

Моделирование и анализ широких атмосферных ливней методом моделирования CORSIKA

Филиппов Владимир

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (Алматинский филиал)

Декабрь 2025



Научный руководитель: PhD. Садуев Н. О.

Научный консультант: Ережеп Н. О.

Содержание презентации

- 1 Цели и задачи
- 2 Широкие атмосферные ливни
- 3 Описание среды моделирования CORSIKA
- 4 Моделирование широких атмосферных ливней
 - Настройка среды CORSIKA
 - Число рождаемых вторичных частиц
- 5 Анализ данных
 - Анализ данных
- 6 Заключение

Цель работы: исследовать процессы формирования и развития широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Для достижения цели поставлены задачи:

- изучить природу ШАЛ и их компоненты;
- освоить программный комплекс CORSIKA;
- провести моделирование ШАЛ для разных первичных частиц и энергий;
- проанализировать полученные результаты.

Возникновение широких атмосферных ливней

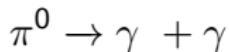
Космические лучи представляют собой поток ядер атомов, зарождающихся и ускоряющихся до высоких энергий в астрофизических объектах и межзвездном пространстве. Энергии частиц достигают 10^{21} эВ

При взаимодействии с атмосферой космические лучи создают каскад вторичных частиц — широкий атмосферный ливень.

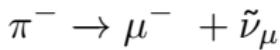
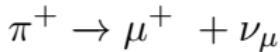
Широкий атмосферный ливень

Вторичные частицы в широких атмосферных ливнях делят на три компоненты:

- **Электрон-фотонная компонента.** В основном рождается как следствие распада π^0 мезона.



- **Мюонная компонента.** В основном рождается как следствие распада заряженных π^\pm мезонов.



- **Адронная компонента.** Рождается как следствие адронных взаимодействий первичной частицы и вторичных адронов с ядрами атмосферы.

Широкий атмосферный ливень



Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой;

Панасюк М.И. "Странники Вселенной или эхо Большого взрыва"

Среда моделирования CORSIKA

CORSIKA (COsmic Ray Simulations for KAscade) — программный комплекс для моделирования ШАЛ, основанный на методе Монте-Карло.

Программа позволяет моделировать ливни, вызванные различными первичными частицами: протоны, ядра до $Z = 26$, фотонами и др., с энергиями до $E = 10^{20}$ эВ.

Настройка среды CORSIKA

Для запуска моделирования необходимо подготовить входной файл с характеристиками первичной частицы:

- тип частицы;
- энергия;
- полярный и азимутальный углы падения.

В данной работе моделируются три типа частиц: p , $^{12}_6C$, $^{56}_{26}Fe$, с энергиями 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} эВ.

Полярный угол фиксирован: 0° , азимутальный угол — произвольный.

Параметры точки наблюдения соответствуют географическому положению Тянь-Шанской высокогорной научной станции (ТШВНС) — комплексу установок для детектирования ШАЛ, расположенному в горах Заилийского Алатау в 50 км от Алматы на высоте 3340 м над уровнем моря.

