

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 524.1

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА МЮОНОВ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ
УГЛАМИ**

Студент _____ Н. В. Пономарева

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ А. Н. Дмитриева

Москва 2022

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА МЮОНОВ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ
УГЛАМИ**

Студент _____ Н. В. Пономарева

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ А. Н. Дмитриева

Рецензент,
к.ф.-м.н. _____ Н. Ю. Агафонова

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

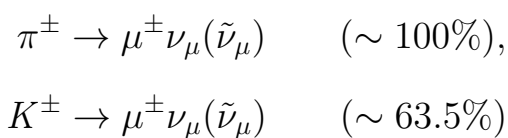
Введение	3
1 Описание эксперимента	9
1.1 Экспериментальная установка	9
1.2 Отбор экспериментальных событий	11
1.3 Определение интервала для обработки данных: учет изменения здания экспериментального комплекса и атмосферных эффектов	12
2 Обработка экспериментальных данных	15
2.1 Вид обрабатываемых файлов	15
2.2 Условие BOUND: уменьшение краевых эффектов	17
2.3 Расчет пороговой энергии в эксперименте	17
2.4 Распределение треков мюонов по углам и энергиям	22
3 Расчет светосилы установки	24
3.1 Предварительные расчеты	26
3.2 Розыгрыш трека	28
3.3 Распределения моделированных треков	31
3.4 Условия срабатывания СМ при регистрации частицы	33
3.4.1 Условие BOUND	33
3.4.2 Условие прохождения трека через трубки и холдеры	33
3.4.3 Учет отключенных полукамер	36
3.5 Проверка корректности учета внутренней структуры	38
3.6 Светосила	39
4 Интегральная интенсивность потока мюонов	43
Заключение	49
Список использованных источников	51

ВВЕДЕНИЕ

Мюоны – это лептоны второго поколения [1] со спином $1/2$, их масса 105.66 МэВ, что примерно в 207 раз больше массы электрона.

Мюон был открыт в 1937 г. Карлом Андерсоном и Сетом Наддермером в процессе исследования космического излучения. Было обнаружено, что эти частицы меньше отклонялись магнитным полем от первоначальной траектории, чем электроны, но больше, чем протоны. В результате анализа жесткой компоненты космических лучей, проникающей через толстый слой свинца, был сделан вывод, что составляющие ее частицы имеют массу, значительно превышающую массу электрона, и несут отрицательный заряд.

Мюоны рождаются в распадах заряженных пионов и каонов, которые образуются высоко в атмосфере Земли при столкновениях высокоэнергетичных протонов с ядрами атомов атмосферы. Ниже приведены реакции, в которых образуются мюоны, и вероятности их протекания:



Большая часть мюонов образуется на высоте $15\text{--}20$ км [2] при глубине атмосферы порядка 100 г/см². На уровне моря мюоны составляют $\sim 70\%$ потока заряженных частиц.

Интерес к изучению потока мюонов обусловлен тем, что релятивистский мюон способен преодолевать большие расстояния в веществе, относительно слабо взаимодействуя с ним, и доносить до наблюдателя информацию о первичных космических лучах, а так же об атмосферных процессах, влияющих на образование мюонов. В настоящее время активно развивается мюонография – это метод построения изображений объектов путем сравнения интенсивности и углового распределения мюонов после

прохождения через исследуемый объект с аналогичными первоначальными характеристиками. Во всех вышеперечисленных областях интегральная интенсивность потока мюонов позволяет оценить, сколько времени потребуется для получения оптимального количества событий в мюонных детекторах с учетом их светосилы и расположения. Кроме того мюоны являются фоновыми частицами во многих экспериментах. Зная интегральную интенсивность потока мюонов, можно оценить скорость счета фоновых событий в интересующем эксперименте.

Итак, интегральная интенсивность потока мюонов на поверхности Земли – одна из важнейших его характеристик, используемая в анализе пространственно-временных вариаций потока мюонов.

Цель данной работы: измерить интегральную интенсивность потока мюонов околоразнонаправленных направлений по данным координатного детектора ДЕКОР [3], входящего в состав экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД [4].

ДЕКОР представляет восемь супермодулей (СМ), расположенных в галереях вокруг черенковского водного калориметра НЕВОД, который занимает бассейн объемом 2000 м³. ДЕКОР позволяет измерить интегральную интенсивность потока мюонов при больших зенитных углах θ .

Абсолютная интенсивность потока мюонов $I(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})$ для зенитного θ и азимутального φ углов прихода частиц и пороговой энергии $E_{\text{пор}}$ рассчитывается по формуле (1):

$$I(\theta, \varphi, E_{\text{пор}}) = \frac{N(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})}{T \cdot \varepsilon_{\text{СМ1}} \cdot \varepsilon_{\text{СМ2}} \cdot S\Omega(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})}, \quad (1)$$

где $N(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})$ – число событий, зарегистрированных в данных угловых и энергетическом интервалах, T – “живое” время измерений. Коэффициенты $\varepsilon_{\text{СМ1,2}}$ учитывают эффективность срабатывания отдельных супермодулей пары. $S\Omega(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})$ – светосила установки с учетом эффективности регистрации и реконструкции треков.

В 2007 г. была опубликована работа [5], в которой приведены результаты измерения интегральной интенсивности потока мюонов в диапазоне зенитных углов $20^\circ < \theta < 90^\circ$ и пороговых энергий от 1.5 ГэВ до 7.2 ГэВ по данным координатного детектора ДЕКОР. На тот момент ДЕКОР состоял

из двенадцати супермодулей, четыре из них находились сверху черенковского водного калориметра НЕВОД, что позволяло проводить измерения в широких интервалах по энергии и зенитному углу. Было обработано около 3 тыс. часов работы установки, причем экспериментальные данные были набраны только за зимние месяцы. В данной работе измерение интегральной интенсивности проводилось по экспериментальным данным, полученным с помощью восьми супермодулей, находящихся в галереях вокруг черенковского водного калориметра. Была значительно увеличена статистика: обработано около 33 тыс. часов – пять лет работы установки.

С 2007 г. было проведено несколько экспериментов по измерению интегральной интенсивности потока мюонов, но, к сожалению, рассматриваемые в них угловые и энергетические диапазоны практически не пересекаются с рассматриваемыми в данной работе.

Например, в статье [6], опубликованной в 2019 г., описаны результаты измерения интегральной интенсивности “водного мюонного спектрометра”, расположенного в кампусе университета Экс-Марсель во Франции. Установка представляет железную конструкцию, удерживающую друг над другом две цистерны с водой. Каждая цистерна высотой 100 см. Сверху и снизу установки расположены сцинтилляционные пластины площадью 50 см × 50 см и толщиной 5 см, окруженные алюминиевыми пластинами толщиной 1.5 мм, к каждой пластине подключен фотоумножитель. Под верхний сцинтилляционный детектор дополнительно установили свинцовую пластину толщиной 50 мм, чтобы избежать регистрации детектором гамма-квантов низких энергий и электронов. Уровень воды в цистернах меняли для обеспечения более точного измерения пороговой энергии. Получены значения интегральной интенсивности потока мюонов при малых зенитных углах в диапазоне энергий 100 МэВ–500 МэВ, что не пересекается с рассматриваемыми в данной работе интервалами по зенитному углу и энергии.

В 2021 г. была опубликована статья [7], в которой описаны результаты наблюдения околоризонтального потока мюонов гамма-обсерваторией High Altitude Water Cherenkov (HAWC). Обсерватория находится в Мексике, на плато между вулканами Сьерра-Негра и Пико-де-Орисаба, высота над уровнем моря – 4100 м. Экспериментальный комплекс состоит из 300

черенковских водных калориметров. Каждый представляет стальную цистерну диаметром 7.3 м, высотой 4.5 м, заполненную дистиллированной водой. Цистерны расположены в форме шестиугольника и занимают площадь в 22 тыс. м². На дне каждого черенковского водного калориметра установлено 4 фотоэлектронных умножителя: один в центре, остальные по кругу. Авторы измеряли интегральную интенсивность потока мюонов, рассматривая путь, пройденный мюоном, в зависимости от направления прилета. Считалось, что прилетающие в направлении горных массивов мюоны преодолевают расстояние эквивалентное до 30 км воды, а мюоны прилетающие с остальных направлений – до 0.2 км воды. К сожалению, рассматриваемые в данной работе диапазоны энергии 1.7 ГэВ – 7.2 ГэВ далеки от тех, что рассматриваются в эксперименте НАУС, так как для пороговой энергии мюона, преодолевшего 3 км воды, авторы статьи приводят следующую оценку: $E_{\text{порог}} \geq 1 \text{ ТэВ}$.

Знание интегральной интенсивности потока мюонов необходимо для решения многих прикладных задач. Например, с помощью мюонографии можно обследовать объекты, представляющие опасность здоровью человека. В 2012 г. была опубликована статья [8], в которой описывается совместная работа японских и американских ученых по возможности применения мюонографии для исследования активной зоны ядерных реакторов: для измерения количества расплавленного топлива и локализации обломков разрушенной активной зоны. Было проведено сравнение эффективности двух методов, основанных на поглощении мюонов и многократном рассеянии. Для этого была создана модель реактора Fukushima Daiichi Reactor №1. Два детектора по разные стороны реактора установлены так, чтобы проходящий через них поток мюонов соответствовал направлению $\theta = 75^\circ$ по зенитному углу – это позволяет снять зависимость энергетического спектра от зенитного угла. Экспозиция длилась 6 недель. За это время метод мюонографии основанный на многократном рассеянии смог выявить разрушение в активной зоне реактора, метод основанный на поглощении мюонов не показал таких результатов. Измерения, проведенные на реакторе Fukushima Daiichi, показали, что данную технологию можно применять на атомных станциях для мониторинга расположения ядерного топлива в реакторах.

Перспективы применения мюнографии в исследовании геологических структур были рассмотрены в статье [9] 2014 года. В качестве исследуемого образца была выбрана стальная колонна (ядро магнита циклотрона НИИЯФ МГУ). Для детектирования потока мюонов были выбраны эмульсионные пластины, площадь каждой 24 см². Их расположили на жесткой металлической пластине-держателе, размещенной в теле колонны. Экспозиция продолжалась 49 суток при выключенном ускорителе. Была создана модель эксперимента, с помощью которой были получены угловые и энергетические распределения потока мюонов в пределах зенитного угла $\theta = 30^\circ$, что соответствует рассматриваемому в эксперименте диапазону, рассчитаны пороговые энергии мюонов. В результате анализа эмульсионных пластин построены распределения экспериментальных треков по зенитному и азимутальному углам. Сравнение угловых распределений потоков мюонов при разных азимутальных углах и фиксированном диапазоне зенитных углов в модельном расчете и эксперименте продемонстрировало хорошее согласие. Это распределение продемонстрировало зависимость интенсивности потока мюонов от пути в теле стальной колонны. Эксперимент подтвердил возможность применения мюнографии в исследовании массивных объектов, с её помощью можно исследовать геологические структуры, осуществлять разведку полезных ископаемых, а так же мониторинг внутренней структуры вулканов.

В 2021 году была опубликована информация о создании канадским стартапом Ideon Technologies компактного (менее 10 см в диаметре), маломощного мюонного детектора, предназначенного для использования в скважинах в местах разведки полезных ископаемых [10]. С его помощью было проведено исследование уранового месторождения МакКлин-Лейк, для этого оказалось достаточно пробурить одну скважину. Расположив в ней несколько детекторов в определенном порядке, удалось исследовать большой участок. Использование мюонных детекторов в геологоразведке позволяет строить трехмерные модели месторождений и значительно сокращать объем буровых работ.

Еще одно важное преимущество мюнографии – практически полная неинвазивность, что позволяет исследовать объекты, имеющие историческую значимость, не нанося им практически никакого вреда.

Еще в 1969 г. американским физиком Луисом Альваресом была предпринята попытка найти неизвестные пустоты в пирамиде Хефрена в Гизе [11]. Его попытка не увенчалась успехом в силу несовершенства технологий. Не так давно программе Scan Pyramids [12] все же удалось успешно реализовать эту идею. Программа начала работать в 2015 г. Для регистрации потока мюонов использовались эмульсионные пластины, изготовленные в Нагойском университете. Площадь пластин 25 см × 30 см, толщина – 300 мкм, от засвечивания пластины предохранял слой алюминия. Эмульсионным пластинам не нужны источники питания, а точность определения трека мюона довольно высокая. Первой была обследована Ломаная пирамида в Дахшуре. Набор пластин общей площадью 3 м² был установлен в нижней камере пирамиды ниже уровня Земли и экспонировался в течение 40 суток. Поток улавливаемых пластинами мюонов должен был проходить через верхнюю камеру пирамиды, что было отражено в моделировании. Мюонограмма, полученная в результате эксперимента совпала с результатами моделирования. Новых камер обнаружено не было, но этот эксперимент подтвердил работоспособность метода.

Затем в 2016 г. была обследована пирамида Хеопса в Гизе. Пластины были установлены в наклонном коридоре у входа в пирамиду. Сбор данных продолжался 67 суток. Сравнение экспериментальных данных и моделирования показало, что действительно есть неизвестная полость. Для уточнения координат новой камеры, был проведен новый эксперимент: эмульсионные пластины расположили в разных местах коридора и в Камере царицы. Установка пластин в двух разных точках позволила с большой точностью локализовать новую камеру. Таким образом, применение мюонографии в археологическом исследовании, позволило совершить большое открытие без причинения вреда историческому памятнику.

1 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

ДЕКОР [3] – координатный детектор большой площади. Как было описано выше, ДЕКОР – это восемь супермодулей, расположенных в галереях вокруг черенковского водного калориметра НЕВОД (бассейн объемом 2000 м^3 , в котором размещена пространственная решетка квазисферических модулей (КСМ), регистрирующих черенковское излучение). На рисунке 1.1 представлены система КСМ, расположение супермодулей ДЕКОР, а так же система координат, используемая в эксперименте.

