

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
АЛМАТИНСКИЙ ФИЛИАЛ НИЯУ МИФИ

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Моделирование и анализ распределения частиц
в широких атмосферных ливнях**

Научный руководитель _____ Н. О. Садуев

Научный консультант _____ А. Е. Бакораз

Студент _____ К. А. Воробьева

Алматы 2024

Содержание

1	Теоритические сведения	2
1.1	Космические лучи и ШАЛ	2
1.2	Запаздывающие частицы	2
1.3	Экспериментальная установка	3
2	Цели и задачи	4
3	Процесс моделирования	5
4	Анализ	11
5	Заключение	12
	Список литературы	12

1 Теоритические сведения

1.1 Космические лучи и ШАЛ

Космические лучи- это быстрые заряженные частицы космического происхождения. Протоны составляют около 90 % от всех первичных космических лучей, на долю ядер гелия приходится приблизительно 10 % потока и, наконец, поток всех остальных ядер составляет только порядка 1 % от полного потока [1]. В истории исследования космических лучей (КЛ), которая насчитывает почти 100 лет, важным событием стало открытие явления, связанного с их взаимодействием с земной атмосферой. Когда частицы КЛ, путешествуя по космосу, вступают в атмосферу, они взаимодействуют с атомами воздуха. Современные представления о процессе этого взаимодействия следующие: из-за ядерных и электромагнитных взаимодействий в верхних слоях атмосферы начинается лавинообразное развитие потока вторичных частиц, в основном электронов и мюонов, а также электромагнитного излучения, связанного с этим процессом. Такие потоки, которые называют широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), достигают значительных размеров в глубине атмосферы. Например, частицы с энергией выше 10^{18} эВ создают ливни, в которых вблизи поверхности Земли содержится более 10^9 заряженных частиц, падающих практически одновременно на несколько квадратных километров. Ливень выглядит как плоский и тонкий диск, состоящий из частиц, движущихся через атмосферу с почти световой скоростью. Плоскость диска перпендикулярна направлению движения частицы, вызвавшей данный ливень, а траектория его центра продолжает это направление. В случае вертикальных ШАЛ все частицы ливня достигают поверхности Земли одновременно. Это стало важным условием для регистрации частиц, принадлежащих одному ливневому событию, и открыло явление ШАЛ в космических лучах. Для этого нужно было разнести счетчики частиц и настроить их на совпадение. Подобные эксперименты впервые в 1938 году провел французский ученый Пьер Оже, и вначале эти ливни назывались "ливнями Оже". Это открытие стало возможным благодаря пионерским работам в исследовании КЛ, выполненным в Италии группой Б.Росси и в России под руководством Д.В.Скобельцына в 20-е и 30-е годы прошлого века[2].

1.2 Запаздывающие частицы

Частицы ШАЛ образуются при взаимодействии космических лучей с атмосферой и движутся в виде компактной группы частиц, образуя диск, ось

которого совпадает с направлением первичной частицы, а скорость частиц близка к скорости света. С увеличением расстояния от оси диск становится толще, но на расстояниях менее 200 м его толщина не превышает нескольких метров. Временные интервалы между частицами, достигшими уровня наблюдения, составляют десятки наносекунд. Если в ШАЛ появляются запаздывающие частицы, они отстают от диска, и их сигналы можно зарегистрировать при исследовании временных распределений частиц.

Исследования запаздывающих частиц ведутся уже более 50 лет, однако четкого понимания их природы до сих пор нет. Интерес к этим исследованиям возник в контексте поиска новых тяжелых долгоживущих частиц. При изучении ШАЛ были зафиксированы запаздывающие частицы, и выдвигались две основные гипотезы. Согласно первой, запаздывающие частицы могут быть новыми тяжелыми долгоживущими частицами, которые отстают из-за своей массы. Вторая гипотеза предполагает, что это могут быть нерелятивистские протоны и нейтроны или мюоны с низкими энергиями, которые отстают из-за своих малых энергий.

Хотя на ускорителях не были обнаружены новые тяжелые долгоживущие частицы, которые могли бы объяснить запаздывающие частицы, вопрос остается открытым, так как источник этих частиц до сих пор не установлен. На ускорителях исследовали взаимодействия определенных пар частиц до энергий 10^{13} эВ в системе центра масс с помощью аппарата, настроенного на поиск конкретных типов взаимодействий одинаковых частиц. В то время как при изучении космических лучей можно исследовать взаимодействия частиц до энергий 10^{20} эВ в лабораторных системах координат. Это позволяет наблюдать взаимодействия различных частиц в естественной среде, такой как атмосфера Земли или космическое пространство. Поскольку ускорителей, способных разгонять частицы до таких экстремальных энергий, не существует, изучение взаимодействий частиц в космических лучах продолжает оставаться важным и интересным направлением науки.