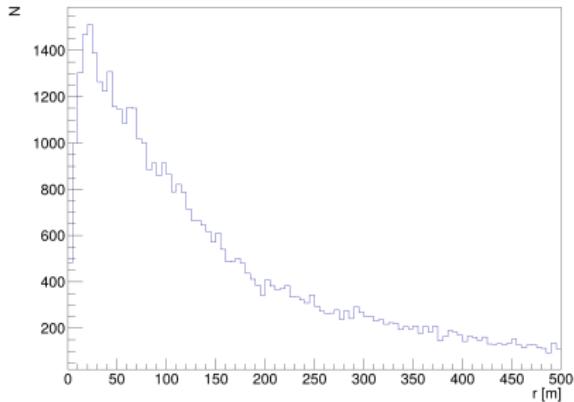
Число рождаемых вторичных частиц

| E_0 , эВ | Частица | Seed | Количество вторичных частиц | | | | |
|------------|----------------|--------------|-----------------------------|------------|--------|---------|-----------|
| | | | N_Σ | N_γ | N_e | N_μ | N_{had} |
| 10^{13} | p | 1 0 0; 1 0 0 | 12549 | 10422 | 1906 | 204 | 17 |
| | $^{12}_6C$ | 2 0 0; 2 0 0 | 4848 | 3944 | 624 | 260 | 20 |
| | $^{56}_{26}Fe$ | 3 0 0; 3 0 0 | 3309 | 2539 | 408 | 318 | 44 |
| 10^{14} | p | 2 1 0; 1 0 0 | 235936 | 186838 | 46589 | 1964 | 545 |
| | $^{12}_6C$ | 3 2 1; 2 0 0 | 146084 | 120515 | 23271 | 2077 | 221 |
| | $^{56}_{26}Fe$ | 4 3 2; 3 0 0 | 67844 | 54838 | 10497 | 2317 | 192 |
| 10^{15} | p | 3 2 1; 1 0 0 | 2818714 | 2301317 | 500326 | 14558 | 2513 |
| | $^{12}_6C$ | 4 3 2; 2 0 0 | 1510042 | 1239866 | 252394 | 15638 | 2144 |
| | $^{56}_{26}Fe$ | 5 4 3; 3 0 0 | 1353732 | 1111861 | 221674 | 18054 | 2143 |

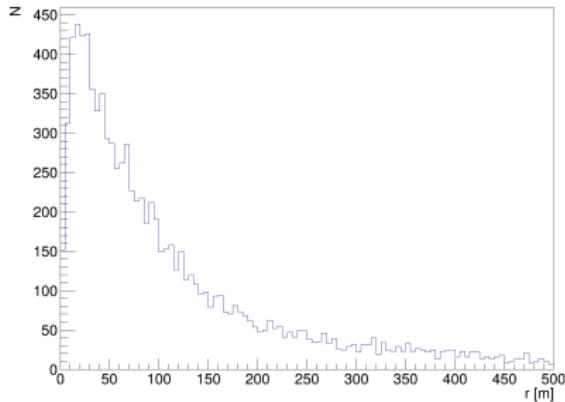
Таблица 1 — результаты моделирования зависимости числа вторичных частиц от типа и энергии первичной частицы

Радиальные распределения частиц: Фотоны и Электроны

Построены распределения для первичного ядра $^{56}_{26}\text{Fe}$, $E = 10^{14}$ эВ.

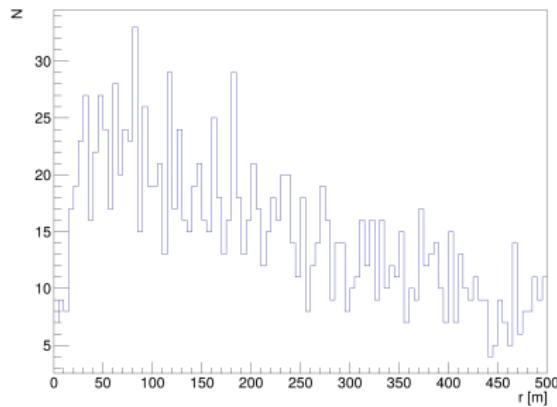


Фотоны: радиальное распределение, N vs.
 r [м].

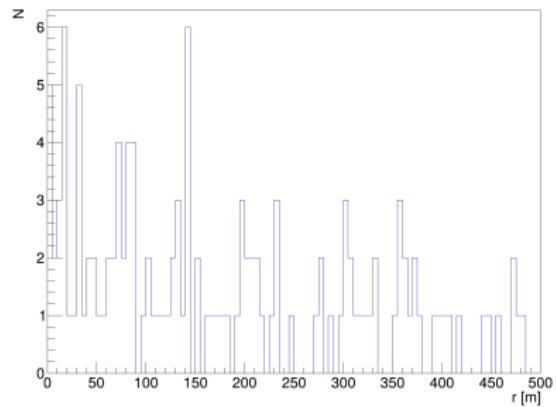


Электроны: радиальное распределение, N
vs. r [м].

Радиальные распределения частиц: Мюоны и Адроны

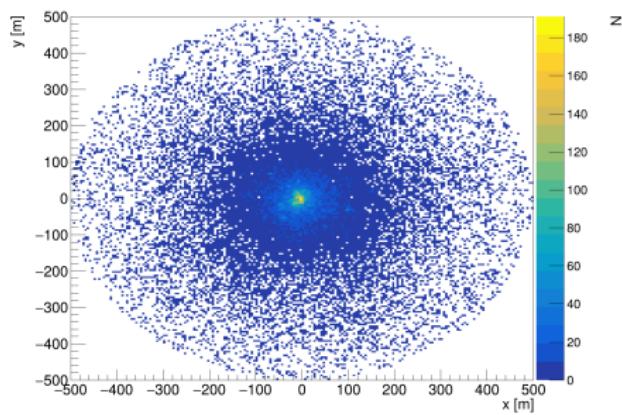


Мюоны: радиальное распределение, N vs. r [м].