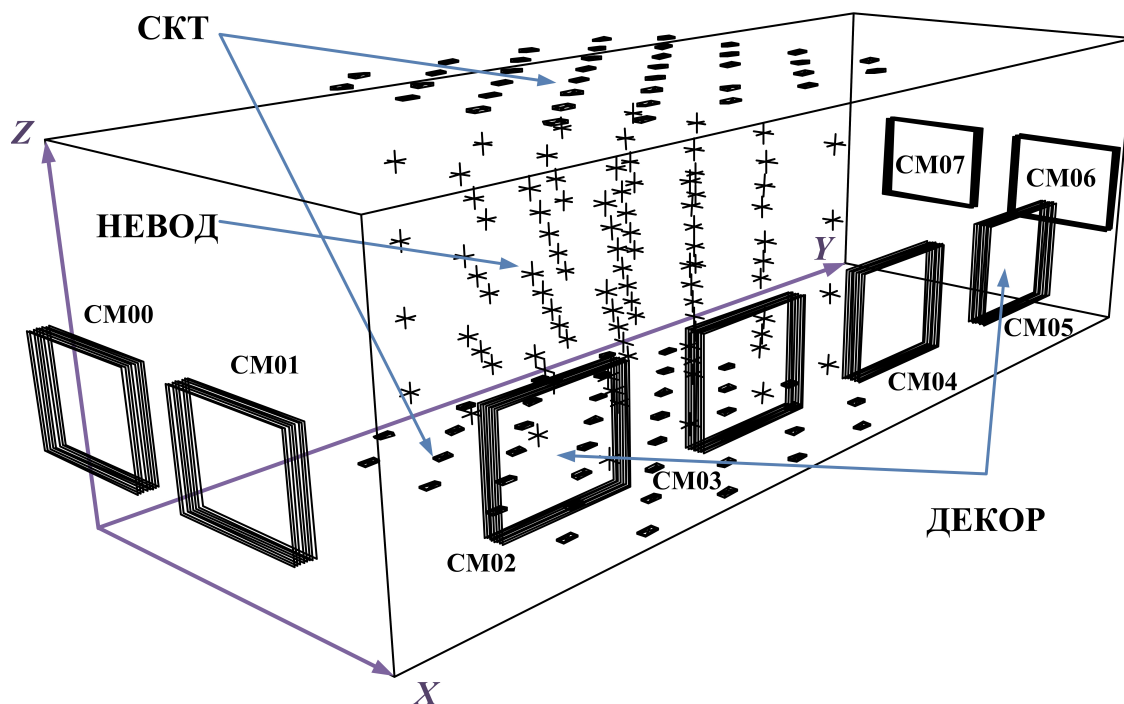


Рисунок 1.1 — Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР

Каждый супермодуль (СМ) (рисунок 1.2) – это восемь параллельных плоскостей с чувствительной областью размером $3.1 \times 2.7 \text{ м}^2$, подвешенных вертикально на расстоянии 6 см друг от друга. Съём информации производится со стрипов – алюминиевых пластинок, прикрепленных к каждой

плоскости: с шагом 1 см вдоль камер – X-проекция и 1.2 см поперек камер – Y-проекция.

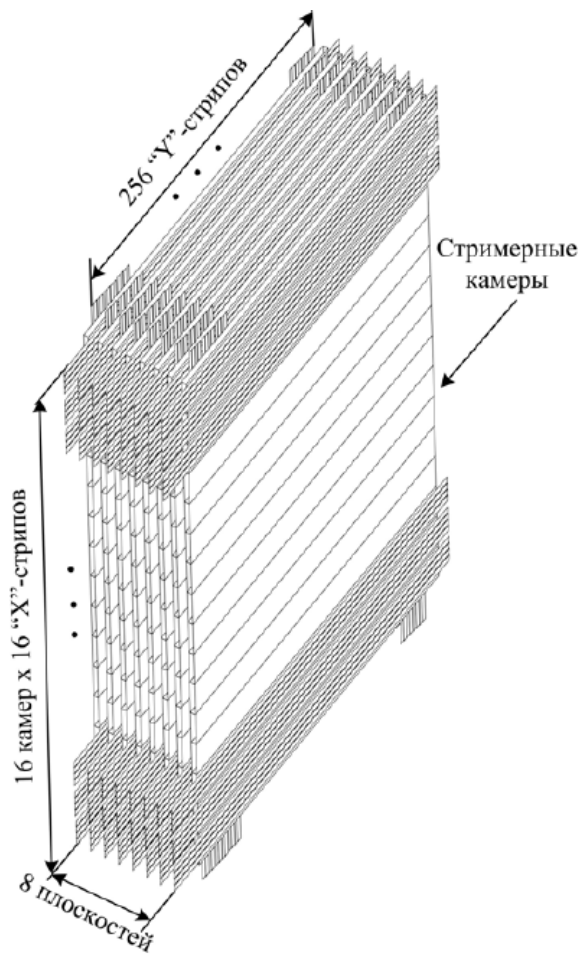


Рисунок 1.2 – Супермодуль установки ДЕКОР

Каждая плоскость состоит из 16 камер, которые расположены на расстоянии 7.44 мм друг от друга. Ширина камеры 169.79 мм. Каждая камера включает 16 газоразрядных трубок с внутренним сечением $0.895 \times 0.895 \text{ см}^2$, заполненных смесью газов Ar, CO₂, n-пентан и работающих в режиме ограниченного стримера. Внутри каждой трубки натянута анодная нить, которую удерживают от провисания пластмассовые холдеры – пластины шириной 5 мм, расположенные на расстоянии 48.5 см друг от друга и симметрично относительно центра камеры (рисунок 1.3 слева).

На рисунке 1.3 справа представлено поперечное сечение камеры: трубки объединенных в две группы – полукамеры. Расстояние между полукамерами внутри камеры – 3.15 мм, между трубками в полукамере – 1 мм. На этом рисунке также представлены примеры треков мюонов, которые не будут зарегистрированы установкой, так как они не проходят через

внутренний объем трубок. Такие особенности внутренней структуры необходимо учитывать при моделировании установки.

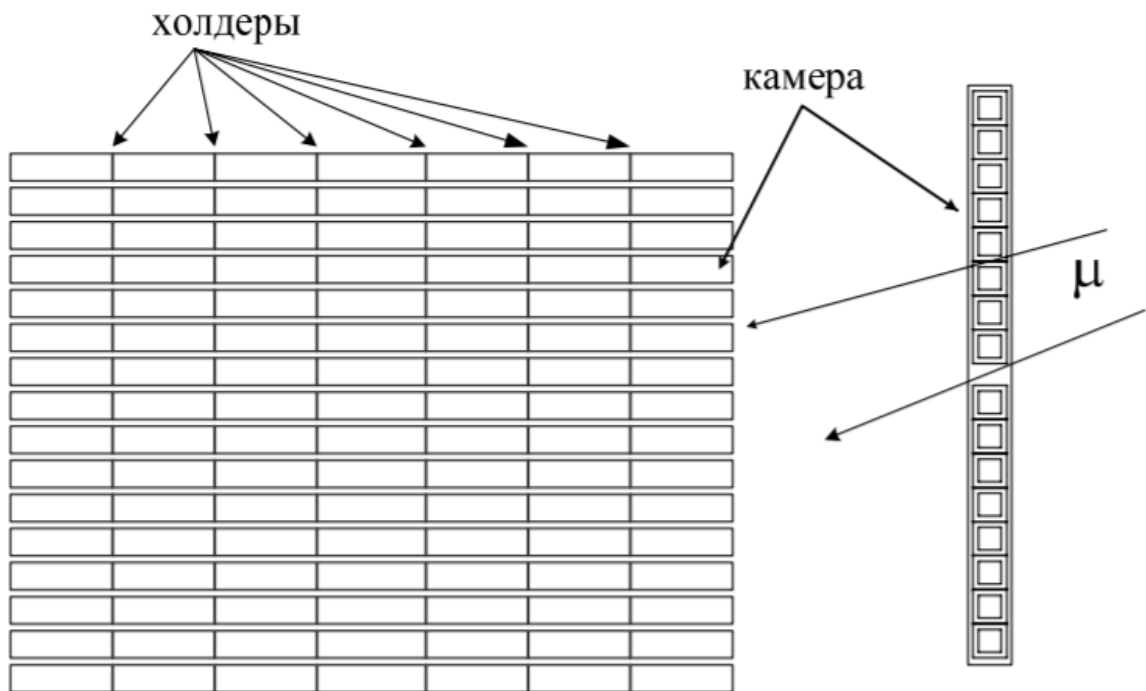


Рисунок 1.3 — Схема внутренней структуры плоскости СМ и примеры треков, которые не будут зарегистрированы плоскостью

1.2 ОТБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Отбор треков мюонов в эксперименте осуществляется с помощью триггерной системы. Она основана на совпадении сигналов разных СМ и сигналов внешней системы электроники черенковского детектора НЕВОД.

В данной работе экспериментальные события были отобраны с помощью следующих общесистемных триггеров:

- триггер №3 – срабатывание любых двух СМ в противоположных коротких галереях;
- триггер №4 – срабатывание любого СМ в короткой и любого в длинной галереях.

Если установка зарегистрировала трек мюона по триггеру №3 или триггеру №4, тогда следующим шагом для этого события проверялся критерий “объединения треков”. Он заключается в том, что два трека, отнесенные установкой к одному событию, при восстановлении по данным двух

СМ совпадали в пределах конуса с раствором 5° . Если критерий выполнялся, тогда считалось, что треки действительно относятся к одному событию. За истинную траекторию выбиралась прямая, соединяющая середины восстановленных в обоих СМ треков.

1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ: УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Для выполнения работы автору были предоставлены экспериментальные данные с июня 2013 г. по февраль 2021 г. В марте 2019 г. были начаты строительные работы по возведению стен пристройки, в которой будет работать новый детектор. Обработка экспериментальных данных, набранных с этого момента, для расчета интегральной интенсивности, затруднительна, так как потеряно единообразие условий эксперимента: в процессе строительства постоянно меняется количество вещества на пути мюона, а, следовательно, и его пороговая энергия.

Кроме того, при измерении интегральной интенсивности потока мюонов у поверхности Земли необходимо учитывать барометрический и температурный эффекты [2].

С увеличением давления возрастает количество вещества на пути мюона, что приводит к росту потерь энергии и, как следствие, поглощению мюонов веществом атмосферы. Поэтому при увеличении давления интенсивность потока мюонов на поверхности Земли падает. Уменьшение атмосферного давления приводит к противоположному изменению. Барометрический эффект имеет отрицательный знак.

С ростом температуры атмосфера расширяется, и уровень генерации пионов и каонов от первичных частиц космических лучей поднимается. Возникающие при распаде мюоны проходят больший геометрический путь до поверхности Земли – вероятность распада мюона увеличивается. С другой стороны, при увеличении температуры возрастает вероятность пиону или каону распасться с образованием мюона, так как уменьшается

вероятность взаимодействия мезона с ядрами атомов атмосферы. В данной работе рассматриваются небольшие пороговые энергии, для которых более значимым оказывается увеличение геометрического пути мюона, и температурный эффект имеет отрицательный знак.

В течение работы в предыдущих семестрах была проведена оценка влияния метеоэффектов на скорость счета разных пар супермодулей. Для оценки влияния барометрического эффекта были построены зависимости скорости счета от давления для пары СМ01-СМ02 (обладает минимальной пороговой энергией $E_{\text{пор}} = 1.7$ ГэВ) и для пар СМ00-СМ06, СМ00-СМ07, СМ01-СМ06 и СМ01-СМ07 (обладают максимальной пороговой энергией $E_{\text{пор}} = 7.2$ ГэВ). Скорость счета уменьшается с ростом энергии. Для количественной оценки влияния вариаций давления на интенсивность потока мюонов у поверхности Земли был рассчитан барометрический коэффициент β по формуле (1.1):

$$\beta = B/N_0 \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

где B – коэффициент наклона прямой, полученной при фитировании зависимости скорости счета от среднего атмосферного давления; N_0 – средняя скорость счета. Для пары СМ01-СМ02 оценка барометрического коэффициента составила $\beta \sim -0.21$ %/мбар, для остальных указанных пар: $\beta \sim -0.15$ %/мбар.

Для оценки влияния температурного эффекта были построены зависимости скорости счета от среднemasсовой температуры атмосферы для пары СМ01-СМ02 и для пар СМ00-СМ06, СМ00-СМ07, СМ01-СМ06 и СМ01-СМ07. Для количественной оценки влияния вариаций температуры на интенсивность потока мюонов у поверхности Земли был рассчитан температурный коэффициент β_T по формуле (1.2):

$$\beta_T = B_T/N_0 \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где B_T – коэффициент наклона прямой, полученной при фитировании зависимости скорости счета от среднemasсовой температуры атмосферы; N_0 – средняя скорость счета. Для пары СМ01-СМ02 температурный коэффициент оказался равен $\beta_T \sim -0.1$ %/°С, для пар СМ00-СМ01-СМ06-СМ07: $\beta_T \sim -0.04$ %/°С.

Уменьшить влияние метеозффектов возможно несколькими способами: введением поправок на атмосферные эфффекты или выбором интервала измерения кратным году. В последнем случае влияние эфффектов нивелируется за счет усреднения по сезону. Был применен последний вариант.

Таким образом, для нивелирования влияния атмосферных эфффектов и обеспечения единообразия условий эксперимента решено обрабатывать экспериментальные данные с июня 2013 г. по май 2018 г.

При расчете интенсивности необходимо учитывать эфффективность срабатывания отдельных СМ пары. Для выбранного интервала времени были использованы значения коэффициентов эфффективности $\varepsilon_{СМ}$, представленные в таблице 1.1 (определены по экспериментальным данным).

Номер СМ	$\varepsilon_{СМ}$
00	0.996
01	0.999
02	0.999
03	0.995
04	0.993
05	0.994
06	0.995
07	0.996

Таблица 1.1 — Коэффициенты эфффективности срабатывания отдельных СМ пары

2 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1 ВИД ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ФАЙЛОВ

Определенному в предыдущем пункте временному интервалу соответствуют одиннадцатая серия и часть двенадцатой серии эксперимента. В одиннадцатой серии обработаны все 456 наборов, в двенадцатой – 690 наборов из 885.

Экспериментальные данные после первичной обработки для каждого набора хранятся в специальных файлах. Например, в файле с названием: “result_NAD_000.dat” хранится информация о треках мюонов, зарегистрированных во время набора №0.

В таблице 2.1 представлен пример исходных данных по первым десяти зарегистрированным трекам мюонов набора №0.

Обозначения столбцов в файле:

- “RUN” — номер набора;
- “Event” — номер события;
- “Date”, “Time” — дата и время регистрации события;
- “SM_0”, “SM_1” — номера сработавших СМ;
- “X0”, “Y0”, “Z0”, “X1”, “Y1”, “Z1” — координаты трека частицы, зарегистрированные в SM_0 и SM_1;
- “Teta”, “Pfi” — зенитный и азимутальный углы.

Указанные файлы содержат события, удовлетворяющие критерию объединения треков.