1.3 Экспериментальная установка

Для регистрации запаздывающих частиц необходимо создать быстрые временные детекторы заряженных частиц с временем разрешения 5-6 нс. Разработкой такого детектора[4] занимаются в Тянь-Шанской Высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС), расположенной на высоте 3340 м. над уровнем моря. Выбор горной местности для размещения установок обусловлен несколькими факторами. Во-первых, на больших высотах плотность воздуха значительно ниже, что уменьшает влияние космического и наземного фоно-

вого излучения. Это обеспечивает более чистый сигнал, позволяя регистрировать только те частицы, которые формируются в процессе развития ливня. Во-вторых, высота около 3 километров идеально подходит для регистрации максимального числа вторичных частиц, таких как мюоны, электроны и гамма-кванты, поскольку именно на этом уровне их плотность наиболее высокая.

Детекторная система состоит из пяти сцинтилляционных детекторов [Рис. 1] пирамидальной формы с размерами 500 мм × 500 мм [Рис. 2]. Для регистрации световых импульсов используется фотоумножитель Hamamatsu R7723, который работает при напряжении питания 1700 В и обеспечивает усиление порядка 10^6 . Спектральная чувствительность фотомножителя охватывает диапазон от 300 до 650 нм, с максимальной чувствительностью на длине волны 420 нм. Диаметр трубки составляет 51 мм. Для регистрации сигналов используются два аналого-цифровых преобразователя (АЦП) Caen DT5720. Эти устройства обеспечивают частоту дискретизации 250 Мс/с, что достаточно для регистрации сигналов от фотомножителя с типичной длиной 20-30 нс. Использование двух АЦП DT5720 позволяет регистрировать сигналы с 8 каналов. Синхронизация системы производится с помощью внешнего сигнала от установки для детектирования ШАЛ. Полученные данные сохраняются на ПК для последующей обработки и анализа.

2 Цели и задачи

Целью данной работы является моделирование распределения частиц в широких атмосферных ливнях с использованием программы CORSIKA. Результаты моделирования помогут:

- оптимизировать геометрию и параметры сцинтилляционных детекторов;
- скорректировать алгоритмы синхронизации и сбора данных с нескольких детекторов.
- улучшить временную разрешающую способность и точность определения углов прихода частиц.

Для выполнения этих целей были выполнены следующие задачи:

- изучена структура и принцип работы широких атмосферных ливней (ШАЛ), а также методы их моделирования;
- установка программы CORSIKA для моделирования ШАЛ дистрибутиве Linux Ubuntu;
- изучен функционал программы CORSIKA, а также освоены методы анализа данных, полученных в результате моделирования;
- провести моделирование распределения частиц в ШАЛ

