

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 физики элементарных частиц (№40)

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Анализ мюонного фона в эксперименте DEAR-3600

Научный руководитель

Мачулин И.Н.

Студент

Токарева П.С.

Москва 2022

Содержание

1	Введение	2
2	Детектор DEAP-3600	2
2.1	Конструкция детектора	2
2.2	Состав фона в эксперименте	4
2.3	Нейтронный фон	4
2.4	Космогенные нейтроны и мюонное вето	5
3	Методы подсчёта потока мюонов, долетающего до подземной лаборатории	5
3.1	Метод 1 - Экстраполяция ранних экспериментальных данных	5
3.2	Метод 2 - Использование Depth-Intensity-Relation(DIR)	5
3.3	Метод 3 - MUTE	6
4	MUTE - MUon inTensity code	6
4.1	MCEq	8
4.2	PROPOSAL	8
4.3	Модели генерации космических лучей	8
4.3.1	Global Spline Fit	8
4.3.2	HillasGaisser2012	9
4.3.3	GaisserHonda	9
4.3.4	ZatsepinSokolskaya	9
4.3.5	ZatsepinSokolskaya (PAMELA)	10
4.3.6	SimplePowerlaw27	10
4.4	Модели взаимодействия адронов	10
4.4.1	Sibyll	10
4.4.2	EPOS LHC и QGSJETII-03(04)	12
4.4.3	DDM	12
4.4.4	DMPJET-III	12
5	Проделанная работа	13
5.1	Выбор моделей космических лучей и моделей взаимодействия адронов	13
5.2	Определение параметров, необходимых для вычислений	13
5.3	Тензор вероятности выживания	14
5.4	Расчёт полного потока мюонов	15
6	Заключение	15

1 Введение

В настоящее время существует множество исследований, которые указывают на то, что тёмная материя составляет около 27% от всей массы-энергии Вселенной. Для сравнения, барионная материя составляет всего лишь 5% от этой энергии. В то же время не смотря на такое огромное содержание, тёмная материя до сих пор не была напрямую зафиксирована в наземных экспериментах. Множество теоретических моделей предсказывают существование частиц с подходящими свойствами. Одной из таких является WIMP (Weakly Interacting Massive Particle). Согласно теоретическим моделям, неупругое взаимодействие WIMP-ов с ядрами вызывает слабоэнергетическую (≤ 100 кэВ) ядерную отдачу. Эксперименты по поиску таких частиц направлены в основном на наблюдение данного явления, что очень сложно сделать, вследствие ограничений на сечение взаимодействия, которое составляет менее чем $9.0 * 10^{-47}$ см² на 100 ГэВ/c² при 90% уровне согласия [4].

Для определения столь редких низкоэнергетических сигналов нужна мишень с высокой массой и крайне низким уровнем шумов. Как показывают предшествующие эксперименты, на такую роль очень хорошо подходит жидкий аргон (LAr), который и используется в эксперименте DEAP-3600.

2 Детектор DEAP-3600

Детектор DEAP-3600 находится на глубине 2 километра (6 километров в водном эквиваленте) в подземной лаборатории SNOLAB (Садбери, Канада).

2.1 Конструкция детектора

поперечный разрез установки изображен на рис.1.

В первую очередь детектор состоит из сверхчистого жидкого аргона, содержащегося в поглощающем ультрафиолет(UVA) акриловом резервуаре(AV) диаметром примерно 1.7м. Верхние 30 см данного резервуара заполнены газообразным аргоном. Резервуар окружен 255 акриловыми световыми трубками длиной 45 см, соединенными с фотоэлектронными умножителями. Пространство между световыми трубками заполнено слоями различного полиэтилена высокой плотности, которые выполняют 2 задачи: во-первых, служат пассивной преградой между нейтронами и компонентами детектора; во-вторых, обеспечивают температурную изоляцию.

Внутренняя поверхность резервуара покрыта слоем тетрафенилбутадиена (ТПБ), который преобразует 128 нм излучение от сцинтилляций в LAr в излучение видимого спектра, длина которого достигает 420 нм.

Верхняя часть резервуара соединена с длинным горлышком из нержавеющей стали, которое соединено с Glove box. Вдоль горлышка располагается заполненная жидким азотом (LN₂) охлаждающая спираль из нержавеющей стали, которая заставляет