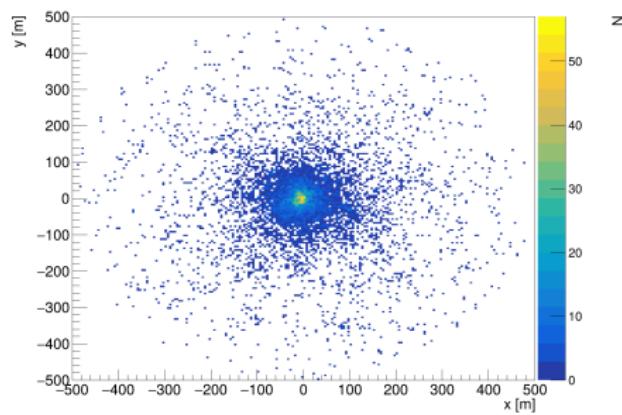


Адроны: радиальное распределение, N vs. r [м].

Распределение частиц на плоскости XY: Фотоны и Электроны

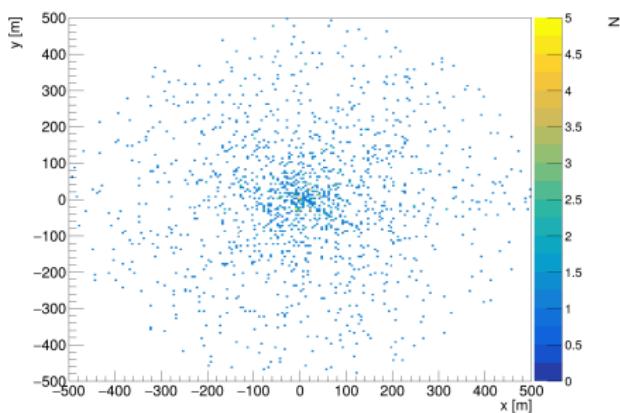


Фотоны: распределение частиц на XY [м].

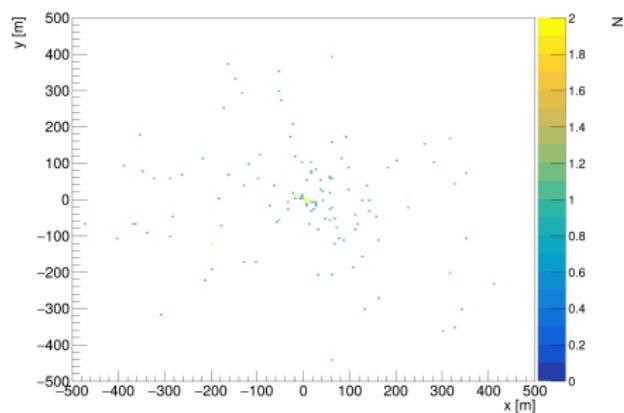


Электроны: распределение частиц на XY [м].

Распределение частиц на плоскости XY: Мюоны и Адроны

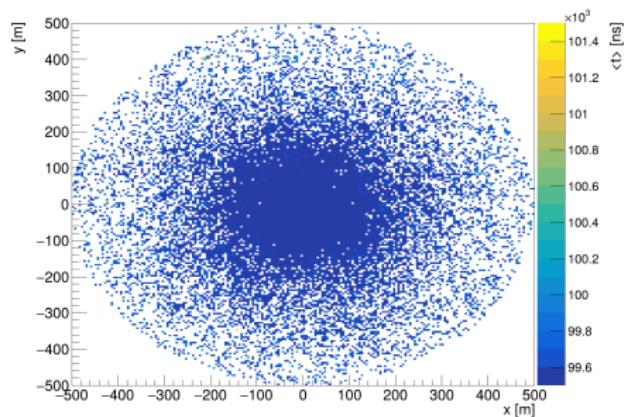


Мюоны: распределение частиц на XY [м].

