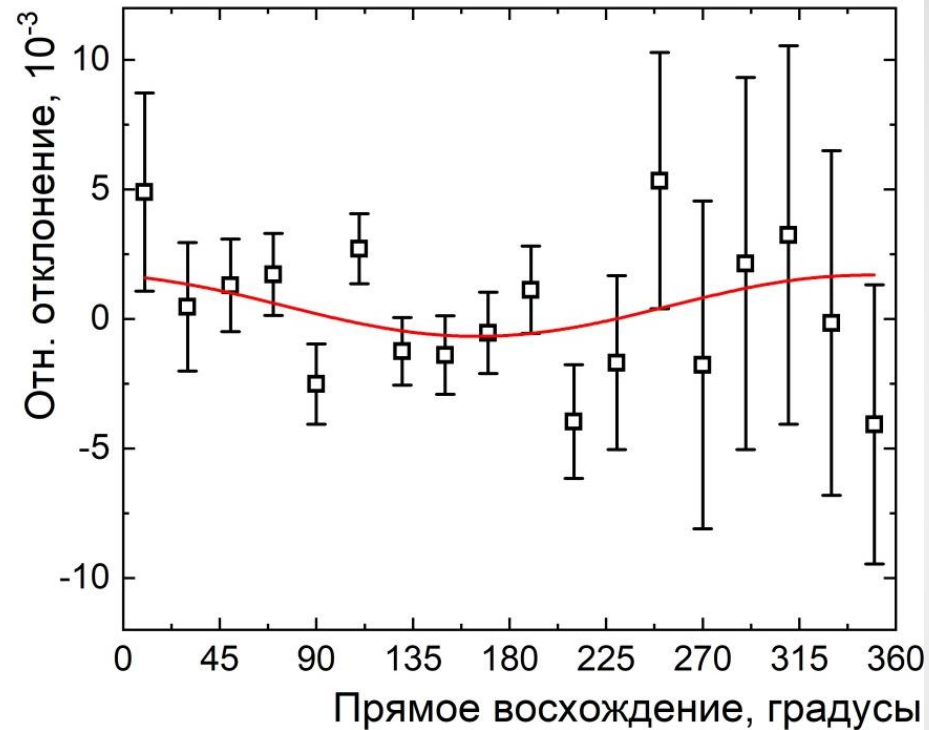


$$A = (1.01 \pm 0.39) \times 10^{-3};$$

$$\Delta\phi = 2^\circ \pm 21^\circ$$

Значимость 2.6σ

$E_0 \sim 5$ ПэВ

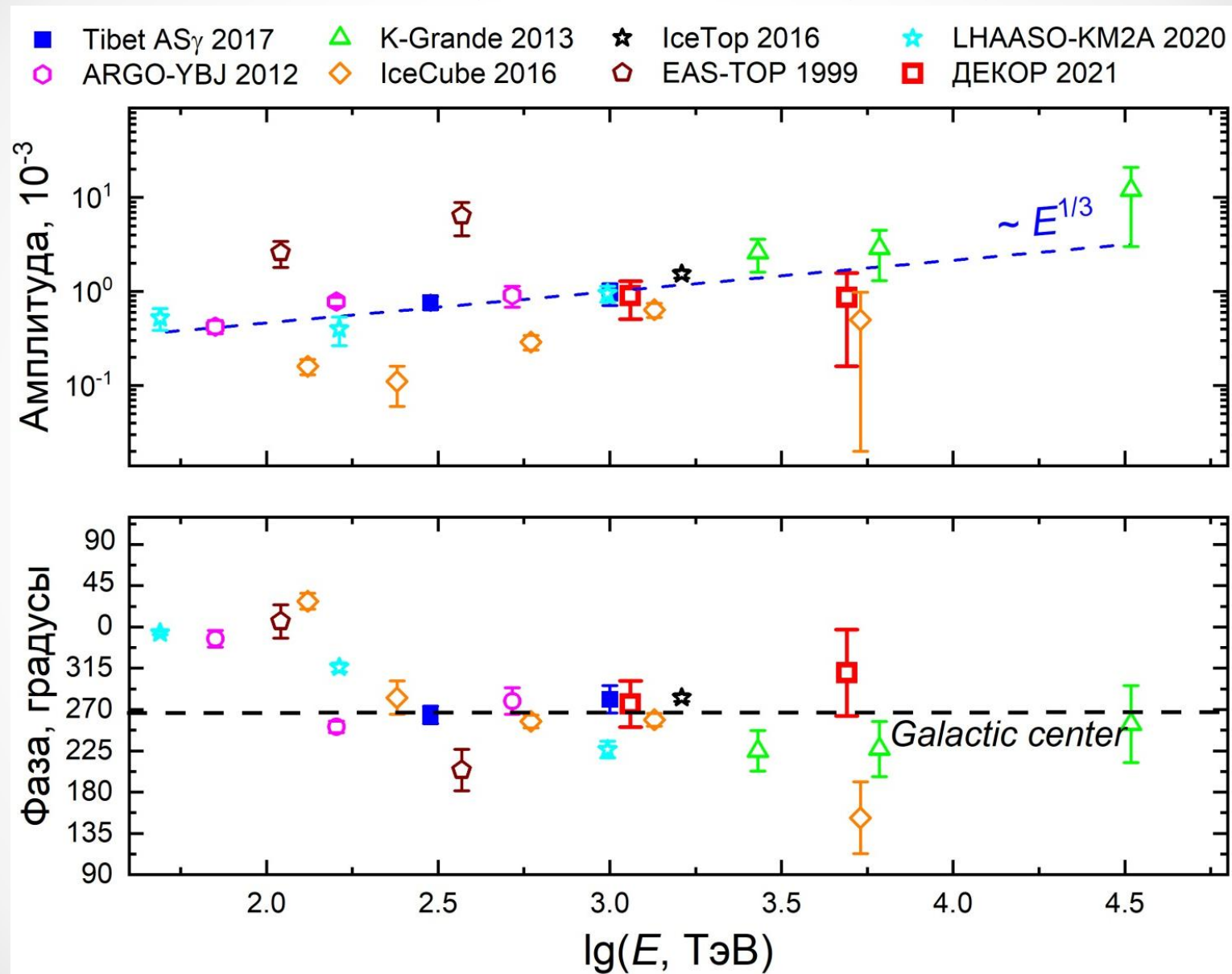


$$A = (1.20 \pm 0.69) \times 10^{-3};$$

$$\Delta\phi = -15^\circ \pm 33^\circ$$

Значимость 1.7σ

Сравнение с результатами других установок



Berezinsky, V. S. 1990, 21st ICRC, Cosmic ray propagation in the Galaxy (Adelaide), 11, 115

Заключение

- Группы мюонов могут использоваться как инструмент для исследования анизотропии КЛ
- Используемый метод коррекции позволяет практически полностью устранить влияние атмосферных эффектов.
- Результат измерения со статистической значимостью 2.6σ указывает на наличие дипольной анизотропии, не противоречит диффузной теории распространения КЛ в Галактике и согласуются с данными других установок.

Спасибо за внимание!!!