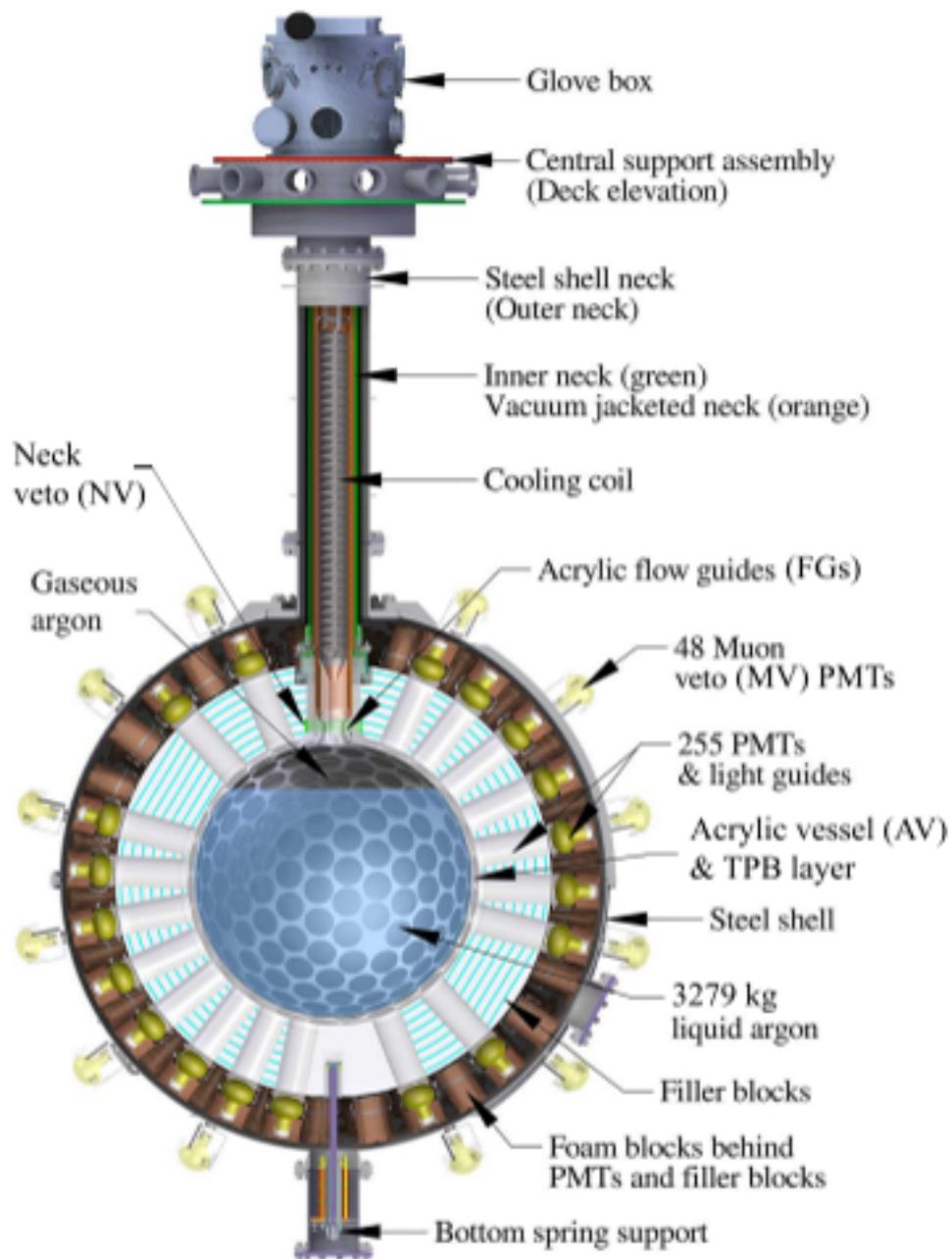


Рис. 1: Поперечное сечение компонентов детектора DEAP-3600

газообразный азот конденсировать при попадании в данный объем и впоследствии по специальным трубкам возвращаться в резервуар.

Также верхняя часть резервуара обложена оптоволокном, которое соеденено с 4-мя фотоумножителями, которые используются для отслеживания любого видимого света в светонечувствительной области детектора.

Вся вышеперечисленная конструкция детектора содержится в сфере из нержавеющей стали, погружённой в водный резервуар 7.8 м в высоту и 7.8 м в диаметре, на внешней поверхности которого расположены 48 фотоумножителей. Данные фотоумножители составляют Мюонное веет, которое создано для отслеживания фона космогенного происхождения. [3]

2.2 Состав фона в эксперименте

Источниками для событий, похожих своим сигналом на прохождение WIMP-а, в детекторе может быть целый ряд фонов. В данном эксперименте общий фон складывается из следующих событий:

1. события от ER;
2. Черенковское свечение, вызванное в акриле;
3. нейтроны, полученные в ходе альфа-распадов;
4. нейтроны, полученные в ходе взаимодействия мюонов из атмосферы с детектором и его окружением;
5. альфа-распады на границе резервуара;
6. альфа-распады в других частях конструкции детектора.

В данной работе подробно рассматривается вклад в фон нейтронов, а конкретно космогенных нейтронов.

2.3 Нейтронный фон

Нейтроны могут рассеиваться на ядрах агрона и создавать ядерную отдачу точно такую же, как и ожидается от WIMP-ов, которая тем не менее отличается по, например, своей пространственной распространённости. Это и другие различия позволяют достаточно точно предсказать порядок она и исключить по возможности нейтроны из рассмотрения.

Как уже было сказано ранее нейтроны, долетающие ло детектора, имеют 2 причины возникновения: радиогенную и космогенную. О второй мы и поговорим подробнее далее.

2.4 Космогенные нейтроны и мюонное вето

Космогенные нейтроны рождаются при взаимодействии высокоэнергетичных мюонов из атмосферы при взаимодействии с элементами детектора и его окружения. ПВ в нашем случае подземное расположение лаборатории сильно уменьшает поток мюонов, достигающих детектора. Те же мюоны, что долетают до детектора отслеживаются либо при непосредственном прохождении через Мюонное вето, либо при прохождении через мюонное вето продуктов электромагнитного ливня, вызванного прохождением мюонов. Полный поток мюонов, посчитанный таким образом составляет $(3 - 4) \times 10^{-10}$ мюонов/см²/с, что не противоречит потоку $(3.31 \pm 0.10) \times 10^{-10}$ мюонов/см²/с, измеренному в SNO [2].

3 Методы подсчёта потока мюонов, долетающего до подземной лаборатории

3.1 Метод 1 - Экстраполяция ранних экспериментальных данных

Данный метод был уже частично затронут в предыдущем параграфе и состоит в использовании экспериментальных данных, полученных в 2009 в соседней лаборатории другой размера и экстраполяция их на лабораторию с DEAP-3600. В результате было использовано значение потока $(3.31 \pm 0.10) \times 10^{-10}$.