RUN	Event	Date	Time	SM_0	SM_1	X0	Y0	Z0	X1	Y1	Z1	Teta	Pfi
NAD_000	3	04.06.2013	13:13:19.02	1	2	9750.00	1826.68	4796.04	6500.80	-801.00	2918.34	65.80	38.96
NAD_000	6	04.06.2013	13:13:19.32	1	2	6406.38	-801.00	4991.67	9750.00	3878.57	4164.35	81.81	234.45
NAD_000	9	04.06.2013	13:13:19.54	1	2	9750.00	3444.06	4637.63	5656.48	-801.00	3414.28	78.28	46.04
NAD_000	11	04.06.2013	13:13:19.63	0	2	3202.16	-801.00	4061.15	9750.00	2455.73	3131.65	82.76	206.44
NAD_000	13	04.06.2013	13:13:19.76	1	2	9750.00	1825.37	2930.14	7741.01	-801.00	2728.61	86.51	52.59
NAD_000	21	04.06.2013	13:13:20.32	1	2	9750.00	1789.50	4953.60	7734.45	-801.00	3610.17	67.74	52.12
NAD_000	32	04.06.2013	13:13:20.96	1	2	9750.00	1736.93	4370.34	6329.70	-801.00	3551.41	79.12	36.58
NAD_000	56	04.06.2013	13:13:22.28	4	7	9748.00	14115.11	5132.69	2398.40	26812.00	3725.92	84.52	300.06
NAD_000	57	04.06.2013	13:13:22.30	5	6	9750.00	19740.13	3358.98	7962.93	26812.00	2940.54	86.72	284.18
NAD_000	61	04.06.2013	13:13:22.74	5	7	9750.00	17963.55	4773.00	3033.17	26812.00	3085.35	81.36	307.20

Таблица 2.1 — Вид файла с характеристиками треков частиц

Номер СМ	X_0	Y_0	Z_0
00	756	-801	2577
01	5173	-801	2574
02	9750	1448	2571
03	9751	6561	2567
04	9748	11689	2565
05	9750	16808	2574
06	8303	26812	2567
07	3903	26812	2570

Таблица 2.2 — Координаты опорных точек

2.2 УСЛОВИЕ BOUND: УМЕНЬШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

Для уменьшения влияния краевых эффектов была написана функция на языке C++ [13], которая осуществляет проверку прохождения трека каждой частицы через внешние плоскости СМ не ближе 4 см от координат крайних стрипов – условие “BOUND”. Последние были рассчитаны для каждого СМ относительно его опорной точки путем добавления размеров плоскостей и расстояния между нулевой и седьмой плоскостями. За опорную точку принимается нижняя правая (вид изнутри бассейна) точка ближайшей к бассейну плоскости. Координаты опорных точек приведены в таблице 2.2.

2.3 РАСЧЕТ ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Пороговая энергия – это минимальная энергия, необходимая для прохождения заряженной частицы через вещество.

Для расчета пороговой энергии была написана специальная функция. При ее создании были использованы предоставленные научным руководителем материалы, а именно: схемы здания и экспериментальной установки НЕВОД & ДЕКОР, координаты всех их составных частей, функции для расчета потерь энергии в веществе, функция, рассчитывающая геометрический путь частицы в заданном объеме.

Пример трека частицы и пересекаемых объемов представлен на рисунке 2.1.

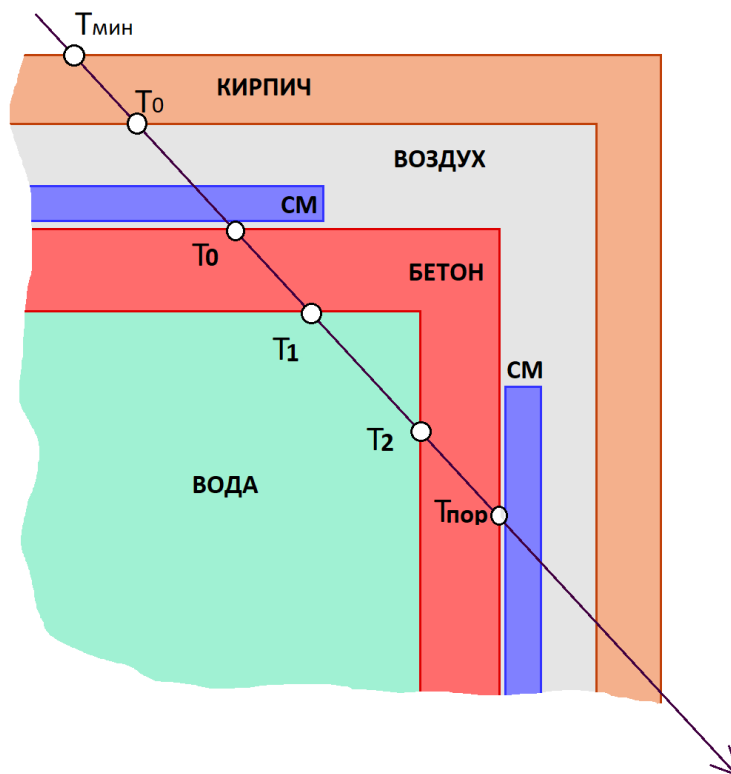


Рисунок 2.1 — Схема прохождения мюона через пару СМ, части здания и установки НЕВОД & ДЕКОР

Здесь $T_{мин}$ (~ 300 МэВ) — увеличение пороговой энергии, которого требует критерий объединения треков, так как если энергия мюона на вылете из бассейна равна нулю, то вероятность того, что он рассеется на угол меньше 5° , очень мала. Значения $T_{мин}$ предоставлены научным руководителем [5]. T_0 — энергия частицы после прохождения кирпичной стены здания. Кирпич — SiO_2 , плотность $\rho = 1.8$ г/см³, толщина стен $d_C = 55$ см. Потерями энергии мюонов в воздухе и супермодуле пренебрегаем. T_1 — энергия частицы после прохождения бетонной стены бассейна, плотность $\rho = 2.1$ г/см³, толщина стен бассейна $d_B = 60$ см. T_2 — энергия частицы после прохождения слоя воды, плотность $\rho = 1$ г/см³. $T_{пор}$ — энергия после прохождения второй бетонной стены бассейна. Значение $E_{пор} = T_{пор} + m_\mu c^2$ — искомое значение пороговой энергии.

В написанную функцию расчета пороговой энергии передаются номера СМ, зарегистрировавших событие, и координаты X , Y , Z середины треков, восстановленных в каждом СМ. По порядку срабатывания СМ

(считается, что частица двигается исключительно сверху вниз) определяется очередность пересечения мюоном частей здания и установки. Далее с помощью функции, рассчитывающей геометрический путь частицы в заданном объеме, проверяется, действительно ли частица пересекла данный объем и каков ее путь в нем. Затем геометрический путь умножается на плотность соответствующего материала и передается в функцию расчета энергии (своя для каждого материала). Происходит последовательный пересчет по таблицам пробег-энергия (зная T , рассчитываем пробег R , увеличиваем пробег $R' = R + \Delta R$, рассчитываем значение T' , соответствующее R'). В итоге получаем пороговую энергию. При расчете используются табличные данные пробегов мюонов в веществе [14].

Далее была написана программа, позволяющая отсортировать события по парам СМ, найти минимальные и максимальные значения зенитного и азимутального углов, координаты Z , а также пороговой энергии. Все указанные максимальные и минимальные значения записаны в два файла: в первом частицы летят от СМ с меньшим номером к СМ с большим номером, во втором — наоборот. Таблицы 2.3 и 2.4 иллюстрируют эти файлы.

Обозначения столбцов в файле:

- “SM0”, “SM1” — номера сработавших СМ;
- “ θ_{\min} ”, “ θ_{\max} ” — минимальный и максимальный зенитные углы;
- “ φ_{\min} ”, “ φ_{\max} ” — минимальный и максимальный азимутальные углы;
- “ Z_{\min} ”, “ Z_{\max} ” — минимальное и максимальное значения координаты Z ;
- “ E_{\min} ”, “ E_{\max} ” — минимальное и максимальное значения пороговой энергии.

SM0	SM1	θ_{\min}	θ_{\max}	φ_{\min}	φ_{\max}	Z_{\min}	Z_{\max}	E_{\min}	E_{\max}
0	2	71.41	90.00	196.22	220.30	2607.62	5246.25	2457	3233
0	3	76.08	90.00	220.97	239.02	2607.94	5246.10	2881	3796
0	4	80.27	90.00	235.18	248.04	2608.91	5246.18	3936	4775
0	5	82.59	90.00	243.58	253.08	2608.09	5246.22	5148	5862
0	6	84.67	90.00	255.25	267.12	2609.77	5246.22	7142	7398
0	7	84.65	90.00	263.79	276.05	2610.87	5246.22	7132	7200
1	2	56.02	90.00	210.16	251.08	2604.50	5243.23	1319	2245
1	3	74.13	90.00	239.63	260.20	2605.00	5243.09	2554	3205
1	4	79.80	90.00	250.52	263.54	2608.83	5242.74	3809	4340
1	5	82.47	90.00	255.84	265.17	2617.95	5243.20	5124	5827
1	6	84.66	90.00	263.81	276.11	2613.89	5243.16	7132	7202
1	7	84.67	90.00	272.76	284.65	2613.80	5243.25	7141	7391
2	6	83.81	90.00	274.42	281.27	2631.21	5237.37	6404	6958
2	7	83.85	90.00	283.87	291.47	2609.81	5239.93	6753	7305
3	6	82.34	90.00	274.84	284.46	2620.09	5236.08	5615	6757
3	7	82.52	90.00	287.26	296.94	2608.39	5235.34	5413	6032
4	6	79.47	90.00	276.62	290.02	2597.95	5233.66	4076	5755
4	7	79.95	90.00	292.48	305.68	2606.14	5234.07	4056	4828
5	6	73.25	90.00	280.16	301.83	2607.26	5243.21	2681	3853
5	7	75.70	90.00	302.05	320.72	2604.16	5243.15	2839	3739

Таблица 2.3 — Вид файла, содержащего максимальные и минимальные значения зенитного и азимутального углов, пороговых энергий и координаты Z для каждой пары СМ (частицы летят от СМ с меньшим номером)

SM0	SM1	θ_{\min}	θ_{\max}	φ_{\min}	φ_{\max}	Z_{\min}	Z_{\max}	E_{\min}	E_{\max}
2	0	71.46	90.00	16.25	40.27	2610.56	5240.24	2214	3023
3	0	76.28	90.00	40.90	58.80	2609.53	5236.03	2941	3833
4	0	80.34	90.00	55.26	68.09	2609.74	5234.15	4182	4935
5	0	82.50	90.00	63.57	73.09	2615.18	5242.57	5538	6160
6	0	84.71	90.00	75.25	87.11	2616.66	5236.17	7141	7394
7	0	84.69	90.00	83.80	96.03	2614.42	5239.15	7132	7201
2	1	56.10	90.00	30.02	71.03	2604.74	5240.18	1422	2305
3	1	74.54	90.00	59.61	80.31	2612.75	5236.08	2815	4064
4	1	79.88	90.00	70.57	83.42	2617.18	5234.20	4214	5897
5	1	82.50	90.00	75.83	85.10	2627.06	5242.24	5659	6815
6	1	84.67	90.00	83.82	96.11	2611.65	5236.21	7132	7201
7	1	84.68	90.00	92.77	104.65	2616.32	5239.14	7141	7393
6	2	83.89	90.00	94.00	101.28	2627.49	5235.76	6243	6978
7	2	83.83	90.00	103.75	111.46	2610.94	5238.98	6293	6906
6	3	82.26	90.00	95.06	104.44	2606.45	5236.16	5002	5628
7	3	82.46	90.00	107.13	116.90	2604.77	5239.08	5031	5760
6	4	79.35	90.00	96.59	110.01	2598.07	5236.05	3690	4272
7	4	79.87	90.00	112.51	125.63	2605.61	5239.12	3826	4669
6	5	73.28	90.00	100.00	121.80	2607.21	5236.21	2428	3102
7	5	75.72	90.00	122.06	140.66	2606.78	5239.23	2795	3713

Таблица 2.4 — Вид файла, содержащего максимальные и минимальные значения зенитного и азимутального углов, пороговых энергий и координаты Z для каждой пары СМ (частицы летят от СМ с большим номером)

2.4 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕКОВ МЮОНОВ ПО УГЛАМ И ЭНЕРГИЯМ

Для получения распределения треков мюонов по энергиям, зенитному и азимутальному углам написана программа, осуществляющая построение гистограмм. Для построения гистограмм все события записаны в трехмерный массив следующим образом. Сначала были выбраны оптимальные размерности массива и шаг по энергии и углам.

Для пары СМ01-СМ02:

Размерность по энергии: $\frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{250 \text{ МэВ}} = 6$, где 250 МэВ — шаг по энергии.

Размерность по зенитному углу: $\frac{\theta_{\text{макс}} - \theta_{\text{мин}}}{1^\circ} = 44$, где 1° — шаг по зенитному углу.

Размерность по азимутальному углу: $\frac{\varphi_{\text{макс}} - \varphi_{\text{мин}}}{0.5^\circ} = 460$, где 0.5° — шаг по азимутальному углу.

Для всех остальных пар:

Размерность по энергии: $\frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{250 \text{ МэВ}} = 9$, где 250 МэВ — шаг по энергии.

Размерность по зенитному углу: $\frac{\theta_{\text{макс}} - \theta_{\text{мин}}}{1^\circ} = 30$, где 1° — шаг по зенитному углу.

Размерность по азимутальному углу: $\frac{\varphi_{\text{макс}} - \varphi_{\text{мин}}}{0.5^\circ} = 450$, где 0.5° — шаг по азимутальному углу.

Далее пороговая энергия, зенитный и азимутальный углы для каждой частицы были записаны в соответствующий массив с номерами ячеек:

По энергии: $\left[\frac{E_{\text{пор}} - E_{\text{мин}}}{250 \text{ МэВ}} \right]$, где $E_{\text{пор}}$ — пороговая энергия для текущего трека.

По зенитному углу: $\left[\frac{\theta - \theta_{\text{мин}}}{1^\circ} \right]$, где θ — зенитный угол трека.

По азимутальному углу: $\left[\frac{\varphi - \varphi_{\text{мин}}}{0.5^\circ} \right]$, где φ — азимутальный угол трека.

Полученные гистограммы записаны в бинарные файлы. Для чтения гистограмм из бинарных файлов и построения распределений написана отдельная программа. После чтения гистограмм в специальный массив эта программа позволяет построить распределения треков мюонов по зенитному углу и по азимутальному углу.

Ниже приведены распределения треков мюонов по зенитному (рисунок 2.2) и по азимутальному углам (рисунок 2.3) для пары СМ01-СМ02.

