

МГУ им. М.В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра физики частиц и космологии

Курсовая работа

Анизотропия массовых компонент космических лучей сверхвысоких энергий по данным эксперимента KASCADE

Работу выполнил:

Шинкевич Егор Максимович

Научный руководитель:

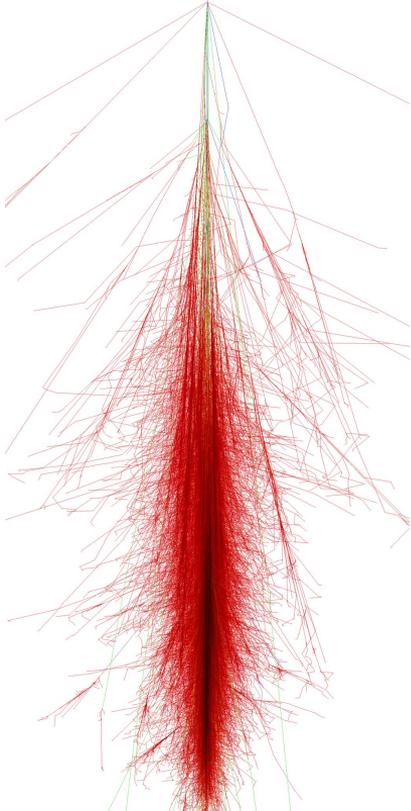
н.с. ИЯИ РАН, к.ф.-м.н.
Кузнецов Михаил Юрьевич

Цель работы:

Анализ анизотропии галактических космических лучей на основе классифицированных по типу первичной частицы данных эксперимента KASCADE с использованием следующих методов:

- Двухточечная автокорреляционная функция;
- Мультипольный анализ;
- Поиск локального превышения над средним.

Широкий атмосферный ливень



ШАЛ от протона

Широкий атмосферный ливень(ШАЛ) – “ливень” вторичных субатомных частиц, образующийся в результате множественных каскадных реакций космических лучей в земной атмосфере.

Космический луч сталкивается с атомным ядром в верхних слоях атмосферы, это столкновение порождает тысячи вторичных частиц. Затем струи этих частиц продолжают сталкиваться с ядрами воздуха и порождают каскад из миллиардов частиц, достигающий поверхности.

Анализируемые данные

KASCADE – эксперимент, проводившийся с 1996 по 2013 год в технологическом институте Карлсруэ, в Германии. Каждое событие содержит следующие параметры ШАЛ:

- Энергия первичной частицы E ;
- Зенитный угол θ ;
- Азимутальный угол ϕ ;
- Позиция ядра ливня x, y ;
- Число электронов N_e ;
- Число мюонов N_μ ;
- Возраст ливня s .

В работе [1] на основе этих параметров с использованием сверточной нейронной сети была получена классификация данных по типу первичной частицы.

В Монте-Карло наборах содержится пять типов первичных частиц: p, He, C, Si, Fe.

Анализ анизотропии в зависимости от типа первичной частицы проводился на основе unblind набора, составляющего 10% классифицированных данных.

Анализируемые данные

Рекомендованные коллаборацией KASCADE ограничения на параметры ШАЛ:

$$\lg(E/\text{эВ}) > 15, \theta < 18^\circ, x^2 + y^2 < 91 \text{ м}^2, \lg(N_e) > 4.8, \lg(N_\mu) > 3.6, 0.2 < s < 1.48.$$

Дополнительные ограничения для достижения полной эффективности детектирования из анализа Монте-Карло наборов в работе [1]:

$$\lg(E/\text{эВ}) > 15.15 \text{ для протонов, } \lg(E/\text{эВ}) > 15.35 \text{ для железа.}$$

В рамках данной работы анализ проводился с самыми жесткими ограничениями, $\lg(E/\text{эВ}) > 15.35$ и $\theta < 18^\circ$, в предположении полной эффективности данных и, соответственно, геометрической относительной экспозицией (спектр по углам $\sim \cos\theta\sin\theta$), зависящей от склонения δ , широты детектора a_0 и максимального зенитного угла θ_m [2]:

$$\omega(\delta) \sim \cos(a_0) \cos(\delta) \sin(\alpha_m) + \alpha_m \sin(a_0) \sin(\delta)$$