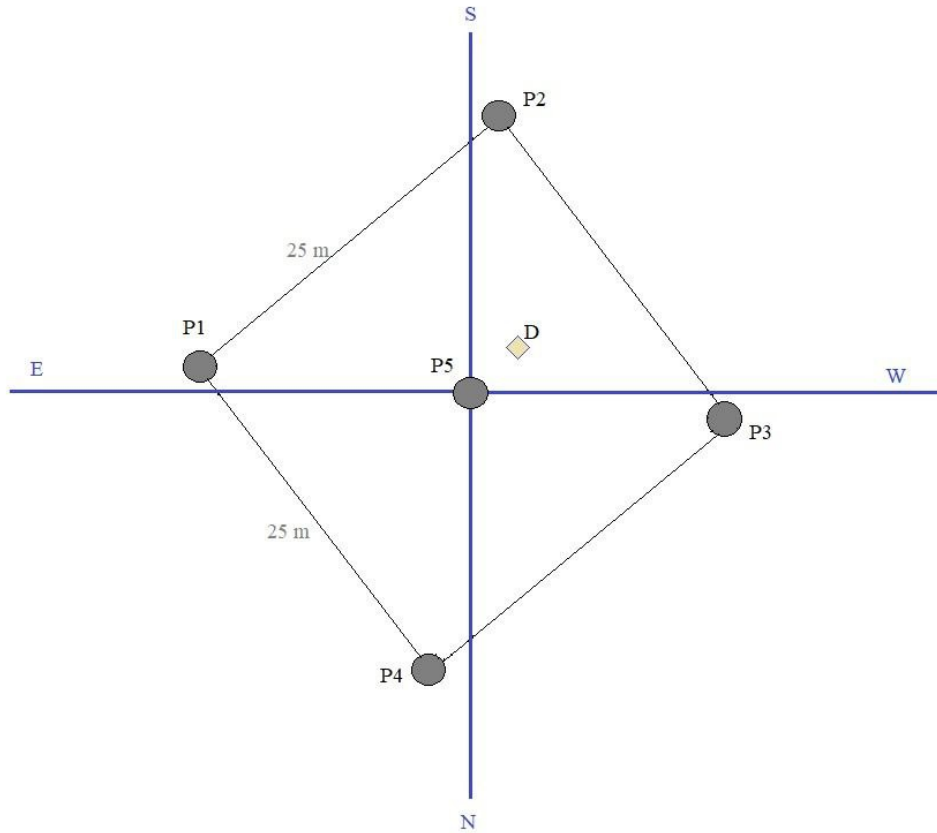


Рис. 1: Расположение детекторов.

3 Процесс моделирования

CORSIKA (COsmic Ray Simulations for KASCADE) – это монтекарловская модель, учитывающая в подробностях развитие ШАЛ в атмосфере. Она пригодна для ливней, вызванных фотонами, нуклонами или ядрами. Каждая частица в ливне прослеживается до своего поглощения с учетом энергетических потерь, от клонений из-за многократного рассеивания и геомагнитного поля. Модель включает распады нестабильных частиц, а также электромагнитные и адронные взаимодействия[3]. В данной работе моделирование проводилось с помощью QGSJETII-04 — это одна из моделей взаимодействия адронов при высоких энергиях. Она предназначена для описания процессов, происходящих при столкновениях высокоэнергетических частиц с атомами атмосферы, которые приводят к рождению каскадов частиц в ШАЛ. Модель базируется на концепции кварк-глюонных струн. Это структура, связывающая кварки и глюоны в адронах. При взаимодействии адронов струны разрушаются, рождая множество вторичных частиц. QGSJETII-04 моделирует столкновения частиц при энергиях, значительно превышающих те, которые можно до-



Рис. 2: Детектор пирамидаидальной формы.

стичь в лабораторных условиях, таких как на Большом адронном коллайдере (LHC). Модель описывает распределение энергий, направлений и типов вторичных частиц, таких как пионы, каоны и нуклоны, которые участвуют в развитии ливня. Результаты, полученные с помощью QGSJETII-04, сравниваются с данными от наземных установок (таких как Pierre Auger Observatory). Для моделирования взаимодействий частиц была использована модель низкоэнергетических адронных взаимодействий GHEISHA 2002d. GHEISHA используется для моделирования адронных взаимодействий в диапазоне низких энергий (от десятков МэВ до нескольких ГэВ), что особенно важно для описания вторичных частиц в ШАЛ. В качестве конфигурации детекторной установки, представляющей собой массив детекторов, расположенных в одной горизонтальной плоскости, использовался Horizontal flat detector array (горизонтальная плоская матрица детекторов).

В процессе моделирования были учтены такие параметры, как расположение ТШВНС, а именно: высота над уровнем моря 3340 м, горизонтальные и вертикальные компоненты магнитного поля, соответственно равные 29.69 мкТл и 47.45 мкТл. Уникальное местоположение ТШВНС позволяет регистрировать частицы на стадии максимума развития ШАЛ, где концентрация частиц достигает своего пика, здесь наблюдается максимум вторичных частиц, что даёт возможность получить более точную информацию о параметрах первичных

космических лучей, таких как энергия, масса и угол прихода. Для моделирования было выбрано два значения энергии первичных космических частиц 10^{15} и 10^{16} Эв. Для каждой энергии задавались три угла прихода: 30° , 45° и 60° . Для каждого из этих углов было выполнено моделирование двух ливней с разными значениями параметра seed, обеспечивающего случайность в генерации взаимодействий частиц. Таким образом, общее количество смоделированных широких атмосферных ливней составило 12. Затем с помощью скрипта написанного на python, с использованием пакета ROOT из полученного массива данных о частицах для каждого из смоделированных широких атмосферных ливней были получены гистограммы распределения вторичных частиц: электронов, адронов, мюонов, гамма-квантов. Полученные результаты представлены в таблице 1. Пример полученных гистограмм для ШАЛа с параметрами $E=10^{16}$ эВ и углом падения первичной частицы $\phi = 60$, показаны на рисунках [Рис. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