3.2 Метод 2 - Использование Depth-Intensity-Relation(DIR)

Ещё одним методом описания потока мюонов является использование Depth-Intensity-Relation [5], которое описывает зависимость дифференциальной интенсивности мюонов $I(h)$ от высоты уклона h и выглядит следующим образом:

$$I(h) = (I_1 e^{-h/\lambda_1} + I_2 e^{-h/\lambda_2}) \quad (1)$$

Параметры I_1 , λ_1 , I_2 и λ_2 представлены в таблице 1 и были определены путём фиттирования экспериментальных данных с различных лабораторий, находящихся на разной глубине (графически представлено на рис. 2)

Параметр	Значение
I_1	$(8.60 \pm 0.53) * 10^{-6} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$
λ_1	(0.46 ± 0.01) км(высота на уровне моря)
I_2	$(0.44 \pm 0.06) * 10^{-6} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$
λ_2	(0.87 ± 0.02) км(высота на уровне моря)

Таблица 1: Значения параметров для выражения 1

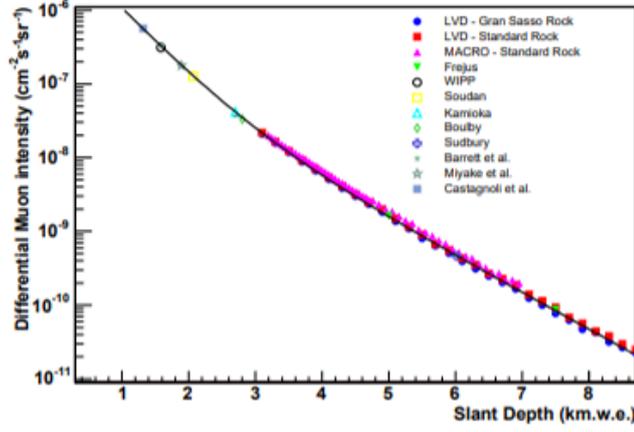


Рис. 2: Измерения дифференциального потока мюонов как функция от высоты уклона.

С помощью данной формулы с учётом размеров эффективной области была получена следующая величина полного потока: $(3.58 \pm 1.09) \times 10^{-10}$.

3.3 Метод 3 - MUTE

Ещё одним методом просчёта потока мюонов, которые долетают до подземной лаборатории является пакет программа на python под названием MUTE. Он и был использован в данной работе, о чем далее.

4 MUTE - MUon inTensity code

MUTE (MUon inTensity code)[17] это компьютеризированный инструмент для просчёта потока мюонов, долетающих через атмосферу и интенсивностей потока мюонов под землёй. Работа библиотеки обеспечивается подключением двух программ: для просчета потока мюонов, проходящего через атмосферу используется MCEq, а для симмуляции мюонов, проходящих через камень и воду используется PROPOSAL, что проиллюстрировано на рис.3.

Результат работы программы можно описать при помощи формулы:

$$\Phi^u(E_j^u, X_k, \theta_k) = \sum_i \Phi^s(E_j^s, \theta_k) P(E_i^s, E_j^u, X_k) \left(\frac{\Delta E_j^s}{\Delta E_j^u} \right) \quad (2)$$

где Φ^u - поток под землёй, Φ^s - поток мюонов, достигающий поверхности (результат работы MCEq), P - тензор перемещения (результат работы PROPOSAL). Результат работы программ также представлен на рис. 4