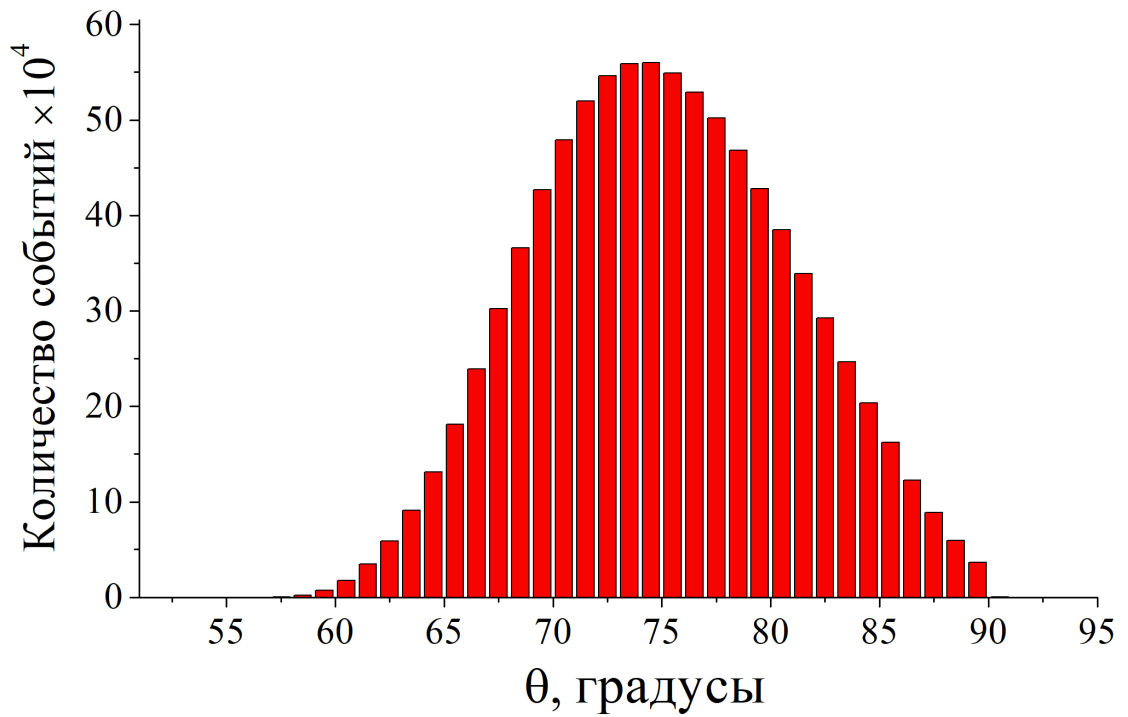


Рисунок 2.2 — Распределение треков мюонов, зарегистрированных парой СМ01-СМ02, по зенитному углу

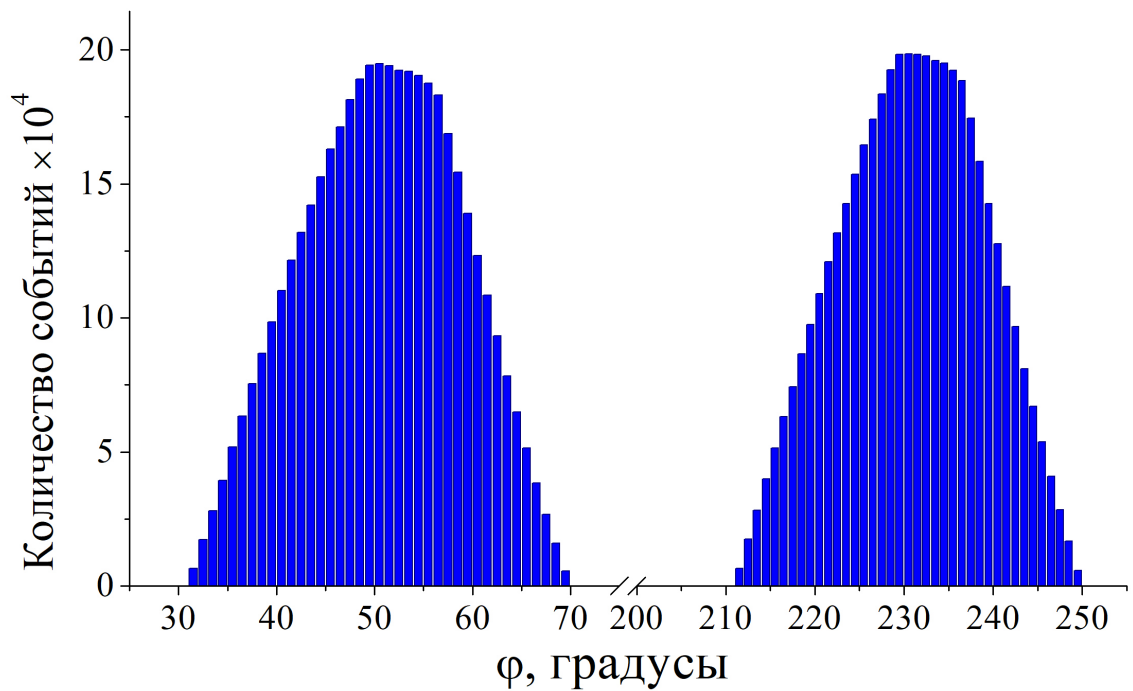


Рисунок 2.3 — Распределение треков мюонов, зарегистрированных парой СМ01-СМ02, по азимутальному углу

3 РАСЧЕТ СВЕТОСИЛЫ УСТАНОВКИ

Для расчета интенсивности необходимо вычислить светосилу установки по формуле (3.1):

$$S\Omega = \iiint S(\theta, \varphi) d\Omega(\theta, \varphi), \quad (3.1)$$

где $d\Omega(\theta, \varphi) = \sin(\theta)d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла, $S(\theta, \varphi)$ – площадь, которую “видит” трек, летящий под зенитным углом θ и под азимутальным углом φ .

Вычислить светосилу аналитически, учитывая внутреннюю структуру СМ, невозможно. Поэтому расчет светосилы был проведен с помощью моделирования.

Светосила вычисляется отдельно для каждой пары СМ. Для этого супермодули пары заключаются в параллелепипед минимального объема, в центре параллелепипеда выбирается плоскость, которая равномерно заполняется точками. Пример для пары СМ01-СМ02 представлен на рисунке 3.1.

Далее через промоделированную точку для выбранной пары СМ моделируется случайный трек частицы. Затем проверяются условия срабатывания СМ, а именно:

- 1) условие BOUND: прохождение частицы не ближе 4 см от края СМ;
- 2) учет внутренней структуры СМ: частица регистрируется плоскостью СМ, если пройдет через внутренний объем трубки, а не через холдер или зазор между трубками.

Если в каждом СМ срабатывает не менее двух четных и двух нечетных плоскостей, а в сумме – не менее пяти, тогда считается, что частица зарегистрирована установкой. Для нее рассчитывается пороговая энергия. Для моделированных треков мюонов она рассчитывается с помощью той же функции, что и для экспериментальных треков. Далее событие записы-

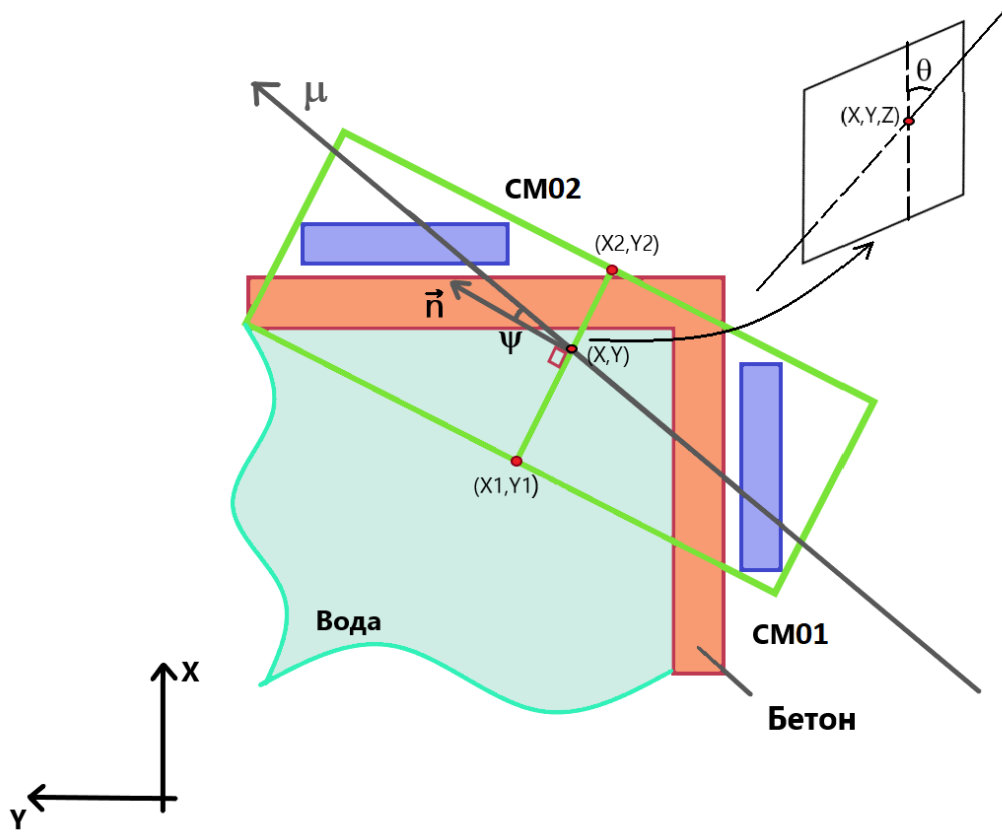


Рисунок 3.1 — Схема вычисления светосилы пары СМ01-СМ02

вается в гистограмму. После завершения моделирования по итоговой гистограмме рассчитывается светосила по формуле (3.2):

$$S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) = \frac{N_{\text{reg}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) \cdot S_{\text{plane}} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta \cos(\theta) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})}{N_{\text{total}}}, \quad (3.2)$$

где N_{reg} – количество треков частиц, зарегистрированных парой СМ с учетом выполнения перечисленных выше условий; $S_{\text{plane}} \cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$ – площадь, которую “видит” трек, летящий под углами θ_i , и φ_i , интервал по зенитному углу равен одному градусу, интервал по азимутальному углу равен 0.5° , интервал по пороговой энергии $\Delta E_{\text{пор}} = 250$ МэВ; $\cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$ – косинус угла между направлением трека и нормалью к плоскости; $\Delta\varphi = \varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}}$ – разность между максимальным и минимальным азимутальными углами для каждой пары СМ; $\Delta \cos(\theta) = \cos(\theta_{\text{min}}) - \cos(\theta_{\text{max}})$ – разность косинусов минимального и максимального зенитных углов для каждой пары СМ; N_{total} – количество промоделированных треков частиц.

Для расчета светосилы была написана программа на языке C++ [13].

3.1 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Для каждой пары СМ был построен параллелепипед минимального объема, внутри выбрана плоскость по центру (пример показан на рисунке 3.2).

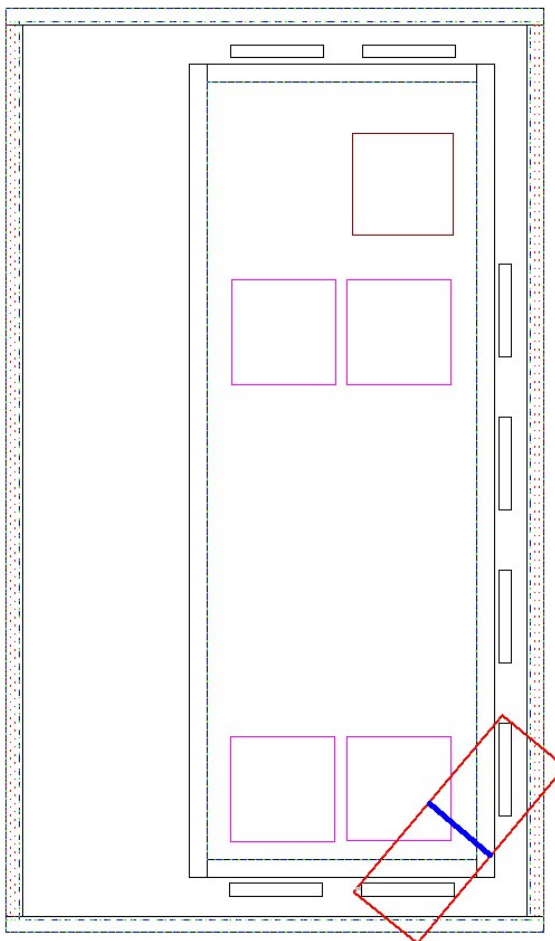


Рисунок 3.2 — Параллелепипед минимального объема для пары СМ01-СМ02

В таблице 3.1 приведены координаты точек пересечения этой плоскости со сторонами параллелепипеда – крайние точки плоскости, а так же коэффициенты этой плоскости. Максимальные и минимальные зенитный и азимутальный углы получены из анализа экспериментальных данных и записаны в файл.

Пара СМ	A	B	X_{\min}	X_{\max}	Y_{\min}	Y_{\max}	Z_{\min}	Z_{\max}
00-02	-1.679	10839	5315	6792	1915	-563	2570	5275
00-03	-0.859	8918	5238	7234	4416	2700	2570	5275
00-04	-0.576	9936	5213	7728	6931	5481	2570	5275
00-05	-0.434	11719	5209	7978	9457	8255	2570	5275
00-06	-0.158	13722	2981	6078	13250	12760	2570	5275
00-07	-0.001	13008	775	3883	13007	13003	2570	5275
01-02	-0.854	8222	7446	9450	1860	147	2570	5275
01-03	-0.437	7578	7418	10181	4333	3125	2570	5275
01-04	-0.293	9038	7420	10395	6861	5988	2570	5275
01-05	-0.221	11042	7427	10478	9401	8727	2570	5275
01-06	-0.001	13011	5184	8291	13006	13004	2570	5275
01-07	0.156	12297	2988	6087	12763	13247	2570	5275
02-06	0.180	12960	7442	10526	14296	14850	2570	5275
02-07	0.353	12404	5229	8125	14250	15272	2570	5275
03-06	0.225	15168	7438	10486	16841	17527	2570	5275
03-07	0.442	14472	5229	7984	16784	18002	2570	5275
04-06	0.301	17148	7430	10396	19384	20277	2570	5275
04-07	0.592	16215	5233	7719	19313	20785	2570	5275
05-06	0.455	18522	7429	0162	21904	23148	2570	5275
05-07	0.895	17112	5261	7195	21821	23552	2570	5275

Таблица 3.1 — Коэффициенты плоскостей и координаты точек пересечения

3.2 РОЗЫГРЫШ ТРЕКА

Рассмотрим функцию, реализующую розыгрыш случайного трека частицы. Функция получает на вход координаты крайних точек плоскости, максимальные и минимальные значения азимутального угла φ и косинуса зенитного угла $\cos(\theta)$.

Функция моделирует координаты точки на центральной плоскости, азимутальный угол φ и косинус зенитного угла $\cos(\theta)$.

Рассмотрим расчет координаты Z . Точки должны быть распределены по плоскости равномерно. Воспользуемся общим методом моделирования непрерывной величины. Для равномерного распределения плотность вероятности не зависит от Z и равняется константе $\rho(z) = C$. Константу можно найти из условия нормировки:

$$\int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \rho(z) dz = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} C dz = Z_{\max} - Z_{\min} = 1,$$
$$C = \frac{1}{Z_{\max} - Z_{\min}} = \rho(z).$$

Пусть на плоскости выбрана случайная точка $Z_{\text{сл}}$. Её можно промоделировать общим методом:

$$\int_{Z_{\min}}^{Z_{\text{сл}}} \rho(z) dz = \frac{Z_{\text{сл}} - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} = \gamma,$$

где γ – базовая случайная величина, которая равномерно принимает значения из интервала $(0;1)$. В программе γ разыгрывается отдельно для каждой случайной величины с помощью генератора “Вихрь Мерсена” [15].