Энергия, эВ	Угол ϕ	Угол θ	Seed	N_γ	N_e	N_h	N_μ
10^{15}	30°	180°	1 2 0, 2 3 0	$1,4 \times 10^6$	$2,8 \times 10^5$	$1,3 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$
			3 2 0, 2 4 0	$1,3 \times 10^6$	$2,6 \times 10^5$	$1,1 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$
	45°	180°	1 0 0, 2 0 0	$1,2 \times 10^6$	$2,3 \times 10^5$	$1,1 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$
			1 1 0, 2 1 0	$7,2 \times 10^5$	$1,3 \times 10^5$	$8,4 \times 10^3$	$8,2 \times 10^3$
	60°	180°	1 0 0, 2 0 0	$5,2 \times 10^4$	$9,9 \times 10^3$	$5,7 \times 10^3$	$5,7 \times 10^3$
			3 2 0, 3 4 0	$3,1 \times 10^4$	$5,3 \times 10^3$	$6,9 \times 10^3$	$6,9 \times 10^3$
10^{16}	30°	180°	1 0 0, 2 0 0	$1,7 \times 10^7$	$3,4 \times 10^6$	$9,1 \times 10^4$	$8,7 \times 10^4$
			2 1 0, 2 1 0	$2,3 \times 10^7$	$5,2 \times 10^6$	$9,2 \times 10^4$	$8,7 \times 10^4$
	45°	180°	1 2 0, 2 1 0	$1,1 \times 10^7$	$2,2 \times 10^6$	$8,4 \times 10^4$	$8,2 \times 10^4$
			3 2 0, 3 1 0	$7,3 \times 10^6$	$1,4 \times 10^6$	$9,1 \times 10^4$	$8,9 \times 10^4$
	60°	180°	1 3 0, 2 2 0	$8,2 \times 10^5$	$1,4 \times 10^5$	$6,4 \times 10^4$	$6,4 \times 10^4$
			2 3 0, 3 1 0	$1,6 \times 10^6$	$2,6 \times 10^5$	$3,3 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$

Таблица 1: Результаты распределения частиц, полученные в ходе моделирования

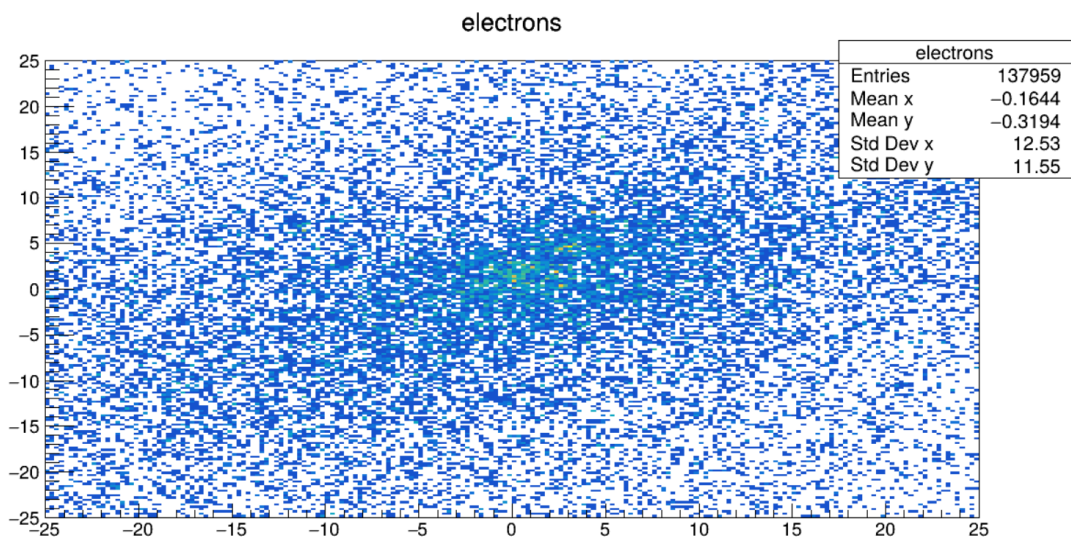


Рис. 3: Распределение электронов, в ШАЛе с энергией 10^{16} Эв, и углом падения 60° .