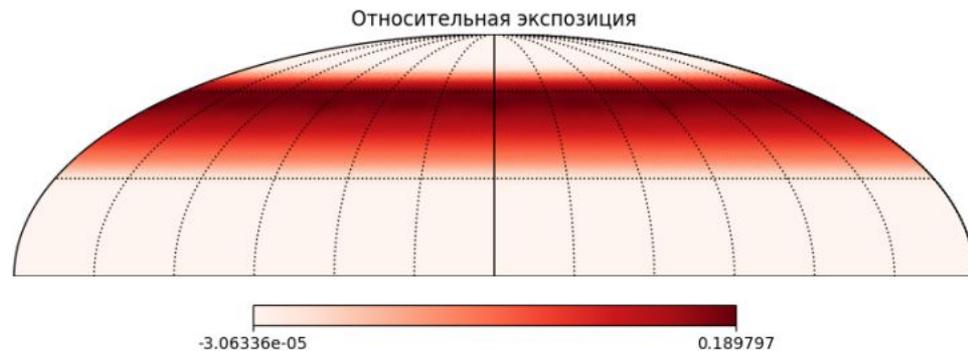
$$\alpha_m = \begin{cases} 0, & \text{если } \xi > 1 \\ \pi, & \text{если } \xi < -1 \\ \arccos(\xi) & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad \xi = \frac{\cos(\theta_m) - \sin(a_0) \sin(\delta)}{\cos(a_0) \cos(\delta)}$$

[1] M. Yu. Kuznetsov, N. A. Petrov, I. A. Plokhikh, and V. V. Sotnikov. Methods of machine learning for the analysis of cosmic rays mass composition with the KASCADE experiment data. JINST, 19(01):P01025, 2024.

[2] P. Sommers. Cosmic ray anisotropy analysis with a full-sky observatory. Astropart. Phys., 14:271–286, 2001.

Анализируемые данные

Монте-Карло наборы, соответствующие изотропному распределению событий по небу, генерировались с помощью карты, соответствующей относительной экспозиции:



Распределение относительной экспозиции по небесной сфере для эксперимента KASCADE в экваториальных координатах.

Анализируемые данные

Всего данных при исследуемых катах: 141064 события.

Из них данных, соответствующих

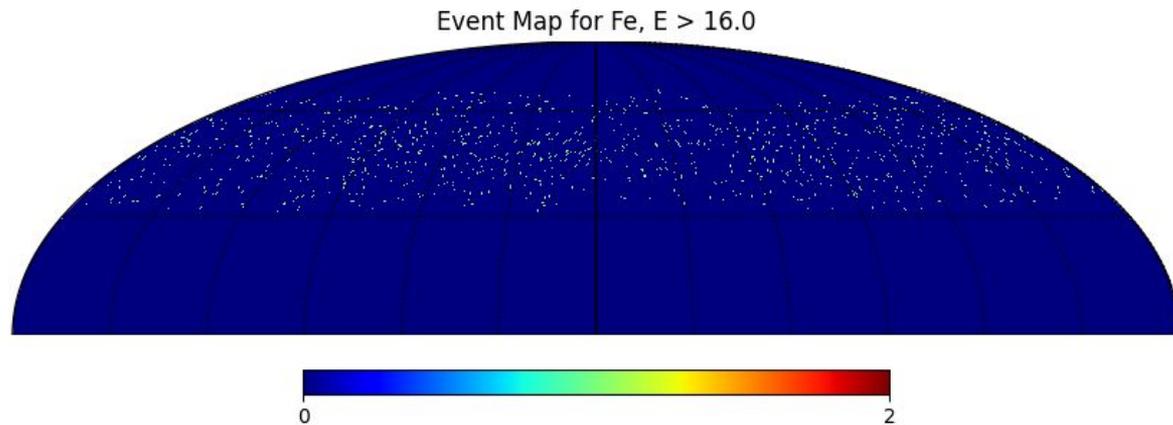
протонам: 48643 события;

гелию: 38273 события;

углероду: 26814 события;

кремнию: 16884 события;

железу: 10450 события.