Тогда координата Z случайной точки:

$$Z_{\text{сл}} = Z_{\min} + \gamma \cdot (Z_{\max} - Z_{\min}). \quad (3.3)$$

На рисунке 3.3 показано, как происходит расчет координат X и Y случайной точки. Пусть L – длина от точки $(X_{\min}; Y_{\min})$ до точки $(X_{\max}; Y_{\max})$, $L = \sqrt{(X_{\max} - X_{\min})^2 + (Y_{\max} - Y_{\min})^2}$, тогда расстояние от точки $(X_{\min}; Y_{\min})$

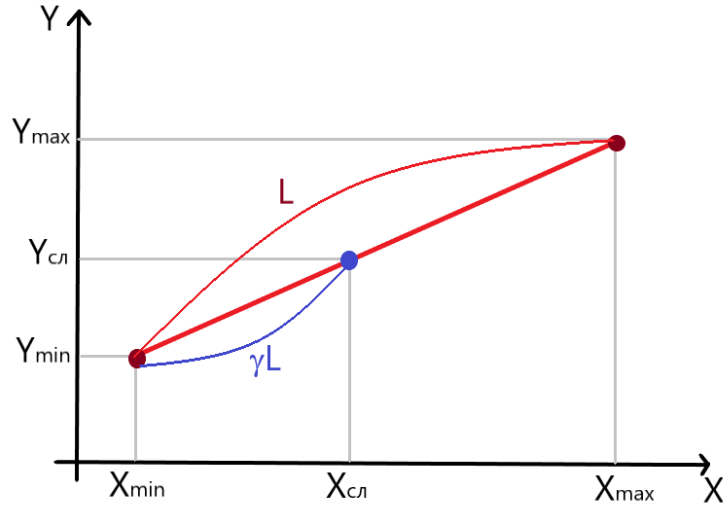


Рисунок 3.3 — Расчет координат случайной точки на прямой

до точки $(X_{сл}; Y_{сл})$ равно γL или

$$\gamma^2 L^2 = \gamma^2 \cdot ((X_{\max} - X_{\min})^2 + (Y_{\max} - Y_{\min})^2). \quad (3.4)$$

С другой стороны,

$$\gamma^2 L^2 = ((X_{сл} - X_{\min})^2 + (Y_{сл} - Y_{\min})^2). \quad (3.5)$$

Связь между X и Y : $Y = A \cdot X + B$, коэффициенты A и B приведены в таблице 2.1. Из (3.5) мы получили квадратное уравнение на $X_{сл}$, учтя, что

$$\begin{aligned} Y_{сл} &= A \cdot X_{сл} + B, \\ Y_{\min} &= A \cdot X_{\min} + B, \\ Y_{\max} &= A \cdot X_{\max} + B. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{сл}^2 \cdot (1 + A^2) - X_{сл} \cdot 2X_{\min}(1 + A^2) + \\ + (1 + A^2)((1 - \gamma^2)X_{\min}^2 + 2X_{\min}X_{\max}\gamma^2 - X_{\max}^2\gamma^2) = 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Дискриминант уравнения:

$$D = 4(1 + A^2)^2 \gamma^2 (X_{\min} - X_{\max})^2. \quad (3.7)$$

Координата случайной точки:

$$X_{\text{сл}}^{\pm} = \frac{2X_{\text{min}}(1 + A^2) \pm 2(1 + A^2)\gamma(X_{\text{min}} - X_{\text{max}})}{2(1 + A^2)} = \dots$$

$$\dots = X_{\text{min}} \pm \gamma(X_{\text{min}} - X_{\text{max}}), \quad (3.8)$$

$$X_{\text{min}} - X_{\text{max}} < 0,$$

$$X_{\text{сл}} > X_{\text{min}}.$$

Следовательно, нужно использовать следующее решение (3.8):

$$X_{\text{сл}} = X_{\text{min}} + \gamma(X_{\text{max}} - X_{\text{min}}). \quad (3.9)$$

Координата Y :

$$Y_{\text{сл}} = A \cdot X_{\text{сл}} + B. \quad (3.10)$$

Угол φ разыгрывается как непрерывная случайная величина на отрезке длины $\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}}$:

$$\varphi_{\text{сл}} = \varphi_{\text{min}} + \gamma \cdot (\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}}). \quad (3.11)$$

Рассмотрим розыгрыш треков по зенитному углу. Из формулы для светосилы (3.1) и формулы для элемента телесного угла $d\Omega$ следует, что плотность вероятности пропорциональна синусу зенитного угла $f(\theta) = G \sin(\theta)$. Из условия нормировки находим константу:

$$\int_{\theta_{\text{min}}}^{\theta_{\text{max}}} f(\theta) d\theta = \int_{\theta_{\text{min}}}^{\theta_{\text{max}}} G \sin(\theta) d\theta = -\cos(\theta) \Big|_{\theta_{\text{min}}}^{\theta_{\text{max}}} = \cos \theta_{\text{min}} - \cos \theta_{\text{max}},$$

$$G = \frac{1}{\cos \theta_{\text{min}} - \cos \theta_{\text{max}}},$$

$$f(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\cos \theta_{\text{min}} - \cos \theta_{\text{max}}}.$$

Тогда для случайного угла $\theta_{\text{сл}}$:

$$\int_{\theta_{\text{min}}}^{\theta_{\text{сл}}} \frac{\sin(\theta) d\theta}{\cos \theta_{\text{min}} - \cos \theta_{\text{max}}} = \gamma,$$

$$\gamma = \frac{\cos(\theta_{\min}) - \cos(\theta_{\text{сл}})}{\cos \theta_{\min} - \cos \theta_{\max}}.$$

Величина косинуса случайного угла и сам угол:

$$\cos(\theta_{\text{сл}}) = \cos(\theta_{\min}) - \gamma(\cos(\theta_{\min}) - \cos(\theta_{\max})), \quad (3.12)$$

$$\theta_{\text{сл}} = \arccos(\cos(\theta_{\min}) - \gamma(\cos(\theta_{\min}) - \cos(\theta_{\max}))). \quad (3.13)$$

Для построения трека необходимо знать две точки. Вторую точку можно взять на любом расстоянии R от точки на центральной плоскости, например, $R = 1000$ мм.

$$X_{\text{сл}_1} = X_{\text{сл}}, \quad Y_{\text{сл}_1} = Y_{\text{сл}}, \quad Z_{\text{сл}_1} = Z_{\text{сл}},$$

$$X_{\text{сл}_2} = X_{\text{сл}_1} + R \cdot \sin(\theta_{\text{сл}}) \cos(\varphi_{\text{сл}}), \quad (3.14)$$

$$Y_{\text{сл}_2} = Y_{\text{сл}_1} + R \cdot \sin(\theta_{\text{сл}}) \sin(\varphi_{\text{сл}}), \quad (3.15)$$

$$Z_{\text{сл}_2} = Z_{\text{сл}_1} + R \cdot \cos(\theta_{\text{сл}}). \quad (3.16)$$

3.3 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАННЫХ ТРЕКОВ

По описанному выше методу получены распределения промоделированных треков по азимутальному углу (рисунок 3.4) и зенитному углу (рисунок 3.5). Распределения построены для пары СМ01-СМ02, в примере всего промоделировано 10 000 000 треков. Распределение по азимутальному углу получено для направления движения частиц от СМ01 к СМ02. Максимум распределения примерно совпадает с максимумом распределения, построенному по экспериментальным данным.

Из рисунка 3.5 видно, что максимум распределения достигается при $\theta \approx 90^\circ$, то есть при околоразительных зенитных углах. В этом случае треки “видят” максимально возможную площадь детектора, то есть регистрируется наибольшее количество треков.

Таким образом, характер распределений говорит о том, что моделирование случайных треков проведено корректно.

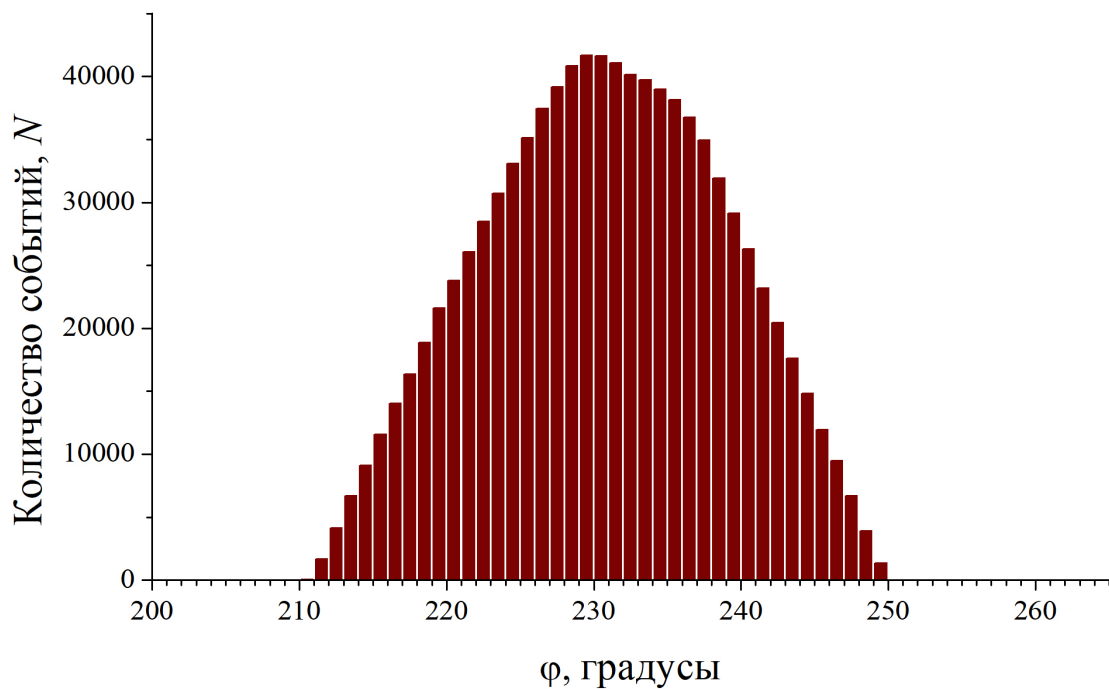


Рисунок 3.4 — Распределение промоделированных треков по азимутальному углу

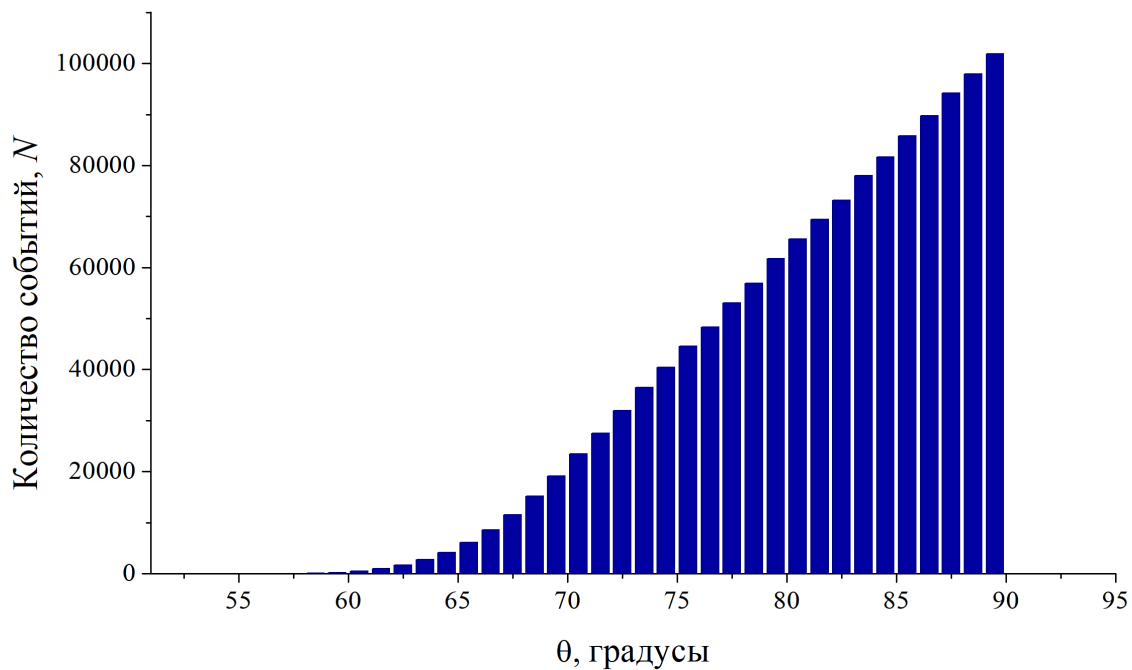


Рисунок 3.5 — Распределение промоделированных треков по зенитному углу

3.4 УСЛОВИЯ СРАБАТЫВАНИЯ СМ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦЫ

3.4.1 УСЛОВИЕ BOUND

Для уменьшения влияния краевых эффектов при регистрации моделированных событий была использована функция, проверяющая прохождение моделированного трека через внешние плоскости СМ не ближе 4 см от координат крайних стрипов – условие “BOUND”. Использована та же функция, что и в обработке экспериментальных данных.

3.4.2 УСЛОВИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТРЕКА ЧЕРЕЗ ТРУБКИ И ХОЛДЕРЫ

На рисунке 1.3 представлена внутренняя структура одной из восьми плоскостей СМ. Расчет координат элементов внутренней структуры идет от опорной точки ближайшей к бассейну плоскости каждого СМ. Координаты опорных точек, заложенные при установке детектора, представлены в таблице 2.2.

При расчете координат элементов внутренней структуры необходимо учесть смещения плоскостей СМ относительно номинальных положений (“SmeshDCR”). Оно обусловлено тем, что невозможно установить плоскости абсолютно параллельно друг другу. Поэтому реальные координаты опорных точек каждой плоскости были определены после начала работы детектора путем анализа экспериментальных данных. В таблице 3.2 представлены смещения опорных точек каждой плоскости каждого СМ относительно номинальных положений.

В строках 1 - 8 таблицы 3.2 записаны смещения опорных точек каждой плоскости каждого СМ по координате Z ($Z_{\text{смещ}}$). В строках 9, 10 и 15, 16 записаны смещения по координате X ($X_{\text{смещ}}$) для СМ00, СМ01, СМ06, СМ07 соответственно. В строках 11 - 14 – смещения по координате Y ($Y_{\text{смещ}}$) для СМ02, СМ03, СМ04 и СМ05. Тогда координаты опорных точек преобразуются следующим образом.