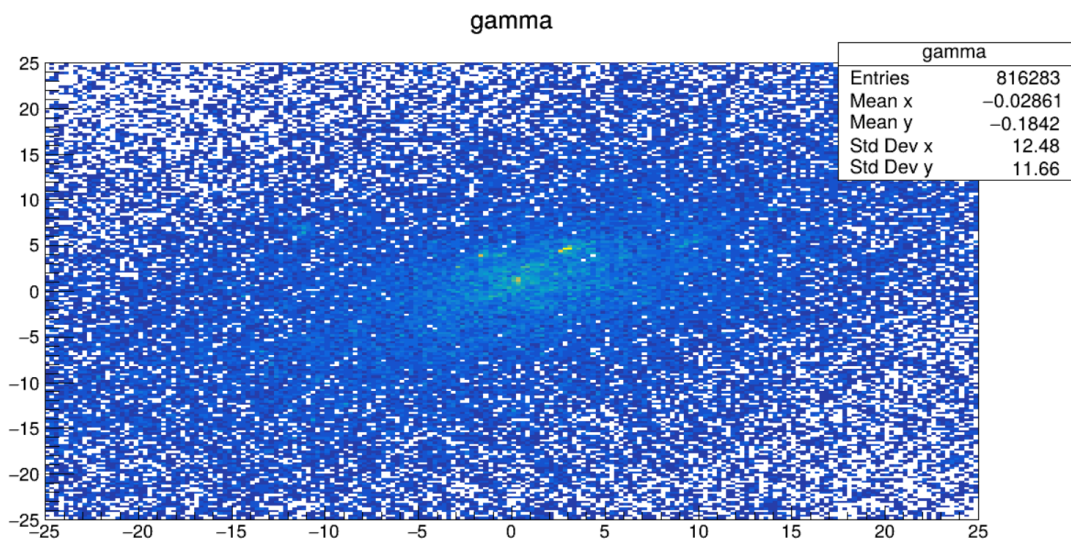


Рис. 4: Распределение гамма-квантов, в ШАЛе с энергией 10^{16} Эв, и углом падения 60° .

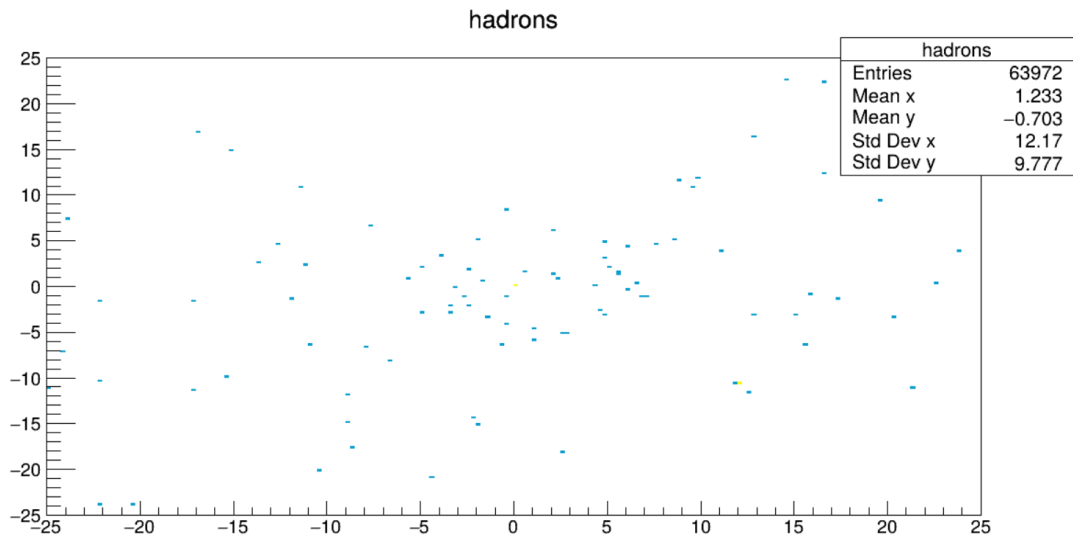


Рис. 5: Распределение адронов, в ШАЛе с энергией 10^{16} Эв, и углом падения 60° .

