

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

УДК 539.1

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ФОН КОСМОГЕННОГО  
ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
DEAP-3600

Научный руководитель  
(старший преподаватель)

\_\_\_\_\_ И. Н. Мачулин

Научный ассистент (к.ф.-  
м.н.)

\_\_\_\_\_ Г.Д. Долганов

Студент

\_\_\_\_\_ П. А. Панфилов

Москва 2024

## Введение

Изучение природы скрытой массы Вселенной остается одной из ключевых задач современной физики. Наблюдения кривых вращения галактик указывают на существование невидимой компоненты материи, известной как скрытая масса [1]. Эта материя не взаимодействует с электромагнитным излучением, что делает её прямое обнаружение исключительно сложным. Считается, что взаимодействие скрытой массы осуществляется только через гравитационные и слабые взаимодействия.

Эксперимент DEAP-3600 представляет собой попытку обнаружить слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs), которые считаются одними из основных кандидатов на роль скрытой массы. Детектор, расположенный на глубине 2 километра под землей в лаборатории SNOLAB [2] (Канада), использует жидкий аргон в качестве рабочей среды. Помимо детектирования тёмной материи, данный детектор может использоваться и для регистрации солнечных нейтрино. Источником космического фона в детекторе являются мюоны космогенного происхождения.

Космические мюоны образуются в результате взаимодействия первичных космических лучей с атомами верхних слоёв атмосферы Земли. Первичные космические лучи состоят преимущественно из протонов и ядер лёгких элементов, движущихся с высокими энергиями. При столкновении с атомными ядрами в атмосфере они порождают каскад вторичных частиц, среди которых значительную долю составляют пионы ( $\pi$ -мезоны). Заряженные пионы быстро распадаются на мюоны и нейтрино:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (2)$$

Мюоны, обладая сравнительно большой массой (примерно в 207 раз больше массы электрона) и временем жизни около 2,2 микросекунды, способны проникать через плотные слои атмосферы и достигать поверхности Земли. Их высокая проникающая способность обусловлена тем, что мюоны, в отличие от электронов, теряют энергию в веществе преимущественно через ионизационные потери, а не излучение. Это позволяет им преодолевать значительные расстояния без существенного ослабления потока.

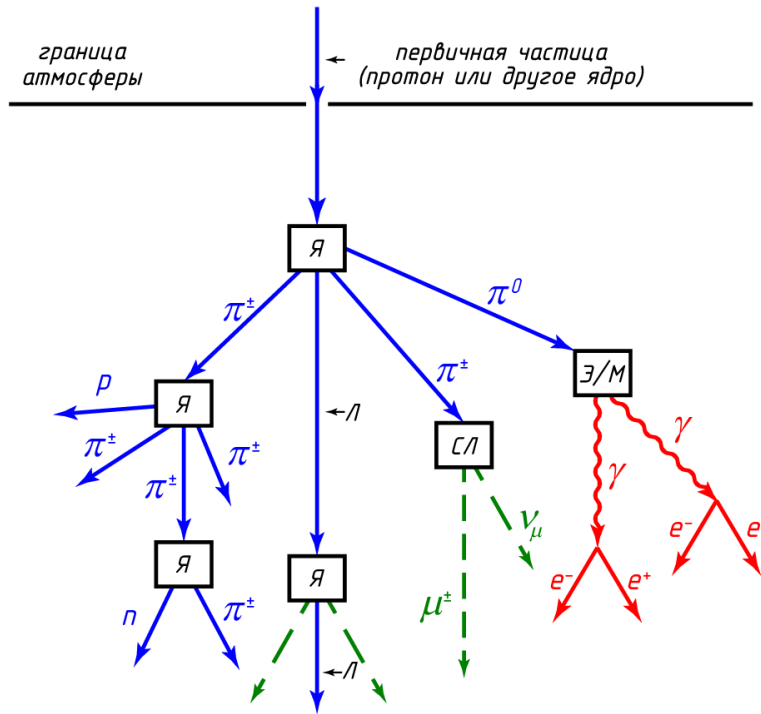


Рис. 1: Качественная схема взаимодействия протона космических лучей с ядрами в земной атмосфере: Л—лидирующая частица; Я—ядерное взаимодействие; Э/М—электромагнитное; СЛ—слабое.

На поверхности Земли поток мюонов составляет значительную часть космического излучения, и их интенсивность зависит от высоты над уровнем моря и геомагнитных условий. Понимание происхождения и характеристик космических мюонов имеет важное значение для экспериментов по поиску тёмной материи, таких как DEAP-3600, поскольку мюоны являются основным источником фоновых событий, которые необходимо учитывать при анализе данных.