Плоскость	СМ00	СМ01	СМ02	СМ03	СМ04	СМ05	СМ06	СМ07
1	-11.21	-3.54	-14.59	-2.03	-6.97	-1.32	-8.18	2.11
2	-2.96	-2.20	-7.69	9.63	-14.93	7.48	-6.54	-2.45
3	-0.27	-3.55	-1.66	9.04	-7.90	-4.10	-8.87	0.33
4	-9.51	-1.07	3.03	9.86	-5.67	-3.41	-6.39	-0.46
5	-4.75	-2.11	3.69	3.71	-5.33	5.89	-4.00	0.89
6	-4.52	0.37	-4.25	6.57	-6.88	-3.52	-2.65	3.15
7	-7.23	-2.01	-9.94	-0.24	-6.41	-0.36	-1.13	1.38
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	-1.51	1.01	-0.14	-0.37	-0.87	-5.18	0.23	-2.67
10	-4.83	-1.23	-1.83	4.20	0.77	-1.15	-0.21	-2.38
11	-5.59	-1.35	-0.88	2.50	0.07	-3.11	0.90	-5.85
12	-3.78	-0.21	-0.39	-0.49	0.52	-1.29	-0.86	-4.42
13	-4.66	2.54	-0.05	4.53	-1.64	-0.50	0.85	-3.70
14	-4.55	-2.55	-2.89	0.89	-1.59	-2.57	0.15	-3.47
15	-4.33	-1.84	0.29	-2.22	0.44	-2.81	-2.28	-3.18
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Таблица 3.2 – Смещения опорных точек плоскостей СМ

Для СМ00, СМ01, СМ06 и СМ07:

$$X'_0 = X_0 + X_{\text{смещ}},$$

$$Z'_0 = Z_0 + Z_{\text{смещ}},$$

Для СМ02, СМ03, СМ04 и СМ05:

$$Y'_0 = Y_0 + Y_{\text{смещ}},$$

$$Z'_0 = Z_0 + Z_{\text{смещ}},$$

Ниже приведены формулы для расчета координат вершин трубок. Сначала были определены координаты центров трубок.

Для СМ00-СМ01:

$$X_{\text{центр}} = X'_0,$$

$$Y_{\text{центр}} = Y_0 - 60.00 \cdot t, \quad t = 0 \div 8,$$

$$Z_{\text{центр}} = Z'_0 + 9.95 \cdot i + 3.15 \cdot \left[\frac{i}{8} \right] + 4.29 \cdot \left[\frac{i}{16} \right], \quad i = 0 \div 255,$$

здесь t – номер плоскости, i – номер трубки в плоскости, квадратные скобки обозначают целую часть от деления.

Для СМ02-СМ05:

$$X_{\text{центр}} = X_0 + 60.00 \cdot t, \quad t = 0 \div 8,$$

$$Y_{\text{центр}} = Y'_0,$$

$$Z_{\text{центр}} = Z'_0 + 9.95 \cdot i + 3.15 \cdot \left[\frac{i}{8} \right] + 4.29 \cdot \left[\frac{i}{16} \right], \quad i = 0 \div 255,$$

Для СМ06-СМ07:

$$X_{\text{центр}} = X'_0,$$

$$Y_{\text{центр}} = Y_0 + 60.00 \cdot t, \quad t = 0 \div 8,$$

$$Z_{\text{центр}} = Z'_0 + 9.95 \cdot i + 3.15 \cdot \left[\frac{i}{8} \right] + 4.29 \cdot \left[\frac{i}{16} \right], \quad i = 0 \div 255.$$

Далее были рассчитаны координаты вершин трубок.

Для СМ00-СМ01:

$$X = X_{\text{центр}} + 3108.75 \cdot \left[\frac{q}{2} \right], \quad q = 0 \div 3,$$

$$Y = Y_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{\left(\left[\frac{q}{2} \right] - q \bmod 2 \right)}, \quad q = 0 \div 3,$$

$$Z = Z_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{p+1}, \quad p = 0 \div 1,$$

здесь q – номер точки в плоскости, $p = 0$ – нижняя плоскость трубки, $p = 1$ – верхняя плоскость трубки, “mod” – целочисленный остаток от деления.

Для СМ02-СМ05:

$$X = X_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{\left(\left[\frac{q}{2} \right] - (q \bmod 2) + 1 \right)}, \quad q = 0 \div 3,$$

$$Y = Y_{\text{центр}} + 3108.75 \cdot \left[\frac{q}{2} \right], \quad q = 0 \div 3,$$

$$Z = Z_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{p+1}, \quad p = 0 \div 1,$$

Для СМ06-СМ07:

$$X = X_{\text{центр}} - 3108.75 \cdot \left[\frac{q}{2} \right], \quad q = 0 \div 3,$$

$$Y = Y_{\text{центр}} + Y_0 + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{\left(\left[\frac{q}{2} \right] - (q \bmod 2) + 1 \right)}, \quad q = 0 \div 3,$$

$$Z = Z_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{p+1}, \quad p = 0 \div 1.$$

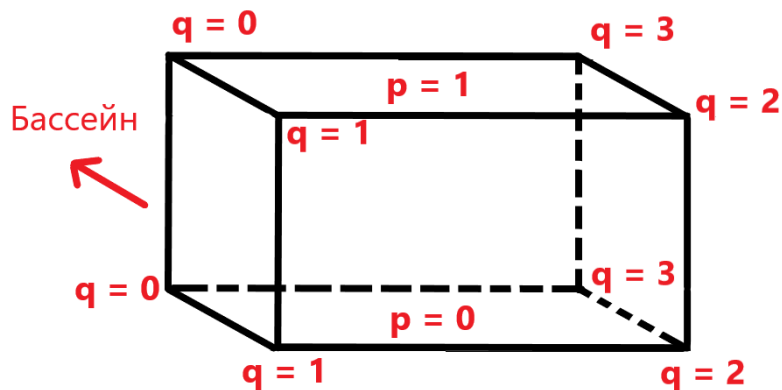


Рисунок 3.6 — Номера вершин трубки

На рисунке 3.6 показано, как пронумерованы точки в трубке.

Если трек частицы проходит между трубками или между камерами, тогда плоскость не регистрирует его. Аналогично с холдерами: если трек проходит через холдер, плоскость его не регистрирует.

Для учета внутренней структуры СМ было написано две функции на языке С++. Первая рассчитывает координаты вершин всех трубок и холдеров с учетом смещения плоскостей относительно номинальных положений и сохраняет эти координаты в соответствующие массивы. Вторая определяет, через какую камеру проходит трек частицы в каждой плоскости, и поочередно проверяет пересечение треком трубок и холдеров. Для каждого СМ функция запускается отдельно.

Считается, что СМ зарегистрировал частицу, если сработало не менее двух четных и двух нечетных плоскостей, а в сумме – не менее пяти. Если условие выполнено функция возвращает значение “true”, если нет – “false”.

3.4.3 УЧЕТ ОТКЛЮЧЕННЫХ ПОЛУКАМЕР

С течением времени некоторые трубки выходят из строя из-за утечки газа или неисправности электроники. Полукамеры, в которых много неработающих трубок, отключают. По окончании каждого текущего экспериментального набора в специальные файлы записывается информация о количестве срабатываний стрипов каждой плоскости для всех СМ – N_{LAM} . Обработав эти файлы, можно построить график числа срабатыва-

ний Y-стрипов. На рисунке 3.7 представлен пример такого графика для нулевой плоскости СМ00 для одного набора.



Рисунок 3.7 — Число срабатываний стрипов N_{LAM} для нулевой плоскости СМ00

Для проверки работоспособности полукамер была написана специальная программа. Для каждой плоскости СМ вычисляется среднее значение числа срабатываний стрипов ($\langle N_{LAM} \rangle$). Значение N_{LAM} , соответствующее каждой трубке, сравнивается с половиной среднего значения. Если N_{LAM} меньше, то считается что трубка не работает, если больше – работает. Если в полукамере не работают все 8 трубок, считается, что полукамера отключена. Информация о состоянии полукамер записывается в специальный массив в виде нулей и единиц: “0” – полукамера отключена, “1” – полукамера работает, массив содержит информацию по всем обрабатываемым сериям и наборам.

Учет неработающих трубок в программе расчета светосилы реализован следующим образом: задается номер набора, который считается основным, далее для моделированного трека определяется номер полукамеры в каждой плоскости. Перед проверкой срабатывания плоскости СМ, описанной в предыдущем пункте, проверяется, является полукамера работающей

или нет. В первом случае проверяется срабатывание плоскости с учетом внутренней структуры, во втором – плоскость считается несработавшей.

3.5 ПРОВЕРКА КОРРЕКТНОСТИ УЧЕТА ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

Необходимо проверить корректность введения внутренней структуры СМ.

Для проверки корректности учета промежутков между полукамерами, камерами и отключенных полукамер в моделировании можно построить зависимость нормированного количества моделированных треков, отобранных по зенитному углу в интервале $87.5^\circ < \theta < 90^\circ$, от координаты Z и сравнить с аналогичной зависимостью для экспериментальных событий. Гистограмма записана с шагом 5 мм по Z . Сравнение представлено на рисунке 3.8.

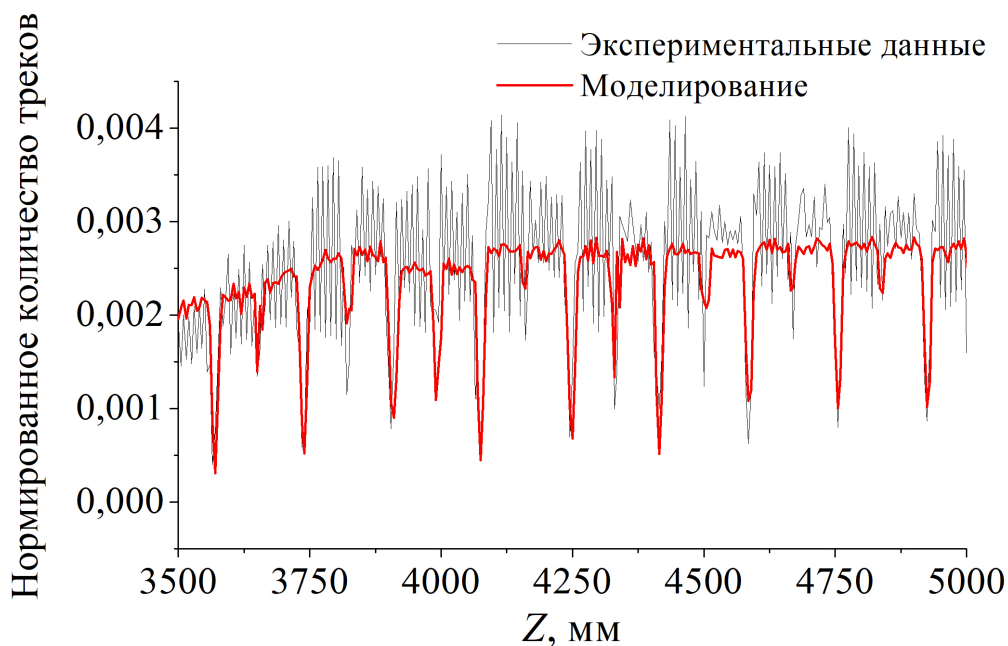


Рисунок 3.8 — Сравнение количества моделированных и экспериментальных треков по координате Z для СМ00

Проверить правильность введения холдеров можно построив аналогичную зависимость от координаты X , отобразив треки во азимутальном

углу в интервале $87.5^\circ < \varphi < 92.5^\circ$. Результаты сравнения представлены на рисунке 3.9. Гистограмма записана с шагом 5 мм по X .

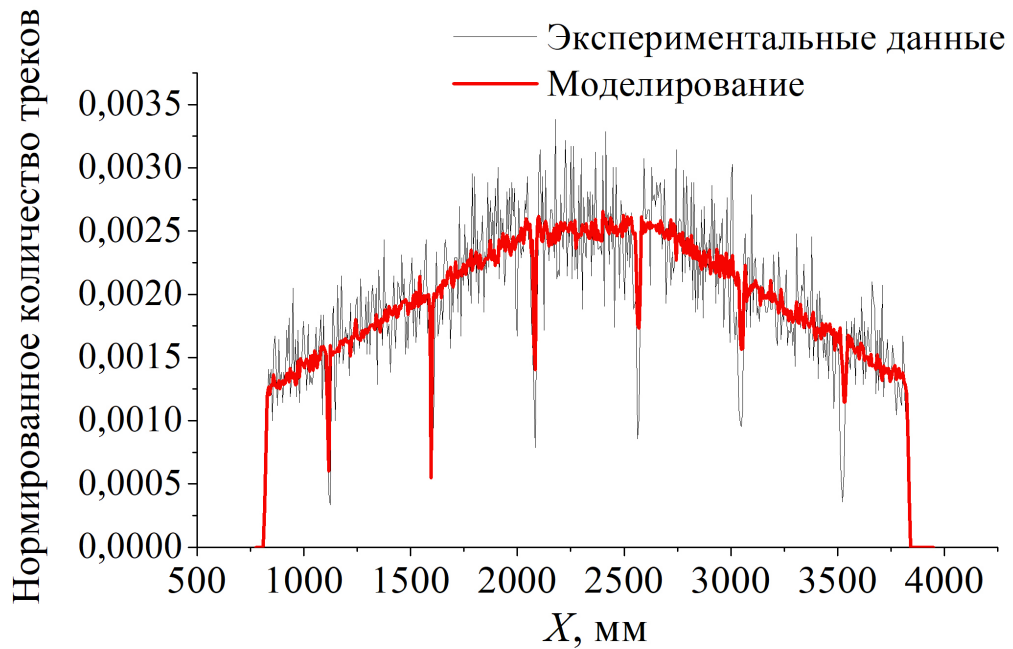


Рисунок 3.9 — Сравнение количества моделированных и экспериментальных треков по координате X для СМ00

Данные проверки проводятся на парах СМ00-СМ07 и СМ001-СМ06, так как они дают возможность отобрать треки мюонов, практически перпендикулярные к плоскостям СМ. По представленным графикам видно, что моделирование корректно отражает внутреннюю структуру СМ.

3.6 СВЕТОСИЛА

Светосила установки была рассчитана для каждой пары СМ по формуле (3.2). На графиках 3.10 и 3.11 представлены полученные значения светосилы пары СМ01-СМ02 по азимутальному и зенитному углам как с учетом внутренней структуры СМ, так и без. На рисунке 3.12 показана матрица светосилы этой пары с учетом внутренней структуры СМ.

