

# 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 межзвёздном 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  $\pi^0$  мезона.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

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

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

- **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"

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  $Z = 26$ , фотоны 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:  $p$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ , с энергиями  $10^{13}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$  эВ.

Полярный угол фиксирован:  $0^\circ$ , 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.



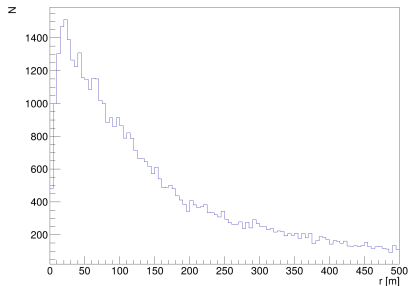
# Число рождаемых вторичных частиц

$E_0$ , эВ	Частица	Seed	Количество вторичных частиц				
			$N_\Sigma$	$N_\gamma$	$N_e$	$N_\mu$	$N_{\text{had}}$
$10^{13}$	p	1 0 0; 1 0 0	12549	10422	1906	204	17
	$^{12}_6\text{C}$	2 0 0; 2 0 0	4848	3944	624	260	20
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	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
	$^{12}_6\text{C}$	3 2 1; 2 0 0	146084	120515	23271	2077	221
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	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
	$^{12}_6\text{C}$	4 3 2; 2 0 0	1510042	1239866	252394	15638	2144
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	5 4 3; 3 0 0	1353732	1111861	221674	18054	2143

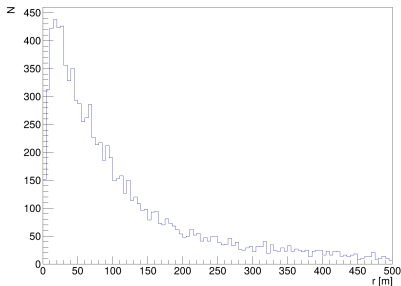
Таблица 1 — результаты моделирования зависимости числа вторичных частиц от типа и энергии первичной частицы

# Радиальные распределения частиц: Фотоны и Электроны

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

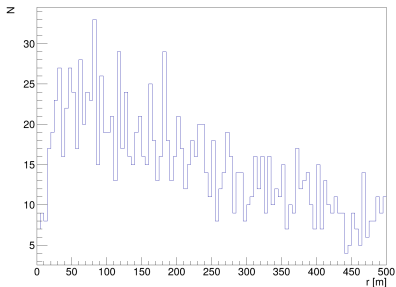


Фотоны: радиальное распределение,  $N$  vs.  $r$  [м].

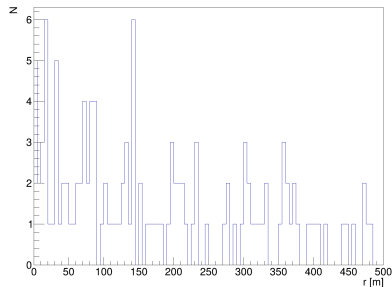


Электроны: радиальное распределение,  $N$  vs.  $r$  [м].

# Радиальные распределения частиц: Мюоны и Адроны

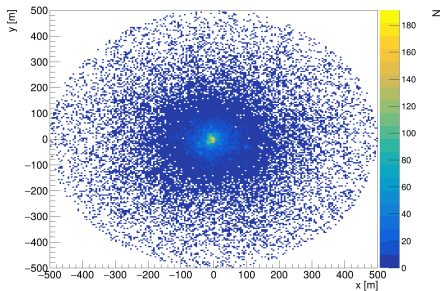


Мюоны: радиальное распределение,  $N$  vs.  $r$  [м].

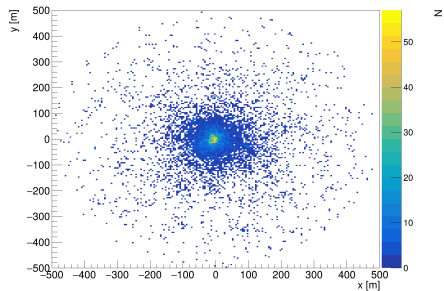


Адроны: радиальное распределение,  $N$  vs.  $r$  [м].