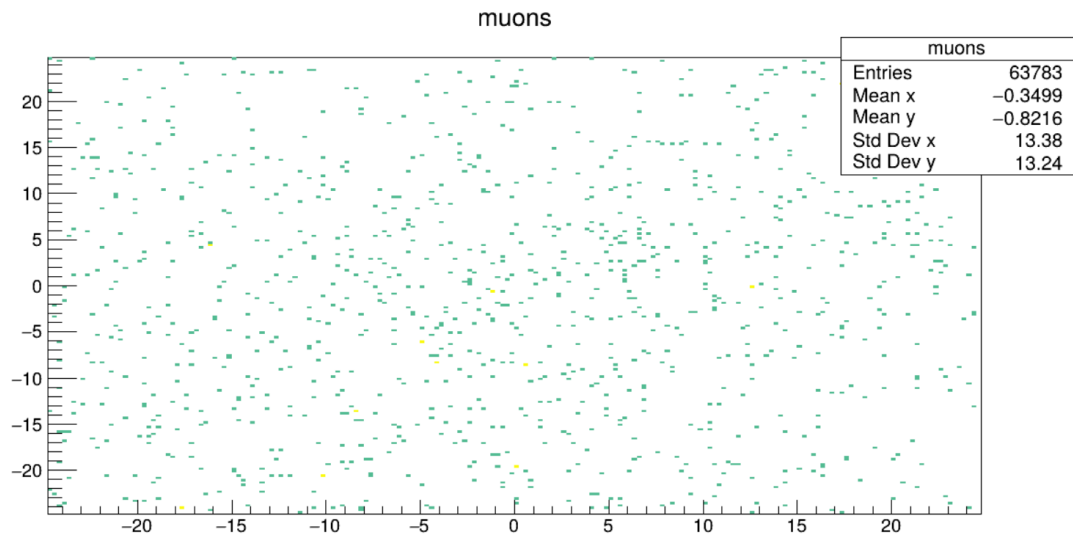


Рис. 6: Распределение мюонов, в ШАЛе с энергией 10^{16} Эв, и углом падения 60° .

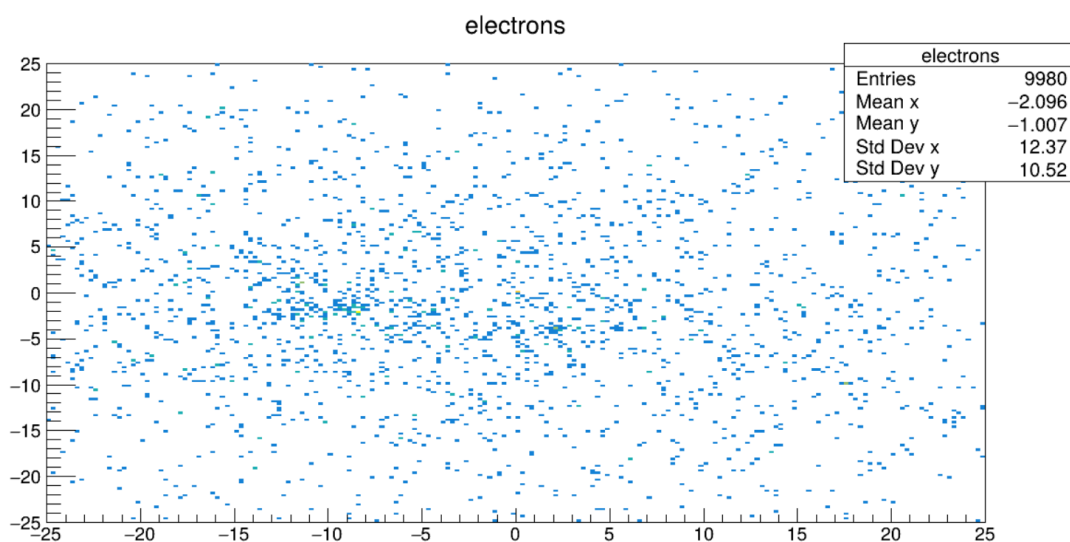


Рис. 7: Распределение электронов, в ШАЛе с энергией 10^{15} Эв, и углом падения 60° .