Карта событий для железа при $\log(E / \text{эВ}) > 16$

Двухточечная корреляционная функция

Наиболее простым инструментом для изучения анизотропии событий по направлению их прибытий является двухточечная корреляционная функция:

$$n(\alpha) = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \Theta(\alpha - \alpha_{ij})$$

где Θ – функция Хевисайда, α_{ij} – угол между событиями i и j .

Эта функция рассчитывалась для набора реальных данных и для сгенерированных методом Монте-Карло наборов. После чего вычислялось *post-trial* p-value как доля тех наборов Монте-Карло, в которых корреляционная функция превышает корреляционную функцию для реального набор данных.

Преимущество метода заключается в чувствительности в тех случаях, когда наблюдается небольшой эксцесс на одном и том же угловом размере, который затем складывается в автокорреляционную функцию.

Проблема метода заключается в его алгоритмической сложности $O(N^2 N_{it})$, где N - число событий в наборе данных, N_{it} – число наборов Монте-Карло, генерируемых для расчета p-value. Ввиду большого числа данных и необходимости получить значительные p-value было использовано довольно простое масштабирование числа пар, ускоряющее расчет в N_{it} раз и имеющее относительную ошибку сравнимую с ошибкой между двумя наборами Монте-Карло.

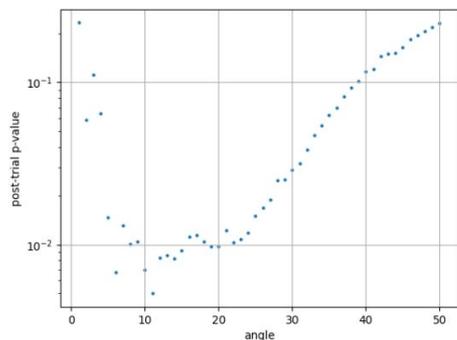
Двухточечная корреляционная функция

Результаты расчетов:

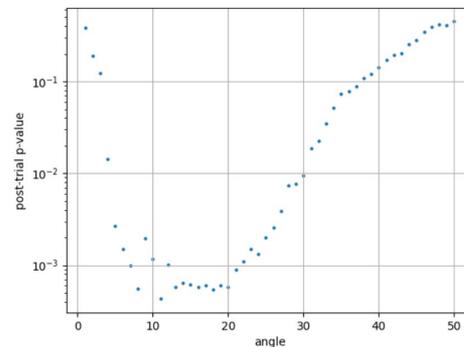
для набора без разделения типов частиц при $E > 10^{16}$ эВ получено post-trial p-value 2.8σ на угловом масштабе 11 градусов;

для железа и кремния при $E > 10^{16}$ эВ получено post-trial p-value 3.5σ на угловом масштабе 11 градусов;

для протонов и гелия значительных значений post-trial p-value найдено не было.



Зависимость post-trial p-value от углового масштаба для всех частиц при энергиях $E > 10^{16}$ эВ.



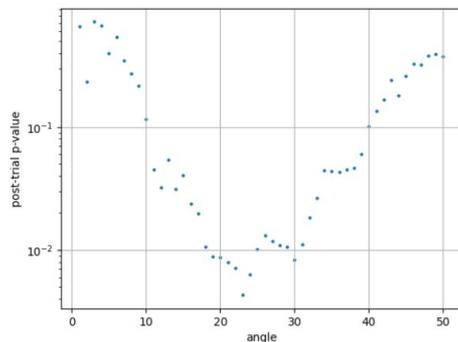
Зависимость post-trial p-value от углового масштаба для железа при энергиях $E > 10^{16}$ эВ.

Двухточечная корреляционная функция

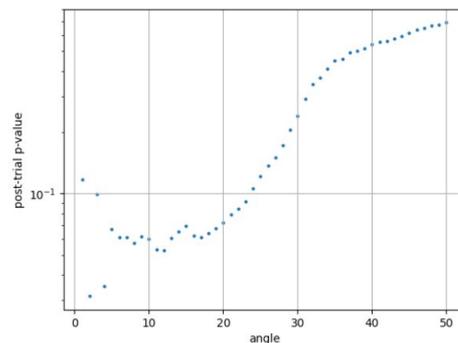
Результаты расчетов:

для углерода при $E > 10^{16.5}$ эВ получено p-value 2.5σ на угловом масштабе 10 градусов;

для ката по магнитной жесткости $R = \rho c/eZ$ при $14 < \lg(R/\text{эВ}) < 14.25$ получено p-value 2.15σ на угловом масштабе 2 градусов;



Зависимость post-trial p-value от углового масштаба для углерода при энергиях $E > 10^{16.5}$ эВ.