Космические мюоны, проникая в детектор, взаимодействуют с ядрами аргона, что может приводить к образованию космогенных изотопов. Изотопы, обладающие высокой энергией, становятся значительным источником фоновых событий в эксперименте, который необходимо учитывать. Для моделирования космогенного фона использовалась программа FLUKA, обеспечивающая моделирование ядерных взаимодействий с высокой точностью.

**Цель** данной работы заключается в построении спектров распада изотопов, образовавшихся в детекторе DEAP-3600 за счёт взаимодействия жидкого аргона и космических мюонов.

## 1 Эксперимент DEAP-3600

### 1.1 Основные компоненты детектора

Тело детектора DEAP-3600 состоит из акриловой сферы, заполненной жидким аргоном высокой чистоты, который используется в качестве рабочей среды. Снаружи акриловой сферы расположены фотоумножители, предназначенные для регистрации света, возникающего при взаимодействии частиц с аргоном. [5].

### 1.2 Регистрация темной материи

Метод обнаружения темной материи в эксперименте DEAP-3600 основан на регистрации сигналов, возникающих при взаимодействии частиц тёмной материи с ядрами аргона. В результате такого взаимодействия ядро аргона может перейти в возбуждённое состояние (или ионизоваться), после чего происходит образование эксимеров (возбуждённых димеров аргона). Эти эксимеры сцинтиллируют и распадаются. Сцинтилляция регистрируется фотоумножителями. Схематично процесс представлен на рисунке 2.

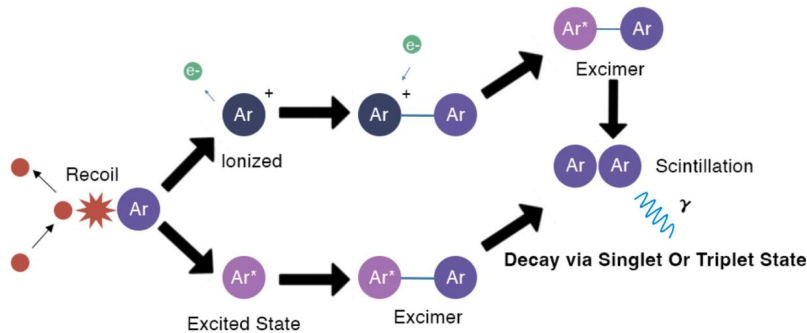


Рис. 2: Физические процессы, происходящие при взаимодействии WIMP с аргоном.

### 1.3 Защита от космогенного фона в эксперименте

Для минимизации космогенного фона, помимо размещения детектора на глубине 2 км под землёй, он дополнительно помещён в большую бочку, заполненную водой. При прохождении космических мюонов через воду возникает черенковское излучение, которое проявляется в виде характерного синего свечения. Это свечение регистрируется внешними фотоумножителями, позволяя идентифицировать события, связанные с мюонами. При обнаружении таких событий процесс регистрации данных временно прекращается, чтобы исключить фоновые сигналы, вызванные взаимодействием мюонов [5].

## 2 Образование изотопов в детекторе

### 2.1 Взаимодействие мюонов и аргона

Средний поток мюонов на глубине 2000 метров под землёй составляет [3]:

$$I_{\mu} = (3.3 \times 10^{-10}) \frac{\mu}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \quad (3)$$

Мюоны, проходящие через детектор, взаимодействуют с ядрами аргона, вызывая ядерные реакции. В результате могут образовываться изотопы, сигналы которых невозможно эффективно подавить способом, описанным в разделе 1.3, так как они могут распадаться за пределами временного окна блокировки регистрации событий.

### 2.2 Моделирование взаимодействия мюонов с аргонном

Для анализа уровня фона от таких изотопов использовались данные проведённого ранее моделирования с использованием программного пакета **Fluka**. Моделирование проводилось на протяжении эквивалента 97 лет наблюдений.

### 2.2.1 Энергии мюонов

В качестве входных данных для моделирования использовались распределения мюонов по энергиям и по углам падения [4] (рис. 3, 4).