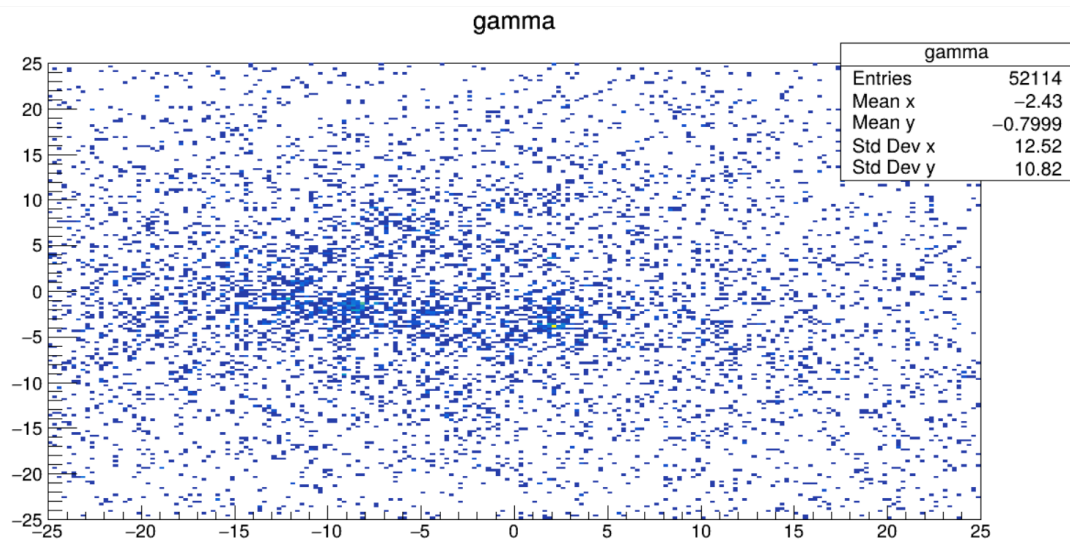


Рис. 8: Распределение гамма-квантов, в ШАЛе с энергией 10^{15} Эв, и углом падения 60° .

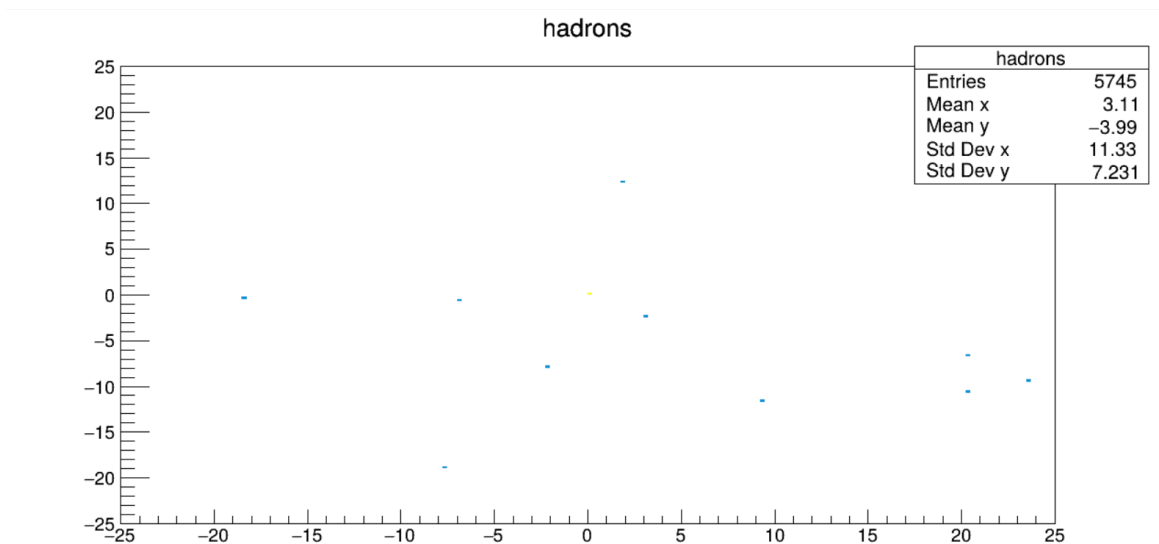


Рис. 9: Распределение адронов, в ШАЛе с энергией 10^{15} Эв, и углом падения 60° .