Зависимость post-trial p-value от углового масштаба при $14 < \lg(R/\text{эВ}) < 14.25$.

Мультипольный анализ

Этот метод заключается в разложении потока космических лучей по сферическим гармоникам.

В рамках данной задачи наблюдается лишь 19.5% небесной сферы, что приводит к искажению, рассчитываемых значений мультиполей особенно при низких порядках l .

В предположении, что угловое распределение можно приблизить как сумму дельта-функций в направлении каждого события:

$$\frac{dN(\vec{n})}{d\vec{n}} = \sum_i \delta(\vec{n}, \vec{n}_i)$$

А также отделяя эффект, связанный с неоднородностью по направлению из-за геометрических свойств детектора, от эффектов анизотропии, можно записать следующую формулу расчета коэффициентов разложения по сферическим гармоникам:

$$\overline{a_{lm}} = \frac{4\pi f_1}{\Omega} \sum_{i=1}^N \frac{Y_{lm}(\vec{n}_i)}{\omega(\vec{n}_i)}$$

где коэффициент перед суммой определяет наблюдаемую детектором часть небесной сферы, ω – относительная экспозиция.

Мультипольный анализ

В рамках работы анализировался спектр мощности C_l :

$$C_l = \frac{1}{2l + 1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$

Любая существенная анизотропия на масштабе π/l должна быть зафиксирована завышенным значением C_l .

Результаты расчетов:

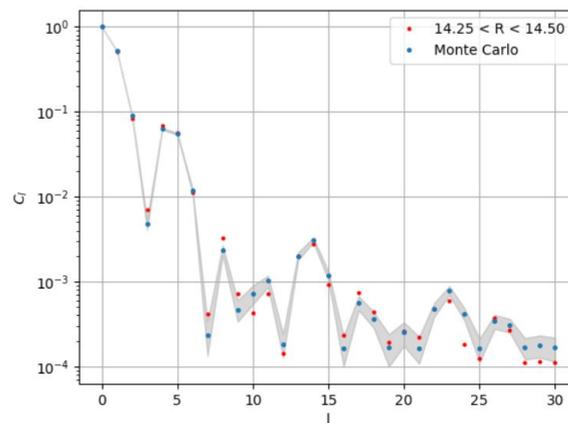
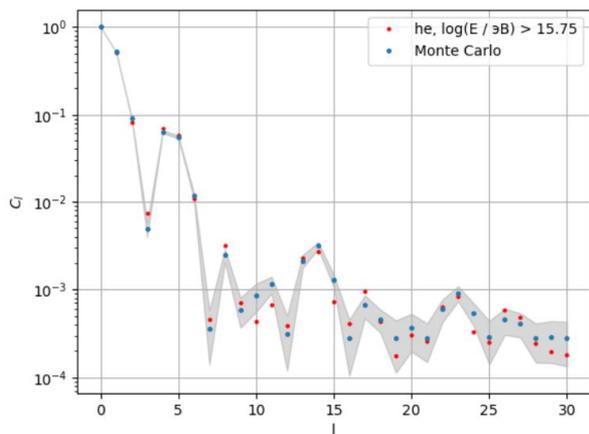
для гелия при $\lg(E/\text{эВ}) > 15.75$ при $l = 17$ и $l = 8$ (угловой масштаб 10.5 градусов и 22.5 градуса) наблюдается отклонение на уровне 1.5σ и 2.5σ ;

для R при $14.25 < \lg(R/\text{эВ}) < 14.50$ при $l = 8$ (угловой масштаб 22.5 градуса) наблюдается отклонение на уровне 2.5σ ;

для всех остальных типов частиц значительных отклонений в области видимости детектора таким методом обнаружено не было.

Мультипольный анализ

Результаты расчетов:



Зависимость спектра мощности C_l от порядка мультиполя l для гелия при $\lg(E/\text{эВ}) > 15.75$.