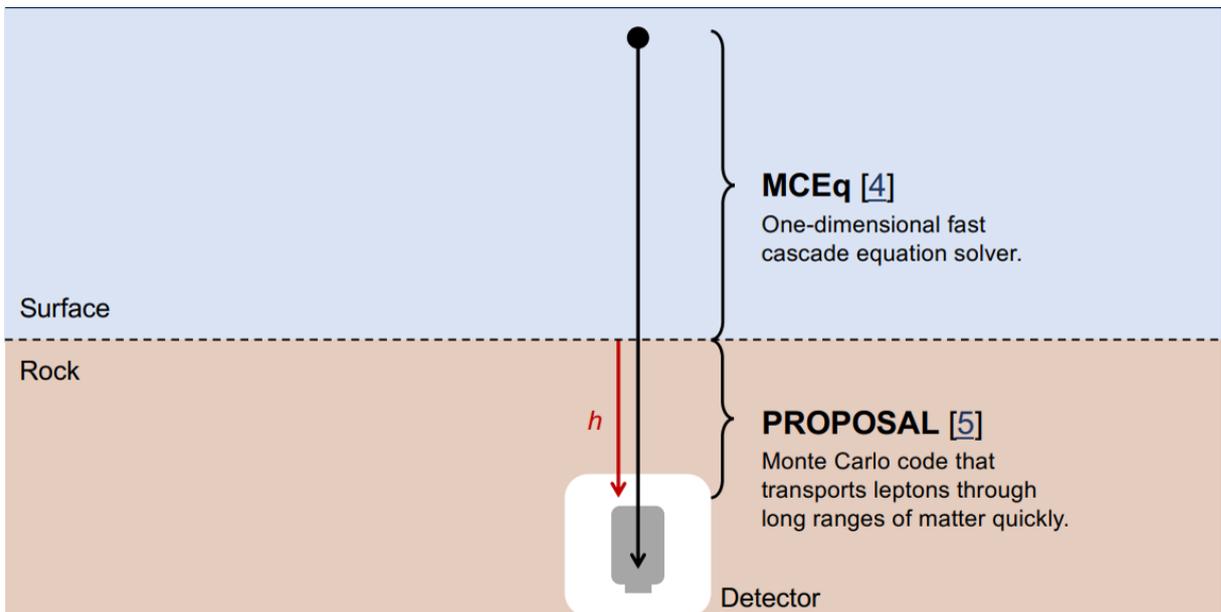


Рис. 3: Схема работы программы MUTE

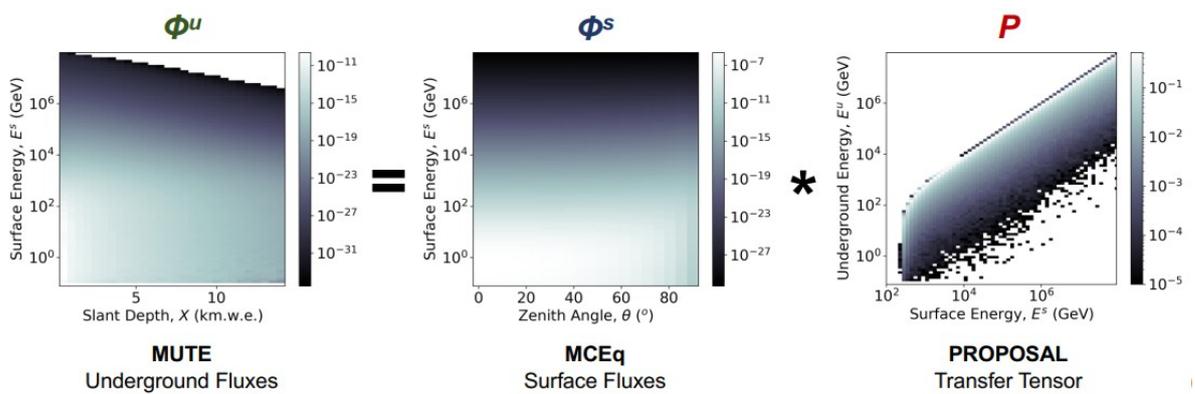


Рис. 4: Нахождение потока мюонов

4.1 MCEq

MCEq(Matrix Cascade Equations)[9]- это инструмент для численного решения уравнений каскадов, которые описывают эволюцию плотности частиц во время их прохождения через гаообразную или плотную среду. В основном применяется для расчёта каскадов в атмосфере Земли. Частицы представлены по средствам средней плотности или дискретных бинов энергии. Результатом работы программы является дифференциальный спектр энергии или полное число частиц. [9]

Одним из входных параметров для программы является поток космических лучей на верхнем уровне атмосферы. Наличие этих данных обеспечивается модулем `crflux.models`, который содержит основные современные модели генерации космических лучей. Также для расчетов можно выбирать разные модели взаимодействия адронов с веществом. О тех и других моделях подробнее в пунктах 4.3 и 4.4.

4.2 PROPOSAL

PROPOSAL (Propagator with optimal precision and optimized speed for all leptons)[12] - это программное обеспечение для просчета распространения лептонов и гамма-лучей через вещество. На данный момент есть возможность рассчитать поперечное сечения для следующих процессов: ионизация, тормозное излучение, взаимодействия фотонов с ядрами, образование электрон-позитронных пар, эффекты Ландау–Померанчука–Мигдала и Тер-Микаэляна, мюонные и тау-распады, множественное рассеяние. [12]

4.3 Модели генерации космических лучей

4.3.1 Global Spline Fit

Основанная на данных модель космических лучей, которая параметризует последние и наиболее подробные измерения потока космических лучей и его состава в диапазоне энергий $10 \div 10^{11}$ ГэВ по средством анализа прямых и косвенных атмосферных наблюдений.

Энергетические шкалы использованных экспериментов перекрёстно калибруются на основе последовательного перекрытия наборов данных по энергии, и устанавливается общая энергетическая шкала, которая фиксируется прямыми измерениями. Как результат получается ковариационная матрица, которая представляет собой экспериментальную неопределённость входных данных. Она может быть использована для вычисления стандартных отклонений величин, полученных из потока и состава космических лучей. [6]

	p	He	CNO	Mg-Si	Fe
Pop.1:	7860	3550	2200	1430	2120
$R_c = 4$ PV	1.66	1.58	1.63	1.67	1.63
Pop.2:	20	20	13.4	13.4	13.4
$R_c = 30$ PV	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Pop.3:	1.7	1.7	1.14	1.14	1.14
$R_c = 2$ EV	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Pop.3(*):	200	0.0	0.0	0.0	0.0
$R_c = 60$ EV	1.6				

Таблица 2: Нормировочные константы ($a_{i,j}$) и спектральные индексы для выражения 3

4.3.2 HillasGaisser2012

В основе модели лежит концепция, по которой весь наблюдаемый спектр космических лучей исходит от источников в нашей галактике, а колено каким-то образом связано с началом конца популяции частиц, ускоряемых источниками в Млечном Пути, а также что самые высокоэнергетичные частицы поступают из внегалактических источников. [11]

Спектр для всех частиц представлен формулой:

$$\phi_i(E) = \sum_{j=1}^3 a_{i,j} E^{-\gamma_{i,j}} \times \exp\left(-\frac{E}{Z_i R_{c,j}}\right) \quad (3)$$

Нормировочные константы ($a_{i,j}$) и спектральные индексы ($\gamma_{i,j}$) для выражения 3 представлены в таблице 2

4.3.3 GaisserHonda

Модель основана на данных полученных на переносимых воздушных шарах магнитных спектрометрах (для энергии ниже 100 ГэВ) и калориметрах (для более высоких энергий). Модель не описывает поток в (колоне и выше него). Доступный для описания диапазон энергий составляет $< 10^3$ ГэВ [10].

Спектр можно описать формулой:

$$\phi(E_k) = K \times (E_k + b \exp[-c\sqrt{E_k}])^{-\alpha} \quad (4)$$

Нормировочные константы для выражения 4 представлены в таблице

4.3.4 ZatsepinSokolskaya

Модель описывает спектры космических лучей с энергиями $10 \div 10^8$ ГэВ, основанная на предположении, что поток космических лучей представляет собой смесь потоков, ускоренных ударами от новых и сверхновых различных типов. [18]

Компонента	α	K	b	c
Водород (A=1)	2.74 ± 0.01	14900 ± 600	2.15	0.21
He (A=4, high)	2.64 ± 0.01	600 ± 30	1.25	0.14
He (A=4, low)	2.74 ± 0.03	750 ± 100	1.50	0.30
CNO (A=14)	2.60 ± 0.07	33.2 ± 5	0.97	0.01
Mg-Si (A=25)	2.79 ± 0.08	34.2 ± 6	2.14	0.01
Железо (A=56)	2.68 ± 0.01	4.45 ± 0.50	3.07	0.41