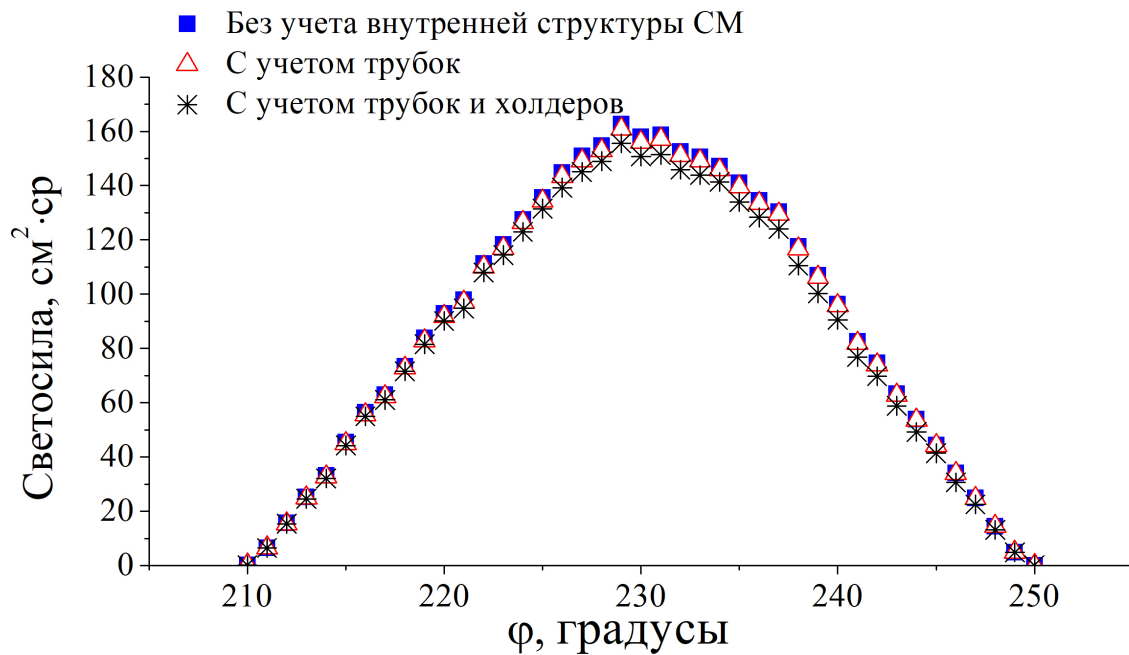


Рисунок 3.10 — Зависимость светосилы пары СМ01-СМ02 от азимутально-го угла

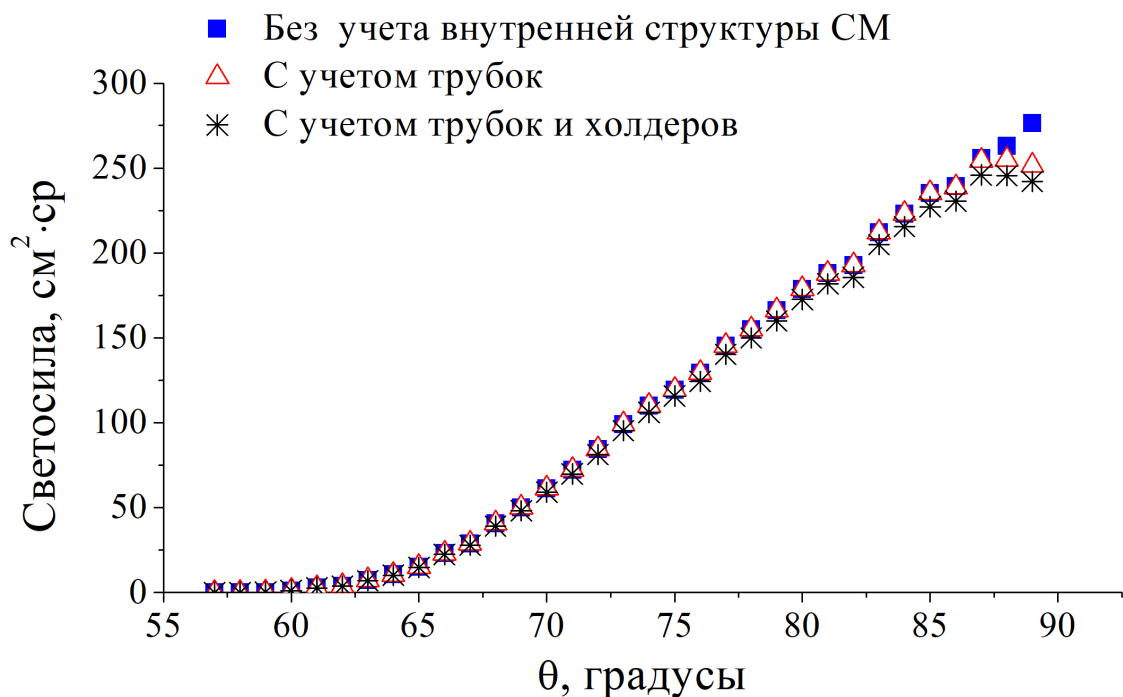


Рисунок 3.11 — Зависимость светосилы пары СМ01-СМ02 от зенитного угла

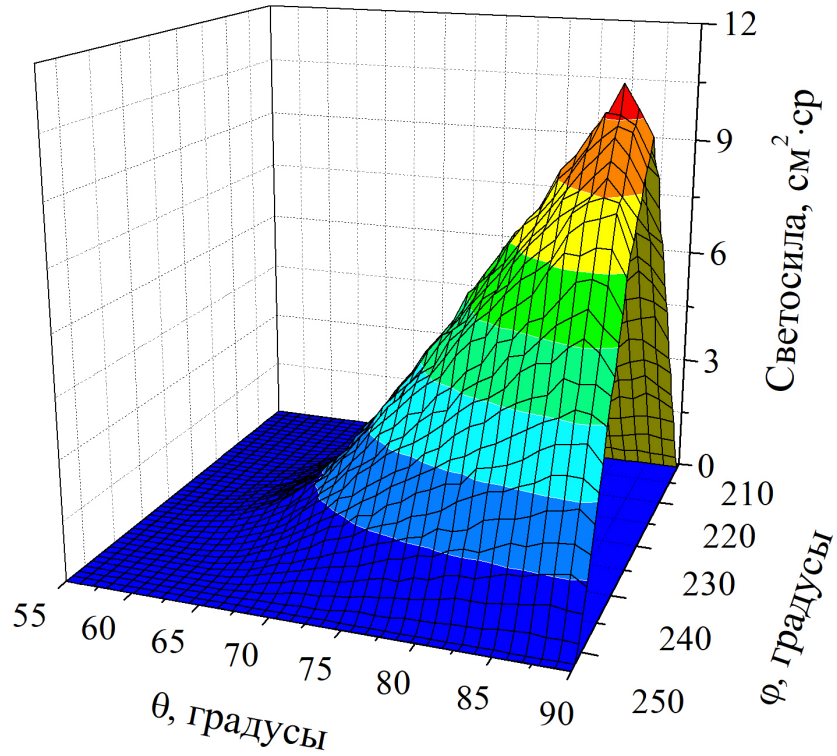


Рисунок 3.12 — Зависимость светосилы пары СМ01-СМ02 от зенитного и азимутального углов

Погрешность светосилы вычислена по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) = \\ C \sqrt{\left(\frac{\partial S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})}{\partial N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})}\right)^2 N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) + \left(\frac{\partial S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})}{\partial N_{\text{непер}}}\right)^2 N_{\text{непер}}} = \\ \dots = C \frac{\sqrt{N_{\text{total}} \cdot N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})(N_{\text{total}} - N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}))}}{(N_{\text{total}})^2}, \quad (3.17) \end{aligned}$$

так как

$$\begin{aligned} S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) = C \frac{N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})}{N_{\text{total}}} = \\ = C \frac{N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})}{N_{\text{непер}} + N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})}, \quad (3.18) \end{aligned}$$

где $N_{\text{пер}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})$ – количество треков частиц, зарегистрированных па-

рой СМ с учетом выполнения перечисленных выше условий в данных угловых и энергетических интервалах; $N_{\text{нерег}}$ – количество незарегистрированных треков; N_{total} – общее количество моделированных треков. $C = S_{\text{plane}} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta \cos(\theta) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$.

На графиках представлены значения светосилы с погрешностью, она укладывается в размеры точек.

4 ИНТЕГРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА МЮОНОВ

Проанализировав экспериментальные данные и рассчитав светосилу установки, удалось измерить интегральную интенсивность потока мюонов для разных пар СМ. Интенсивность была рассчитана по формуле (1).

Мюоны, зарегистрированные разными парами СМ, преодолевают разный путь в веществе здания и бассейна и, следовательно, обладают разными пороговыми энергиями. В расчете интенсивности данные пар СМ с близкими пороговыми энергиями, например СМ00-СМ06 и СМ01-СМ07, были объединены с целью увеличения статистики. В таблице 4.1 представлено соответствие пороговых энергий $E_{\text{пор}}$ парам СМ, “живое время” T , диапазоны по зенитному углу.

Интенсивность потока мюонов не должна зависеть от азимутального угла, так как поток мюонов практически не зависит от азимутального направления прилета мюона. Для проверки этого факта были построены зависимости интегральной интенсивности от азимутального угла при фиксированных пороговых энергиях $E_{\text{пор}}$ и зенитных углах θ . На рисунках представлены зависимости интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговых энергий $E_{\text{пор}} = 1.7$ ГэВ (рисунок 4.1), $E_{\text{пор}} = 4.2$ ГэВ (рисунок 4.2), $E_{\text{пор}} = 5.4$ ГэВ (рисунок 4.3). Погрешность интенсивности укладывается в размеры точек. Линиями обозначены средние арифмети-

$E_{\text{пор}}$, ГэВ	Пары СМ	θ	T , час
1.7	01-02	$65^\circ - 89^\circ$	33300
4.2	00-04,04-07	$80^\circ - 89^\circ$	
5.4	00-05,03-07	$82^\circ - 89^\circ$	
7.2	00-06,01-07	$84^\circ - 89^\circ$	

Таблица 4.1 — Пороговые энергии, диапазоны зенитных углов, “живое время” для разных пар СМ

ческие взвешенные значения. Они рассчитываются для каждого зенитного угла по формуле:

$$\langle I \rangle = \frac{\sum_{\varphi} I_{\varphi} / \Delta I_{\varphi}^2}{\sum_{\varphi} 1 / \Delta I_{\varphi}^2}, \quad (4.1)$$

где I_{φ} – значение интенсивности для азимутального угла φ ; ΔI_{φ} – его погрешность.

Погрешность среднего арифметического взвешенного значения вычислена по формуле:

$$\Delta \langle I \rangle = \sqrt{\frac{1}{\sum_{\varphi} 1 / \Delta I_{\varphi}^2}}. \quad (4.2)$$

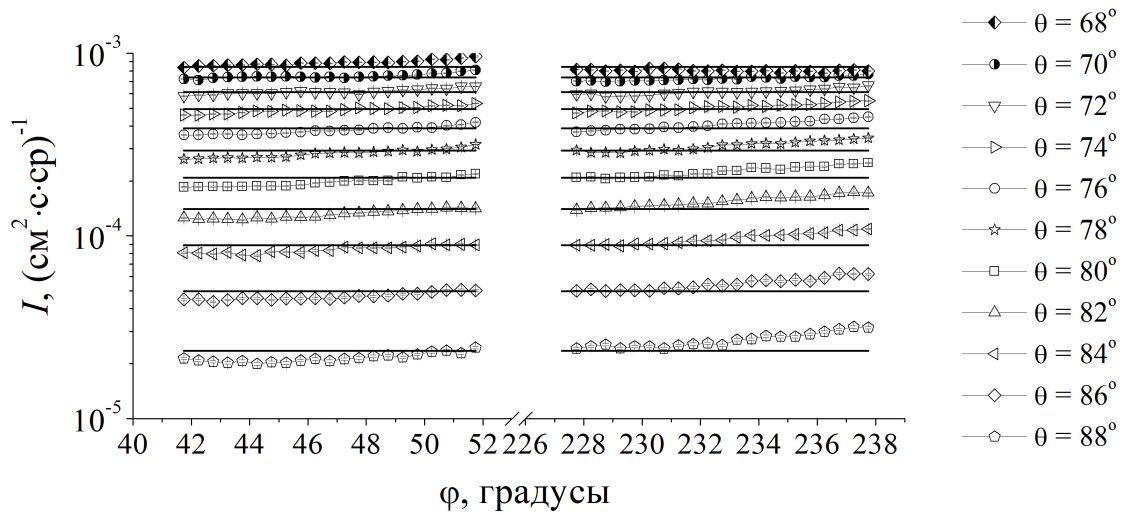


Рисунок 4.1 — Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговой энергии 1.7 ГэВ

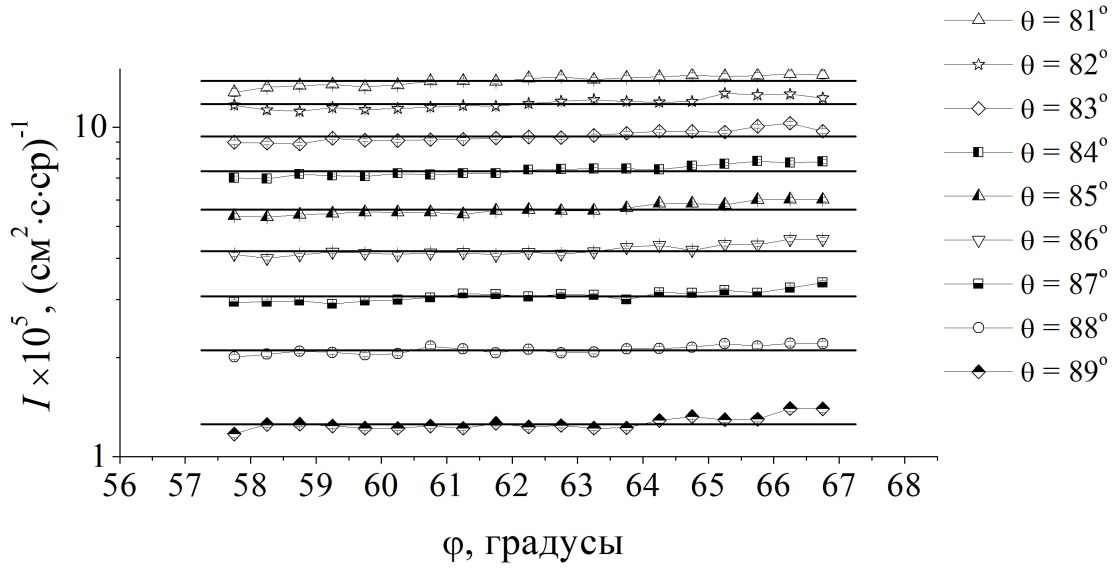


Рисунок 4.2 — Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговой энергии 4.3 ГэВ

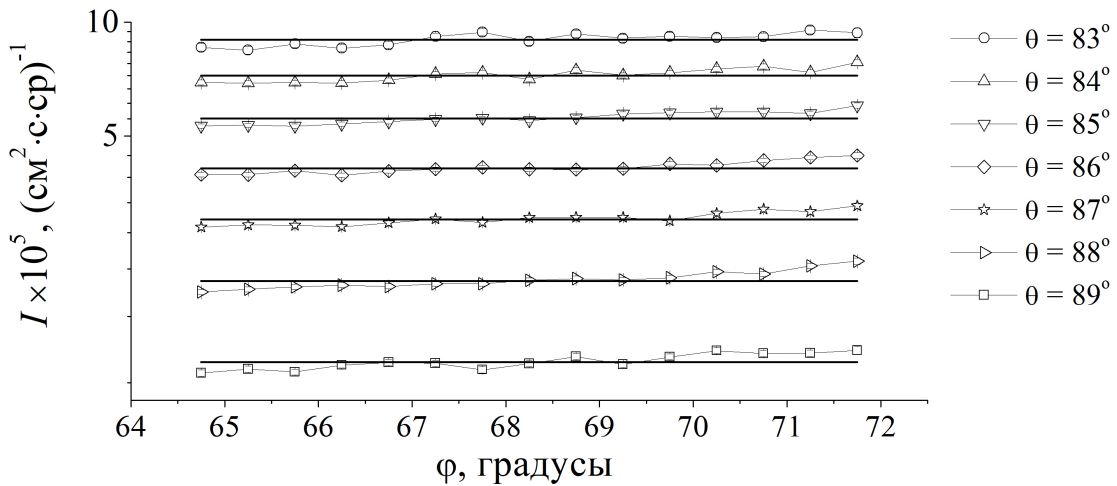


Рисунок 4.3 — Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговой энергии 5.4 ГэВ

В таблице 4.2 представлены результаты измерения интегральной интенсивности для разных пороговых энергий $E_{\text{пор}}$ и зенитных углов θ .