# Распределение частиц на плоскости XY: Фотоны и Электроны

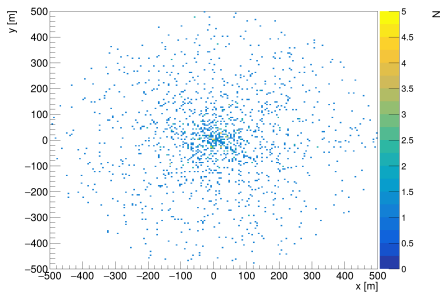


Фотоны: распределение частиц на XY [м].

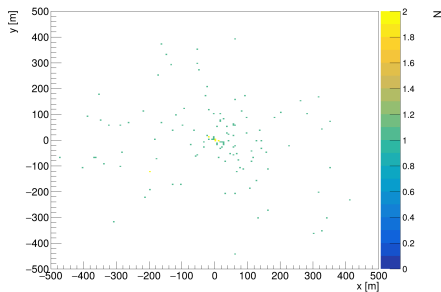


Электроны: распределение частиц на XY [м].

# Распределение частиц на плоскости XY: Мюоны и Адроны

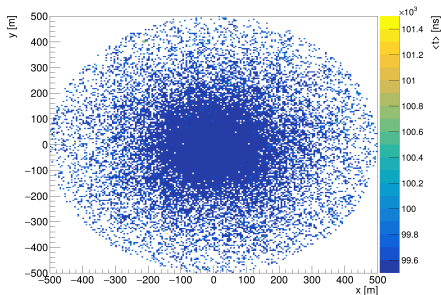


Мюоны: распределение частиц на XY [м].

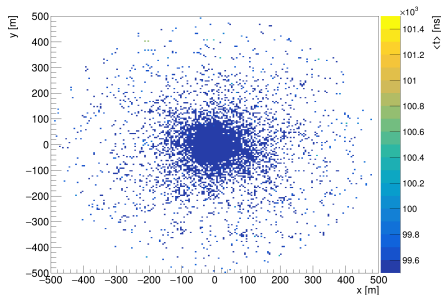


Адроны: распределение частиц на XY [м].

# Карты времени прихода частиц: Фотоны и Электроны

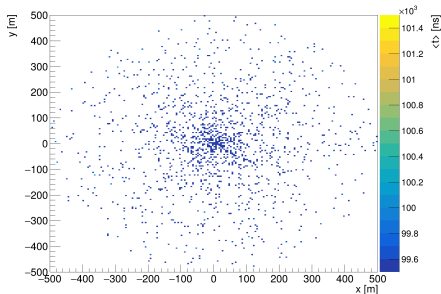


Фотоны: карта времени прихода  $\langle t \rangle$  [нс].

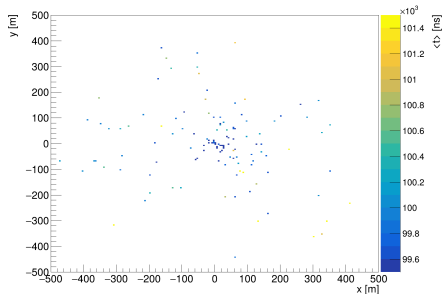


Электроны: карта времени прихода  $\langle t \rangle$  [нс].

# 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  $\gamma$  и  $e^-/e^+$ , что делает эту компоненту «мягкой» и многочисленной. Адронная и мюонная компоненты формируются из распадов  $\pi$  и  $K$ , имея меньшее количество частиц.



- Смоделированы широкие атмосферные ливни для первичных частиц:  $p$ ,  $^{12}_6C$ ,  $^{56}_{26}Fe$  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.