Таблица 3: Нормировочные константы для выражения 4

4.3.5 ZatsepinSokolskaya (PAMELA)

Модель включает в себя изменения в спектрах протона и гелия в диапазоне энергий $1 \div 1.2 * 10^3$ ГэВ, основанные на результатах спутникового эксперимента PAMELA. Также важным будет отметить, что спектральные формы этих двух составляющих сильно разнятся и не могут быть описаны одним степенным законом. [1]

4.3.6 SimplePowerlaw27

В соответствии с данной моделью спектр можно описать следующей формулой:

$$\phi_N(E) = \begin{cases} 1.7E^{-2.7} & \text{для } E < 5 * 10^6 \text{ ГэВ} \\ 174E^{-3} & \text{для } E > 5 * 10^6 \text{ ГэВ} \end{cases} \quad (5)$$

4.4 Модели взаимодействия адронов

4.4.1 Sibyll

Sibyll - это первая микроскопическая модель взаимодействия, которая была специально создана для описания взаимодействия космических лучей с веществом [7]. Изначально данная модель основана на следующих гипотезах и теоретических наблюдениях:

1. Теория Редже - подход к задаче рассеяния в квантовой механике и квантовой теории поля, в котором изучаются свойства амплитуды рассеяния при комплексных значениях орбитального углового момента. Сечение тогда можно описать следующей формулой:

$$\sigma = s^{\alpha_i(0)-1} \quad (6)$$

где s - это инвариантная масса, α_i - полюс Редже;

2. Parton Model и perturbative QCD;
3. Minijet модель - разработанная в конце 1980-х годов, первая модель, предлагающая последовательную микроскопическую картину взаимосвязи между общей скоростью образования jet-а и ростом упругого и полного поперечных сечений. В этой модели противоречие между быстрым ростом включающего поперечного

сечения jet-а и не таким быстрым ростом полного поперечного сечения разрешается независимыми парами партонов, взаимодействующими в единственном адронном столкновении. В таком случае можно пользоваться следующим соотношением:

$$\sigma_{jet} = \langle n_{int} \rangle \sigma_{ine} \quad (7)$$

где $\langle n_{int} \rangle$ - это среднее число взаимодействующих партонных пар, σ_{ine} - сечение неупругого взаимодействия. В то же время важно отметить, что: $\sigma_{ine} \sim s^{0.08}$, $\sigma_{jet} \sim s^{0.4}$.

А теперь рассмотрим актуальный и доступные для использования в MUTE версии модели Sibyll. Sibyll 2.1 вышла в 2000 году и при её разработке были внесены следующие изменения и усовершенствования:

- модель дифракционной диссоциации заменена двухканальной моделью эйконала, основанной на подходе Гул-Волкера(Good-Walker);
- Множественные мягкие взаимодействия были реализованы при генерации конфигураций струн и конечных состояний адрона для последовательной интерпретации амплитуды эйконала в соответствии с правилами для ограничений Абрамовского-Грибова-Канчели;
- Параметризации плотностей партонов были обновлены до параметров Глюка, Рейи и Фогта;
- Модификация оригинальной модели mini jet;
- Реализация исчисления Редже-Грибова.

В результате таких обновлений стало возможным использовать модель для предсказания измерений с более высокими энергиями. Также результаты просчётов стали ещё ближе к полученным в экспериментах.

Следующая версия Sibyll 2.3[14] была выпущена в 2016 году со следующим рядом усовершенствований:

- Поперечные сечения были скорректированы в соответствии с данными LHC;
- Вместо использования поперечного импульса использовалась формула поперечной массы:

$$m_{\perp} = \sqrt{p_{\perp}^2 + m^2} \quad (8)$$

- Был сделан особый акцент на характеристиках модели, связанных с производством мюонов с энергией около ГэВ. До этого полный поток мюонов, полученный с помощью Sibyll был меньше чем полученный с помощью моделей EPOS и QGSJET, которые в свою очередь были меньше наблюдаемых в эксперименте;

- Был учтён факт, что лавины, включающие в себя барионы производят на 30% больше мюонов;
- Было использовано экспериментальное наблюдение, гласящее, что ведущую роль в $\pi^\pm p$ взаимодействиях чаще занимают ρ_0 -мезоны вместо π_0 -мезонов. Усовершенствование механизма производства ρ_0 -мезонов привело к более близким к экспериментальным результатам на более высоких энергиях.

Одной из последних версий этой модели на данный момент является Sibyll 2.3с, в которой было улучшено описание для производства K -мезонов, а также результаты работы программы для воздушных ливней были ещё больше приближены к экспериментальным.

4.4.2 EPOS LHC и QGSJETII-03(04)

Модели EPOS LHC и QGSJETII-03(04)[13] имеют под собой одну и ту же теоретическую основу:

- множественное рассеяние Гррибова-Редже;
- perturbative QCD.

Основными различиями двух моделей является учет нелинейных эффектов на высоких энергиях в модели QGSJET, а также меньшее количество параметров у этой модели, что приводит к менее точному описанию финальных стадий адронных взаимодействий.

4.4.3 DDM

Основанная исключительно на данных модель [8], использующая результаты экспериментов с фиксированными мишенями. Даёт намного более близкие к экспериментальным результаты, нежели теоретические модели, но в рамках работы программы MUTE имеет ряд ограничений при использовании.

4.4.4 DMPJET-III

Основана на формализме рассеяния Грибова-Глаубера и на DPM (Dual-Parton Model)[15]. Не рекомендована для использования нуклон-нуклонных взаимодействий с низкими энергиями (меньше 10-20 ГэВ).

5 Проделанная работа

5.1 Выбор моделей космических лучей и моделей взаимодействия адронов

Была проведена работа по выбору наиболее подходящих моделей генерации космических лучей, которые подробнее описаны в пункте 4.3. На основе анализа статей, посвященным доступным для использования MCEq были выбраны следующие модели:

- GlobalSplineFitBeta - засчёт в большей степени основанности на данных, а не на теоретических гипотезах, модель показывает высокий уровень согласования с экспериментальными данными. Также данная модель работоспособна в самом широком диапазоне энергий ($10 \div 10^{11}$ ГэВ);
- HillasGaisser2012 - работает в оптимальном диапазоне энергий.