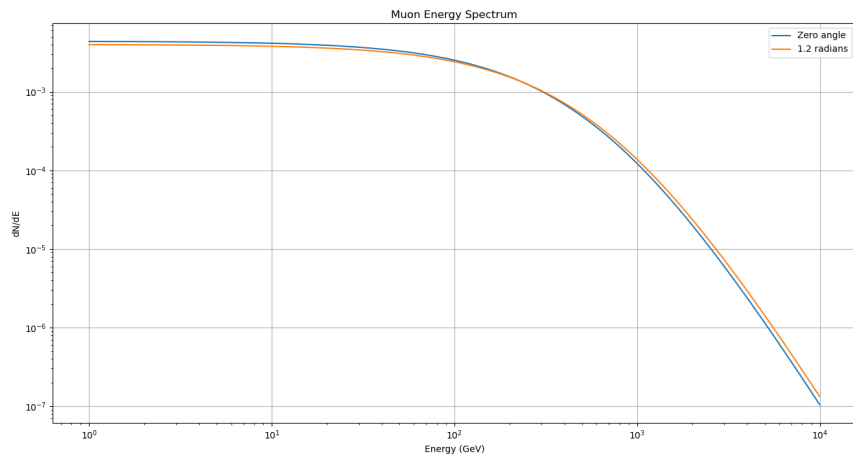


Рис. 3: Дифференциальный спектр мюонов по энергиям в логарифмическом масштабе

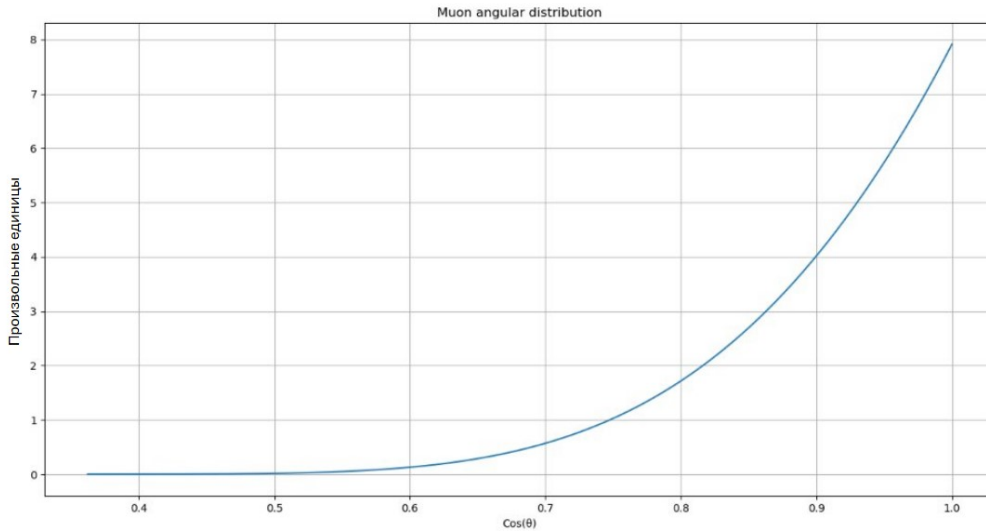


Рис. 4: Угловое распределение моделируемых мюонов.

## 2.2.2 Результаты моделирования

По результатам моделирования имеются данные о наработанных изотопах, возникающих в процессе взаимодействия мюонов с ядрами аргона. Особый интерес представляют изотопы, которые могут распадаться с выделением большого количества энергии ( $>9$  MeV), так как в области данных энергий фон детектора имеет преимущественно космогенное происхождение. Таблица 1 с результатами моделирования включает перечень изотопов, их количество, тип распада и период полураспада.

Таблица 1: Изотопы, наработанные в процессе моделирования

Element	Number of isotopes	Decay	Half-life
$^{15}\text{C}$	1	$\beta^-$	2,449 s
$^9\text{C}$	2	electron capture $\beta^+$	126,5 ms
$^{13}\text{B}$	2	$\beta^-$	17,36 ms
$^{12}\text{B}$	13	$\beta^-$	20,20 ms
$^8\text{B}$	6	electron capture $\beta^+$	770 ms
$^{11}\text{Be}$	1	$\beta^-$	13,76 s
$^8\text{Li}$	14	$\beta^-$	839,9 ms

## 2.3 Построение спектров распада изотопов

Для анализа распада изотопов были построены энергетические спектры с использованием языка программирования **Python**. В рамках работы выполнены следующие задачи:

1. Построение дифференциальных спектров для всех изотопов, полученных в процессе моделирования и их суммарного спектра (рис. 5).
2. Построение интегрального суммарного спектра для оценки накопленных значений (рис. 6).