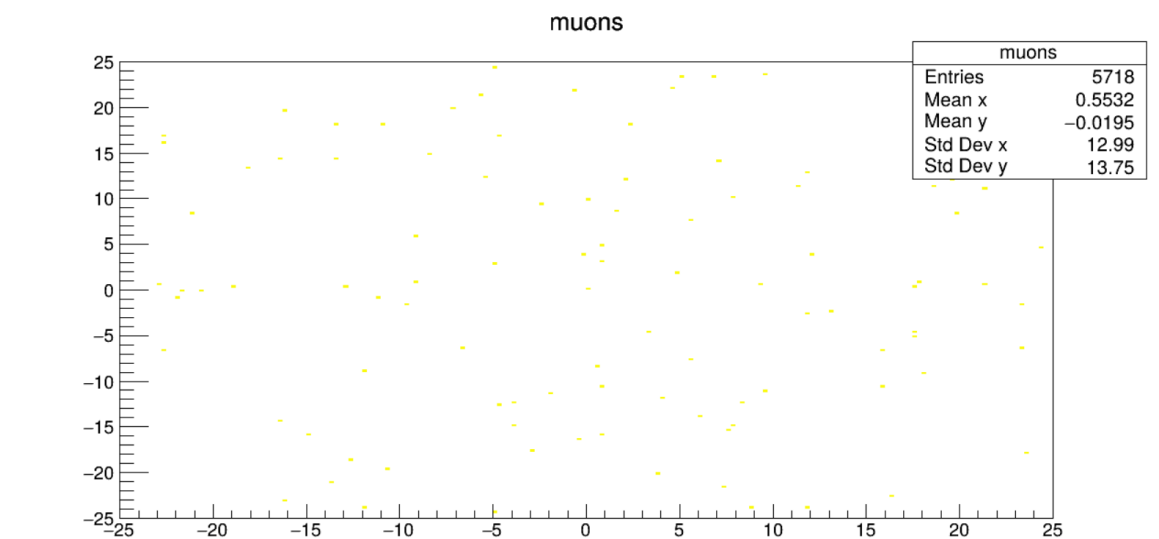


Рис. 10: Распределение мюонов, в ШАЛе с энергией 10^{15} Эв, и углом падения 60° .

4 Анализ

Проанализировав полученные результаты можно прийти к следующим выводам:

Увеличение энергии первичной частицы приводит к росту числа вторичных частиц в ШАЛе. Это наблюдается как за счет большего числа взаимодей-

ствий с веществом, так и из-за повышения энергии частиц, что способствует более интенсивному процессу образования вторичных частиц. Пространственное распределение адронов, гамма-квантов и электронов сохраняет схожую структуру для обоих случаев, но при большей энергии концентрация частиц становится заметно выше в центральной области. Такая динамика наблюдается для всех смоделированных углов падения первичной частицы. Что касается распределения мюонов, то при малых углах отклонения стандартные отклонения по осям X и Y имеют примерно одинаковые значения, что свидетельствует о симметричности их распределения. Однако с увеличением угла отклонения асимметрия распределения усиливается, и стандартные отклонения по осям X и Y начинают немного различаться, что также наблюдается в работе[5].

5 Заключение

В ходе проведенной работы была изучена природа ШАЛ. Особое внимание было уделено анализу структуры и поведения различных типов частиц, генерируемых в процессе взаимодействия первичных частиц с веществом. В ходе работы была освоена программа CORSIKA, Для моделирования взаимодействий и получения распределений частиц была использована модель QGSJETII-04.

В результате проведенного анализа было выявлено, что с увеличением энергии первичной частицы происходит рост числа вторичных частиц в ШАЛе. Пространственное распределение адронов, гамма-квантов и электронов сохраняет схожую структуру при разных энергиях, однако при большей энергии концентрация частиц становится заметно выше в центральной области. Для мюонов при различных энергиях стандартные отклонения по осям X и Y оставались примерно одинаковыми, но с увеличением угла отклонения они становились более близкими друг к другу.

Список литературы

- [1] Никольский С. И *Широкие атмосферные ливни космического излучения.* //Успехи физических наук. – 1962. – Т. 78. – №. 11. – С. 365-410.
- [2] Слепцов И. Е. *70 лет открытию явления «Широкие атмосферные ливни»* //Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2009. – №. 1. – С. 112-114.
- [3] Мурзин В. *Астрофизика космических лучей.* – Litres, 2017.

- [4] *Kalikulov O. A. et al. Прототип установки временных детекторов для исследования оси прихода ШАЛ //Вестник. Серия Физическая (ВКФ). – 2021. – Т. 79. – №. 4. – С. 4-9.*
- [5] *Sogarwal H., Shukla P. Inclusive fluxes of secondary air-shower particles //Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2024. – Т. 2024. – №. 08. – С. 013.*