Зависимость спектра мощности C_l от порядка мультиполя l при $14.25 < \lg(R/\text{эВ}) < 14.50$.

Серые области на графиках отвечают отклонению спектра мощности для Монте-Карло наборов от среднего.

Поиск локального превышения над средним

Этот метод заключается в прохождении круговым окном с определенным радиусом по небесной сфере с целью поиска избыточной плотности в данном окне. Вероятность наблюдаемого количества событий в данном окне вычисляется на основе распределения Пуассона путем оценки ожидаемого числа событий с помощью сгенерированных методом Монте-Карло наборов данных. Однако вычисленная таким образом значимость будет носить характер pre-trial p-value, так как она “страдает” от многочисленных проведенных испытаний. Для получения post-trial p-value необходимо “штрафовать” найденное значение вероятности за различные сканирования, выполненные с конкретными параметрами.

Оценить post-trial p-value можно следующим образом

$$p_{\text{post_trial}} = 1 - (1 - p_{\text{pre_trial}})^{N_{\text{trial}}}$$

где N_{trial} определяется как $\Omega_{\text{FOV}}/\Omega_{\text{bin}}$.

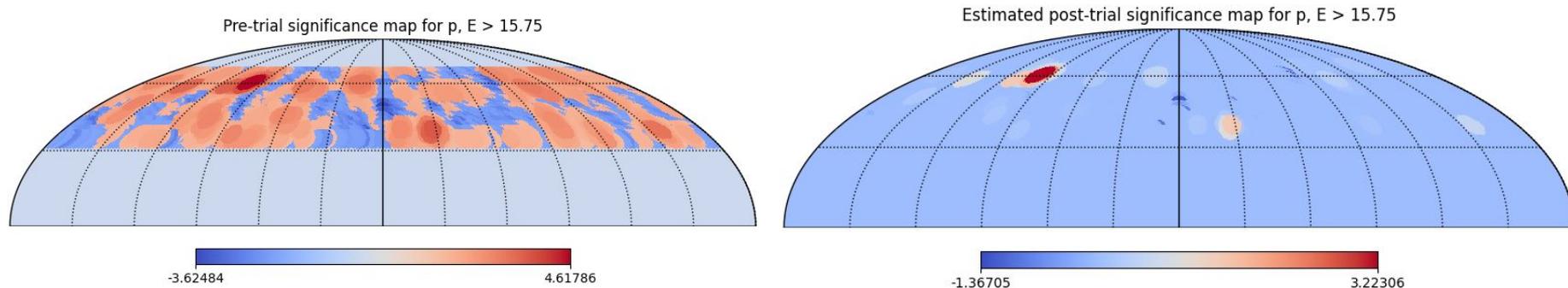
Сканирование проводилось с окнами размером 8, 10, 12 и 20 градусов, так что с учетом вариации размера окна итоговый $N_{\text{trial}} = 4\Omega_{\text{FOV}}/\Omega_{\text{bin}}$.

Поиск локального превышения над средним

Результаты расчетов:

Для всех типов частиц были найдены превышения с post-trial уровнем значимости от 2.5 до 3.4.

Карты pre-trial значимости и приближенной post-trial значимости для протонов при $\lg(E/\text{эВ}) > 15.75$ и угловым размером окна 8 градусов:

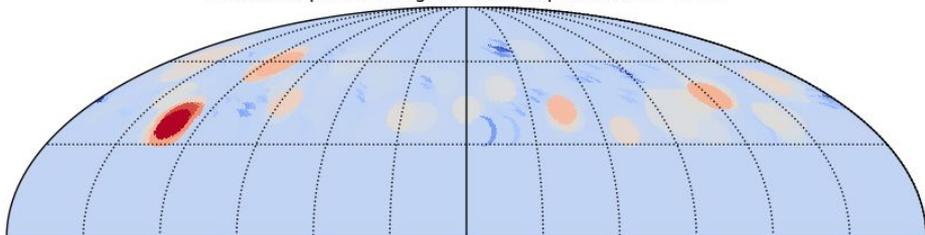


Поиск локального превышения над средним

Результаты расчетов:

Карты приближенной post-trial значимости для гелия и углерода при $\lg(E/\text{эВ}) > 15.35$ и угловым размером окна 10 и 8 градусов, соответственно :