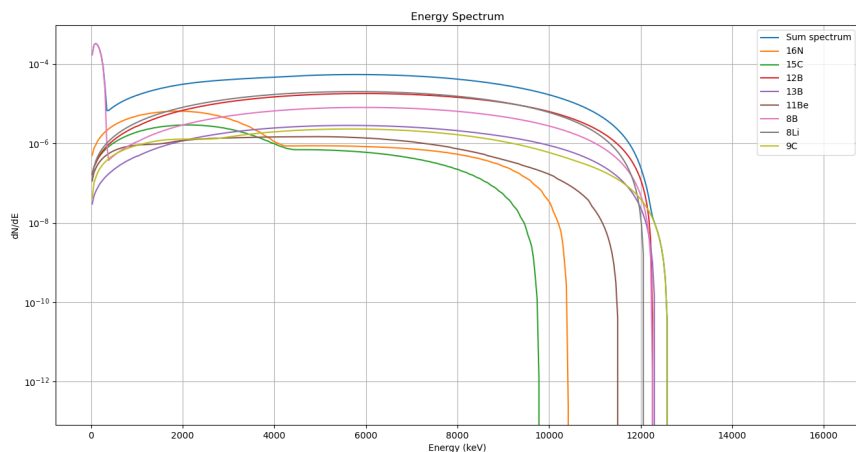


Рис. 5: Дифференциальный спектр распада изотопов



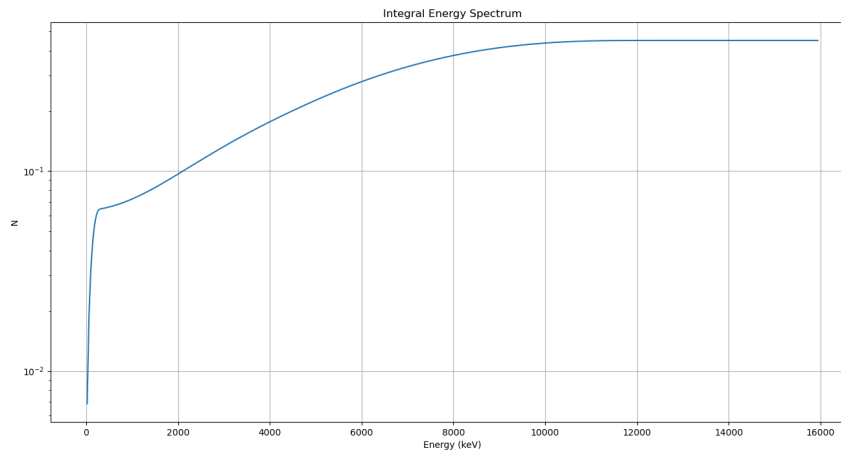


Рис. 6: Интегральный спектр распада изотопов

В результате по интегральному спектру вычислено количество распадов изотопов с регистрируемым энерговыделением выше 9 MeV, возникающих в детекторе, в год.

$$N \approx 0.01 \text{ распадов в год} \quad (4)$$

## 3 Вывод

### 3.1 Результаты работы

1) Были построены спектры распада для наработанных за 97 лет моделирования на Fluxa изотопов, образованных за счет взаимодействия мюонов космогенного происхождения с жидким аргоном внутри детектора (рис. 5, 6).

2) Было получено количество распадов изотопов с регистрируемым энерговыделением больше 9 MeV в год.

$$N \approx 0.01 \text{ распадов в год}$$

## 3.2 Дальнейшая работа

1) Модель, использованная в работе, имеет упрощенную геометрию детектора, поэтому стоит актуальная задача в доработке модели для получения более точных результатов.

2) На основе уточненной модели будет рассчитан фон космогенного происхождения от образующихся изотопов во всем энергетическом диапазоне детектора DEAP-3600.

## Список литературы

- [1] Rubin, V. C., Ford Jr., W. K., Thonnard, N. (1980). Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605/R to UGC 2885. *The Astrophysical Journal*, **238**, 471–487.
- [2] SNOLAB official site. Available at: <https://www.snolab.ca/>
- [3] Aharmim B. et al. Measurement of the cosmic ray and neutrino-induced muon flux at the Sudbury neutrino observatory *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*. – 2009. – Т. **80**. – №. 1. – С. 012001.
- [4] M., Hime A. Muon-induced background study for underground laboratories *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*. – 2006. –Т.**73**, – №. 5. – С. 053004.
- [5] Amaudruz, P.-A., et al. (2017). Design and construction of the DEAP-3600 dark matter detector. *Astroparticle Physics*, **85**, 1–23.