θ	$E_{\text{пор}}, \text{ГэВ}$			
	1.7	4.2	5.4	7.2
65°	9.3 ± 0.4			
66°	9.2 ± 0.4			
67°	8.9 ± 0.3			
68°	8.4 ± 0.3			
69°	7.9 ± 0.3			
70°	7.3 ± 0.3			
71°	6.7 ± 0.3			
72°	6.1 ± 0.2			
73°	5.5 ± 0.2			
74°	5.0 ± 0.2			
75°	4.4 ± 0.2			
76°	3.9 ± 0.2			
77°	3.4 ± 0.1			
78°	2.9 ± 0.1			
79°	2.5 ± 0.1			
80°	2.1 ± 0.1	1.7 ± 0.2		
81°	1.7 ± 0.1	1.5 ± 0.2		
82°	1.4 ± 0.1	1.3 ± 0.2	1.0 ± 0.2	
83°	1.13 ± 0.04	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1	
84°	0.89 ± 0.03	0.8 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.65 ± 0.06
85°	0.68 ± 0.03	0.60 ± 0.08	0.56 ± 0.09	0.54 ± 0.06
86°	0.50 ± 0.02	0.45 ± 0.06	0.41 ± 0.07	0.43 ± 0.04
87°	0.35 ± 0.01	0.33 ± 0.04	0.30 ± 0.05	0.32 ± 0.03
88°	0.23 ± 0.01	0.22 ± ±0.03	0.21 ± 0.03	0.22 ± 0.02
89°	0.15 ± 0.01	0.129 ± 0.016	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.01

Таблица 4.2 — Значения интегральной интенсивности мюонов при разных зенитных углах при указанных пороговых энергиях ($\times 10^4 (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$)

На рисунке 4.4 представлен график зависимости интегральной интенсивности от зенитного угла θ при разных пороговых энергиях $E_{\text{пор}}$. Приведены значения, полученные в данной работе, и значения, полученные в работе А. Н. Дмитриевой $I_{\text{дан}}$ [5]. Для сравнения нынешних результатов с предыдущими было рассчитано их отношение R по формуле (4.3), а также рассчитана ошибка по формуле (4.4). На рисунке 4.5 представлена зависимость отношения R от зенитного угла для разных пороговых энергий.

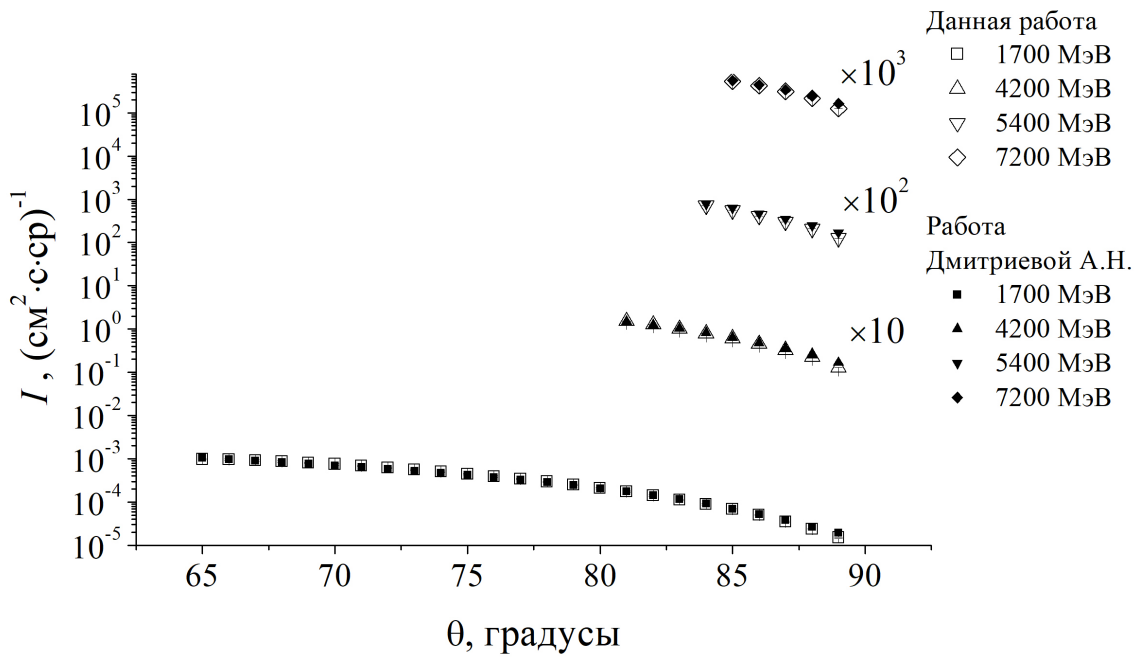


Рисунок 4.4 — Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла при разных значениях пороговой энергии

$$R = \frac{I(\theta)}{I_{\text{дан}}(\theta)}. \quad (4.3)$$

Погрешность отношения R :

$$\Delta R = \sqrt{\frac{1}{(I_{\text{дан}})^2} \Delta I^2 + \left(\frac{I}{(I_{\text{дан}})^2} \right)^2 (\Delta I_{\text{дан}})^2}. \quad (4.4)$$

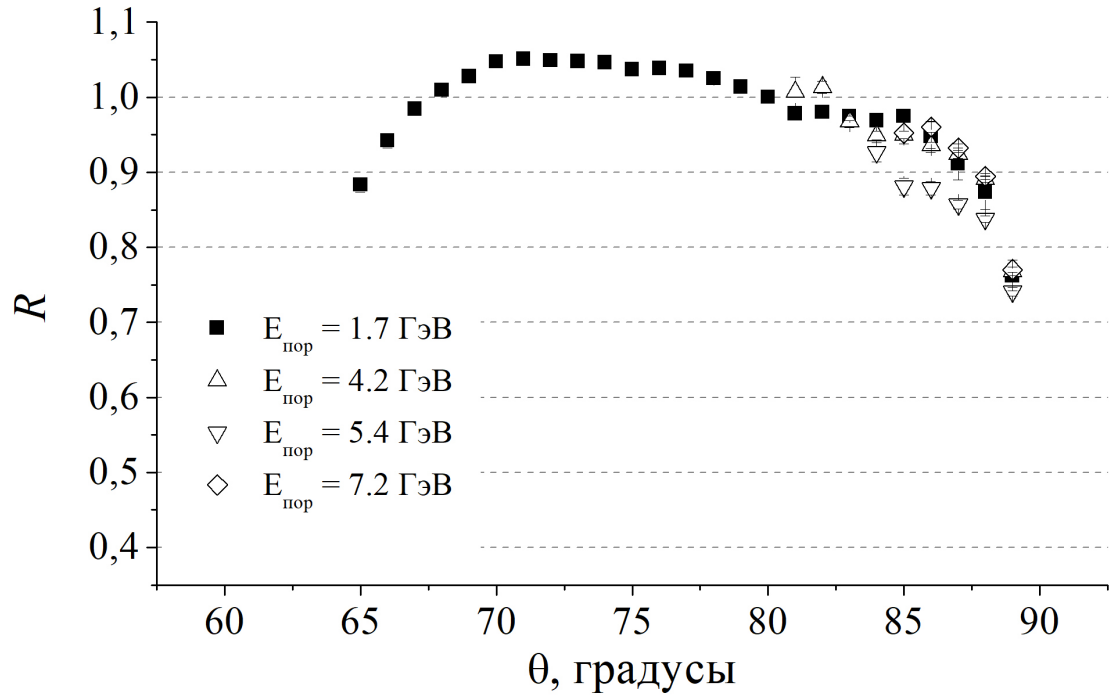


Рисунок 4.5 — Сравнение результатов, полученных в данной работе, с результатами А. Н. Дмитриевой [5]

Сравнение показало, что результаты данной работы и работы [5] расходятся. Наилучшее согласие (в пределах 5 %) показали пары СМ01-СМ02 в диапазоне $67^\circ < \theta < 86^\circ$ и пары СМ00-СМ04 и СМ04-СМ07 в диапазоне $81^\circ < \theta < 85^\circ$. Для пар СМ00-СМ05, СМ03-СМ07 в диапазоне $84^\circ < \theta < 88^\circ$ и для пар СМ00-СМ06 и СМ01-СМ07 $85^\circ < \theta < 88^\circ$ результаты согласуются в пределах 16 % и 10 % соответственно. При больших зенитных углах для всех расхождения увеличиваются до 25 %. Такое расхождение результатов, скорее всего, вызвано рядом причин. Одна из них – значительное увеличение статистики (примерно в 10 раз). Кроме того была более точно учтена внутренняя структура СМ при расчете светосилы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа была посвящена измерению интегральной интенсивности потока мюонов космических лучей при больших зенитных углах по данным координатного детектора ДЕКОР. Эта задача была выполнена в виде трех последовательных этапов, которые описаны в главах 2, 3 и 4.

На первом этапе были проанализированы экспериментальные данные, набранные за 33 тыс. часов работы установки. Был выбран временной интервал кратный году, что позволило нивелировать воздействие атмосферных эффектов. Для обработки экспериментальных данных была написана специальная программа. Она осуществляет отбор треков мюонов с учетом условия “BOUND”, которое необходимо для уменьшения краевых эффектов, а также рассчитывает пороговую энергию мюона. Все экспериментальные события, прошедшие отбор, были записаны в специальные массивы. Построены распределения треков мюонов по зенитному и азимутальному углам. Для каждой пары супермодулей определены максимальные и минимальные зенитный и азимутальный углы.

На следующем этапе с помощью Монте-Карло моделирования была рассчитана светосила установки. Написана программа, моделирующая поток случайных треков через выбранную пару супермодулей, направления случайных треков разыгрываются в угловых интервалах, определенных в эксперименте. Программа расчета светосилы аналогично программе обработки экспериментальных данных определяет возможность регистрации трека мюона парой супермодулей с учетом условия “BOUND” и рассчитывает пороговую энергию мюона. Дополнительно программа проверяет возможность регистрации трека супермодулем с учетом его внутренней структуры. Все моделированные события, прошедшие отбор, записаны в такие же массивы, как и экспериментальные события. Построены распределения моделированных событий по зенитному и азимутальному углам. Рассчитана светосила установки для каждой пары супермодулей. Значе-

ния светосилы для каждой пары супермодулей записаны в специальные массивы.

Заключительным этапом стало измерение интенсивности потока мюонов. Измерены интегральные интенсивности для нескольких значений пороговой энергии: $E_{\text{пор}} = 1.7$ ГэВ, $E_{\text{пор}} = 4.2$ ГэВ, $E_{\text{пор}} = 5.4$ ГэВ и $E_{\text{пор}} = 7.2$ ГэВ. Ценность полученных результатов заключается в первую очередь в значительном увеличении статистики по сравнению с предыдущей работой, а также в более детальном учете внутренней структуры супермодулей.

Результаты данной работы были представлены на IX Международной молодежной научной школе-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

В дальнейшем планируется продолжить работу по данной теме в рамках магистратуры НИЯУ МИФИ. Будут рассмотрены дополнительные значения пороговых энергий, проведен более детальный анализ условий обработки экспериментальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The Review of Particle Physics. — 2022. — Дата обращения 02.06.2022. <https://pdg.lbl.gov/>.
2. Мюонная диагностика магнитосферы и атмосферы Земли. Лабораторный практикум. / И.И.Астапов [и др.]. — М.: НИЯУ МИФИ, 2014.
3. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей / Н.С.Барбашина [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2000. — № 6. — С. 20—24.
4. Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД». — 2021. — Дата обращения 02.06.2022. <http://ununevod.mephi.ru/ru/>.
5. *А.Н.Дмитриева*. Интенсивность потока и энергетический спектр мюонов космических лучей под большими зенитными углами. Кандидатская диссертация, НИЯУ МИФИ / А.Н.Дмитриева. — НИЯУ МИФИ, 2008.
6. *D.Munteanu, S.Moindjie, J.L.Autran*. A water tank muon spectrometer for the characterization of low energy atmospheric muons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Т. 933. — С. 12—17.
7. *A.Barber, D.Kieda, Springer R.* Measurement of the Integral Intensity of Near Horizontal Muons with HAWC // PoS. — 2021. — Т. ICRC2019. — С. 187.
8. Cosmic Ray Radiography of the Damaged Cores of the Fukushima Reactors / К.Вороздин [и др.] // Physical Review Letters. — 2012. — Т. 109, № 15.

9. Перспективы исследований геологических структур методом мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов. / Л.Г.Деденко [и др.] // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2014. — № 8.
10. Канадцы использовали мюонный детектор для поиска урана. — 2021. — Дата обращения 08.06.2022. <https://strana-rosatom.ru/2021/08/31/mjuony-pomogut-najti-uran/>.
11. *Alvarez W.* Search for hidden chambers in the pyramids. // Science. — 1970. — № 8.
12. Scan Pyramids. — 2022. — Дата обращения 07.06.2022. <http://www.scanpyramids.org/>.
13. *В.В.Подбельский.* Язык C++. — М.: Финансы и статистика, 2001.
14. *D.E.Groom, N.V.Mokhov, S.I.Striganov.* Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV // Atomic Data and Nuclear Data Tables. — 2001. — № 78. — С. 183–365.
15. *M.Matsumoto, T.Nishimura.* Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Unifor Pseudo-Random Number Generator // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. — 1998. — Т. 8, № 1. — С. 3–30.