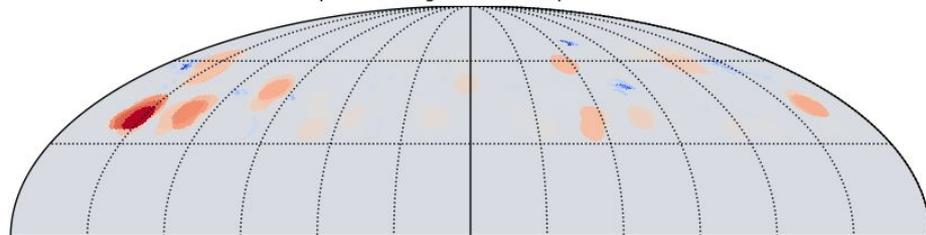
Estimated post-trial significance map for he, $E > 15.35$



-2.03419

2.93014

Estimated post-trial significance map for c, $E > 15.35$



-2.67071

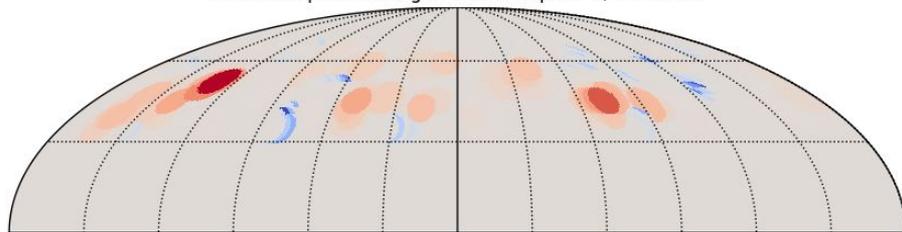
2.8577

Поиск локального превышения над средним

Результаты расчетов:

Карты приближенной post-trial значимости для кремния при $\lg(E/\text{эВ}) > 15.35$ и железа при $\lg(E/\text{эВ}) > 16$ и угловом размером окна 10 градусов:

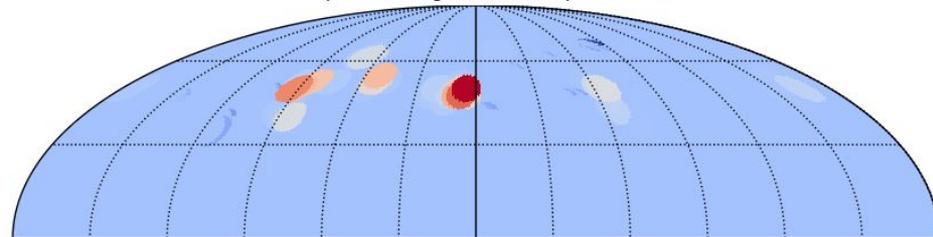
Estimated post-trial significance map for si, $E > 15.35$



-2.38879

2.24456

Estimated post-trial significance map for fe, $E > 16.0$



-0.85263

1.8228

Обсуждение результатов

Несложно заметить, что каждый из методов дает отличающиеся друг от друга результаты. На это есть следующие возможные причины:

- Чувствительность методов к разного рода эксцессам. Например, метод парной автокорреляционной функции фактически обладает накопительным эффектом на заданном угловом масштабе, что отличает его от метода поиска локальных превышений.
- Отличие результатов мультипольного анализа от результатов остальных методов может быть объяснено искажением спектра мощности ввиду неполного покрытия небесной сферы.
- Метод парной автокорреляционной функции имеет большую чувствительность к оценке фона. Эта особенность метода может приводить к искажению результата в случае даже относительно небольшого отличия экспозиции детектора от геометрического распределения.

Дальнейшие исследования

В дальнейшем исследовании анизотропии галактических космических лучей предлагается отойти от предположения геометричности экспозиции, и вычислять её на основе измеренных данных, например, методом time-scrambling'a.

- Во-первых, это потенциально может улучшить точность метода парной автокорреляционной функции.
- Во-вторых, такой подход позволит распространить применяемые методы на большее количество данных за счет учета более низких энергий, которые не имеют геометрическую относительную экспозицию.
- В-третьих, позволит расширить рассматриваемую область небесной сферы благодаря более свободному ограничению по зенитному углу $\theta < 30^\circ$.