Также была проведена работа по выбору наиболее подходящих моделей взаимодействия адронов с веществом, которые подробно описаны в пункте 4.4. По результатам сравнительного анализа были выбраны следующие модели:

- Sibyl 2.3c - одна из последних версий модели Sibyll, получила ряд нововведений, которые непосредственно влияют на поток мюонов, долетающих до поверхности. Также, как отмечено в пункте 4.4.1, показывает хорошие результаты для воздушных ливней;
- EPOS-LHC - далеко не самая новая модель, тем не менее показывающая хорошие результаты, согласующиеся в досточной степени с экспериментальными данными. Также важным будет отметить, что несмотря на почти одинаковые теоретические основы с моделью QGSJET, данная модель намного лучше описывает финальные стадии адронных взаимодействий.

Также результаты просчёта полного потока мюонов для различных комбинаций моделей взаимодействия адронов и генерации космических лучей можно видеть на рис.5

5.2 Определение параметров, необходимых для вычислений

Для проведения расчётов с использованием MUTE был определён ряд параметров:

- координаты детектора - $46^{\circ}28'1''$ с.ш., $81^{\circ}11'12''$ з.д.[16];
- глубина лаборатории в водном эквиваленте - 6011 м от уровня моря [4];
- плотность горной породы - 2.83 г/см³ [16].

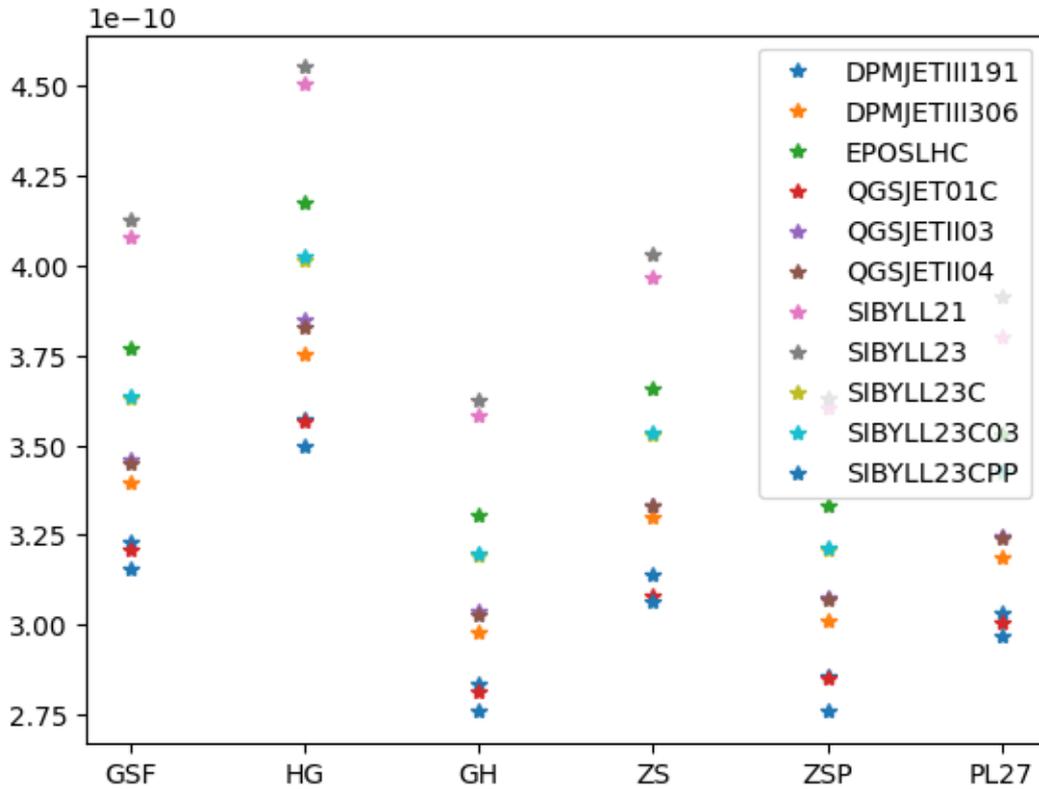


Рис. 5: Результаты просчёта полного потока мюонов для всех комбинаций моделей взаимодействия адронов и генерации космических лучей

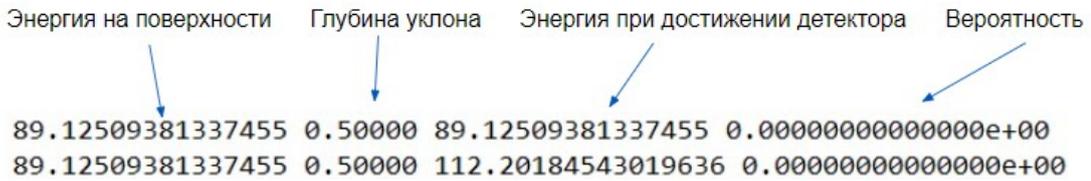


Рис. 6: Вид тензора вероятности выживания

5.3 Тензор вероятности выживания

Важным элементом в работе MUTE является тензор вероятности выживания, который представляет из себя файл формата .txt, часть которого представлена на рис. 6.

Файл состоит из 231868 строк, каждая из которых содержит 4 значения:

- Энергия, с которой мюон находится у поверхности (E_1);
- Расстояние, которую нужно пройти от поверхности до детектора (h)(с учётом наклона);
- Энергия, с которой мюон достигает детектора(E_2);
- Вероятность, что мюон с энергией E_1 , пройдя через горную породу расстояние h , окажется с энергией E_2 .