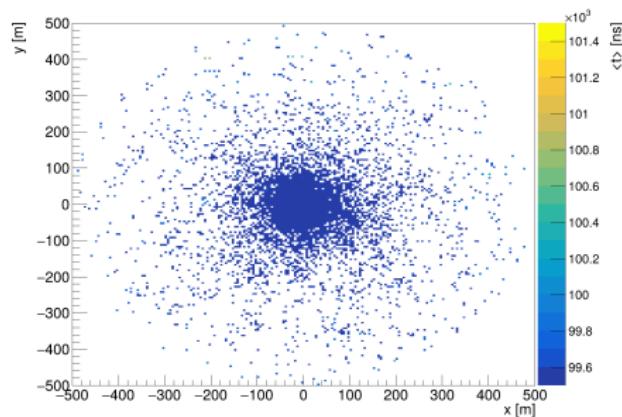


Адроны: распределение частиц на XY [м].

Карты времени прихода частиц: Фотоны и Электроны

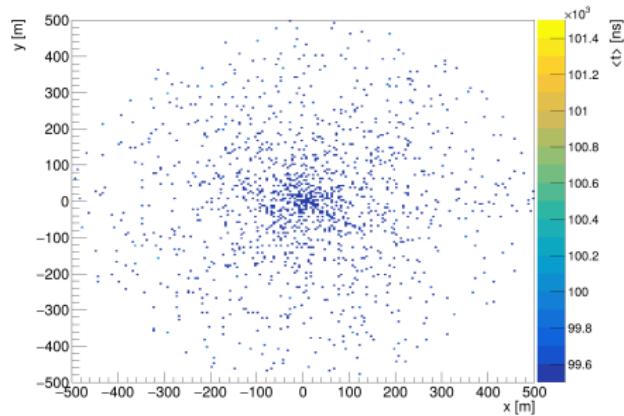


Фотоны: карта времени прихода $\langle t \rangle$ [нс].

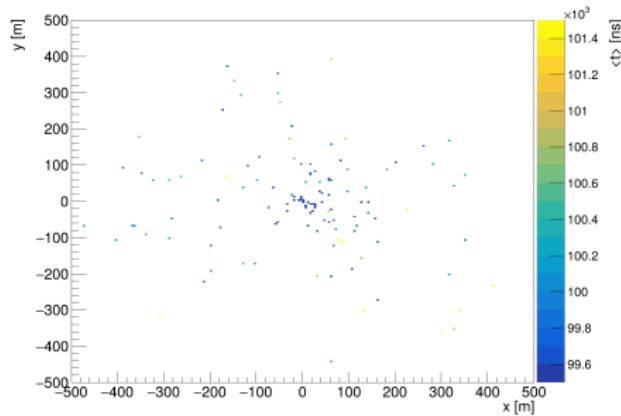


Электроны: карта времени прихода $\langle t \rangle$ [нс].

Карты времени прихода частиц: Мюоны и Адроны



Мюоны: карта времени прихода $\langle t \rangle$ [нс].



Адроны: карта времени прихода $\langle t \rangle$ [нс].

- Увеличение энергии E_0 приводит к росту всех компонент ливня, особенно электрон-фотонной.
- При увеличении массового числа первичной частицы ливень развивается раньше, а его максимум находится выше в атмосфере. Это приводит к уменьшению числа частиц на уровне наблюдения. Такое поведение физически обусловлено более коротким пробегом и большей вероятностью взаимодействия тяжёлых ядер.
- Электрон-фотонная компонента растёт быстрее и доминирует в числе частиц, потому что электромагнитные взаимодействия порождают каскадное размножение γ и e^-/e^+ , что делает эту компоненту «мягкой» и многочисленной. Адронная и мюонная компоненты формируются из распадов π и K , имея меньшее количество частиц.

Заключение

- Смоделированы широкие атмосферные ливни для первичных частиц: p , $^{12}_{\text{6}}C$, $^{56}_{\text{26}}Fe$ при энергиях 10^{13} – 10^{15} эВ.
- Результаты моделирования подтверждают:
 - увеличение числа вторичных частиц с ростом энергии,
 - влияние типа первичной частицы на распределение компонент,
 - зависимость высоты развития ШАЛа от типа первичной частицы
- Работа показывает как энергия и состав первичной частицы определяют структуру ШАЛ и распределение вторичных частиц на уровне наблюдения.