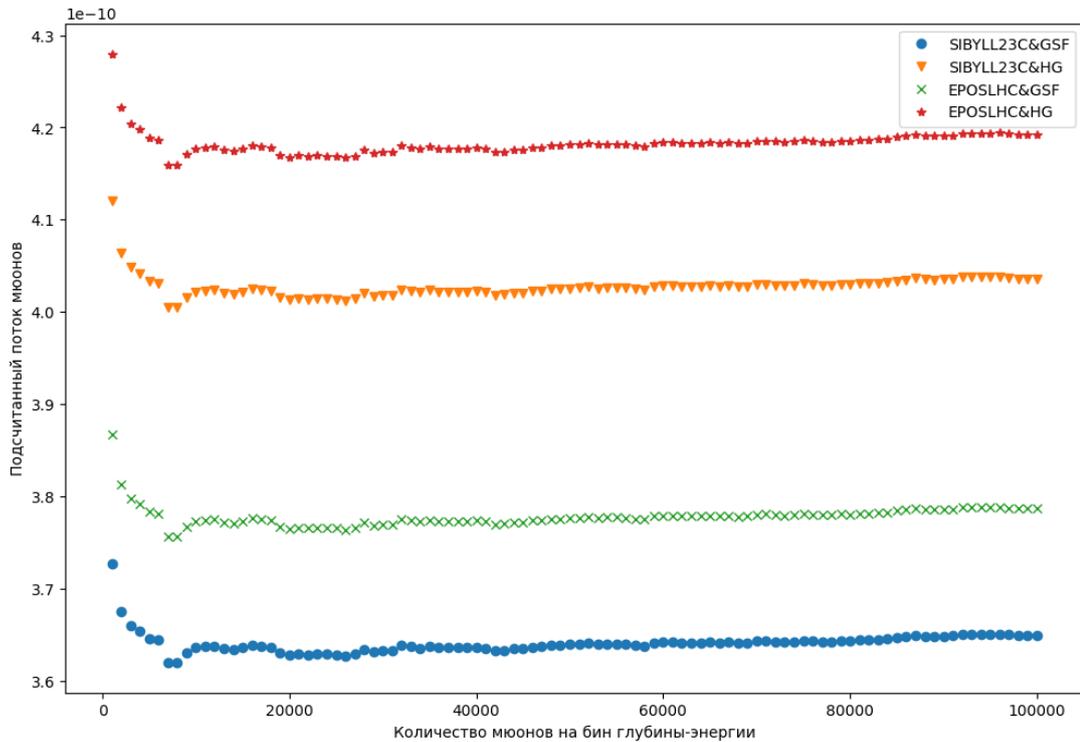


Рис. 7: Полный поток мюонов для различного количества мюонов на бин глубины-энергии для различных комбинаций моделей

В файле рассматриваются все возможные комбинации начальных и конечных энергий. И те и другие берутся из заранее заданного массива из 91-го значения энергии. Что касается расстояния, для него берутся значения их диапазона от 0.5 км до 14 км с шагом 0.5 км. Также параметром для расчёта данного тензора являются плотность и материал среды, а также количество мюонов на бин глубины-энергии.

Для данной работы были рассчитаны тензоры вероятности для разного количества мюонов на бин глубины-энергии и заданных параметров среды: от 1000 до 100000 с шагом 1000. Эти файлы были использованы для расчёта полного потока мюонов, о чем в следующем пункте.

5.4 Расчёт полного потока мюонов

В предыдущих частях работы были выбраны модели генерации космических лучей и модели взаимодействия адронов с веществом, а также получены тензоры вероятности выживания. Далее эта информация была использована для просчета полного потока мюонов, что представлено на рис.7

Для сравнения на рис. 8 представлены все полученные в ходе работы значения вместе со значениями полного потока, полученных с помощью других методов.

6 Заключение

В ходе работы были достигнуты следующие результаты:

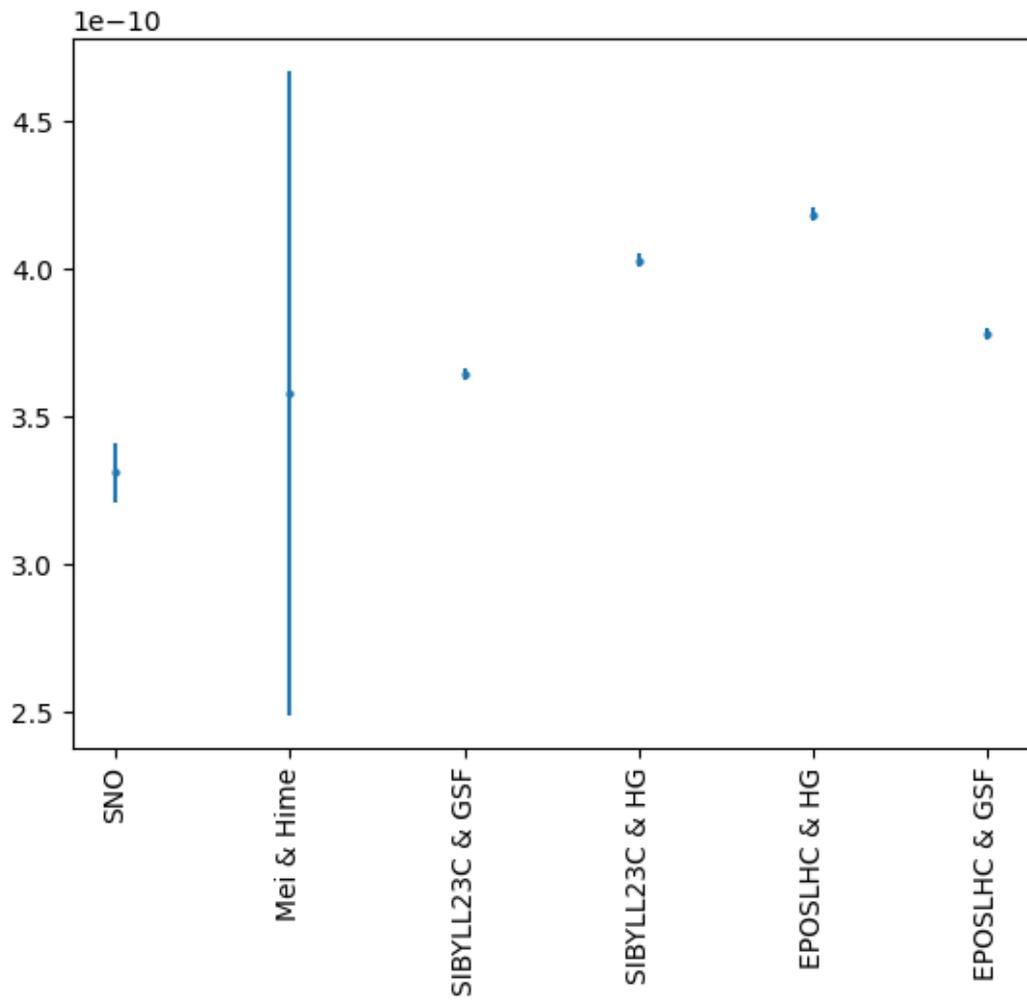


Рис. 8: Значения полного потока, рассчитанные разными методами

- Были изучены принципы работы пакета MUTE;
- Были выбраны оптимальные модели генерации космических лучей и взаимодействия адронов с веществом для поставленных задач;
- Были определены параметры, необходимые для вычисления потока с помощью пакета MUTE;
- Были построены тензоры вероятности выживания для параметров эксперимента;
- Были получены значения полного потока мюонов, долетающего до подземной лаборатории.

Список литературы

- [1] O. Adriani и др. «PAMELA Measurements of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra». В: *Science* 332.6025 (апр. 2011), с. 69—72. DOI: 10.1126/science.1199172.
- [2] B. Aharmim и др. «Measurement of the cosmic ray and neutrino-induced muon flux at the Sudbury neutrino observatory». В: *Phys. Rev. D* 80 (1 июль 2009), с. 012001. DOI: 10.1103/PhysRevD.80.012001. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.80.012001>.
- [3] P.-A. Amaudruz и др. «Design and construction of the DEAP-3600 dark matter detector». В: *Astroparticle Physics* 108 (2019), с. 1—23. ISSN: 0927-6505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.09.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650518300914>.
- [4] E. Aprile и др. «Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T». В: *Phys. Rev. Lett.* 121 (11 сент. 2018), с. 111302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.111302. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.111302>.
- [5] G. L. Cassiday, J. W. Keuffel и J. A. Thompson. «Calculation of the Stopping-Muon Rate Underground». В: *Phys. Rev. D* 7 (7 апр. 1973), с. 2022—2031. DOI: 10.1103/PhysRevD.7.2022. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.7.2022>.
- [6] Hans Dembinski и др. «Data-driven model of the cosmic-ray flux and mass composition from 10 GeV to 10^{11} GeV». В: (2017). DOI: 10.48550/ARXIV.1711.11432. URL: <https://arxiv.org/abs/1711.11432>.
- [7] Engel, Ralph и др. «The hadronic interaction model Sibyll - past, present and future». В: *EPJ Web Conf.* 145 (2017), с. 08001. DOI: 10.1051/epjconf/201614508001. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201614508001>.
- [8] Anatoli Fedynitch и Matthias Huber. «Data-driven hadronic interaction model for atmospheric lepton flux calculations». В: *Physical Review D* 106.8 (окт. 2022). DOI: 10.1103/physrevd.106.083018. URL: <https://doi.org/10.1103/physrevd.106.083018>.
- [9] Anatoli Fedynitch и др. *Calculation of conventional and prompt lepton fluxes at very high energy*. 2015. DOI: 10.48550/ARXIV.1503.00544. URL: <https://arxiv.org/abs/1503.00544>.
- [10] T. K. Gaisser и M. Honda. «FscPLUX OF/scp AscPTMOSPHERIC/scp NscPEUTRINOS/scp». В: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 52.1 (дек. 2002), с. 153—199. DOI: 10.1146/annurev.nucl.52.050102.090645.

- [11] Thomas Gaisser, Todor Stanev и Serap Tilav. «Cosmic Ray Energy Spectrum from Measurements of Air Showers». В: *Frontiers of Physics* 8 (апр. 2013). DOI: 10.1007/s11467-013-0319-7.
- [12] Jan-Hendrik Koehne и др. «PROPOSAL: A tool for propagation of charged leptons». В: *Computer Physics Communications* 184.9 (2013), с. 2070—2090. DOI: 10.1016/j.cpc.2013.04.001.
- [13] Pierog, Tanguy. «Modelling hadronic interactions in cosmic ray Monte Carlo generators». В: *EPJ Web of Conferences* 99 (2015), с. 09002. DOI: 10.1051/epjconf/20159909002. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159909002>.
- [14] Felix Riehn и др. «The hadronic interaction model SIBYLL 2.3c and Feynman scaling». В: (2017). DOI: 10.48550/ARXIV.1709.07227. URL: <https://arxiv.org/abs/1709.07227>.
- [15] S. Roesler, R. Engel и J. Ranft. «The Monte Carlo Event Generator DPMJET-III». В: (2001), с. 1033—1038. DOI: 10.1007/978-3-642-18211-2_166.
- [16] *SNOLAB User's Handbook Rev. 2*. 2006.
- [17] William Woodley и Anatoli Fedynitch. *wjwoodley/mute: MUTE 2.0.1*. Вер. 2.0.1. Ноябрь. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7331945. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7331945>.
- [18] V. I. Zatsepin и N. V. Sokolskaya. «Three component model of cosmic ray spectra from 10 GeV to 100 PeV». В: *Astronomy & Astrophysics* 458.1 (окт. 2006), с. 1—5. DOI: 10.1051/0004-6361:20065108.