

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»

(НИЯУ «МИФИ»)

УДК

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Калибровка энергетической шкалы детектора DarkSide-Proto

Руководитель НИРС,
старший преподаватель

_____ Мачулин И.Н.

Студент гр. М20-115

_____ Чмыхало Д.А.

Москва 2020

Содержание

Введение	3
1. Темная материя	4
2. Эксперимент Darkside.....	6
3. Модель эксперимента по калибровке	10
3.1 Geant4	11
3.2 Модель эксперимента	12
3.3 Анализ результата.....	14
4. Заключение	15
5. Список используемых источников.....	16

Введение

Согласно опубликованным в марте 2013 года данным наблюдений космической обсерватории «Планк», интерпретированным с учётом стандартной космологической модели Λ CDM, наблюдаемая Вселенная состоит на 4,9% из барионной материи, на 26,8% из тёмной материи и на 68,3% из тёмной энергии. Таким образом, Вселенная на 95,1 % состоит из тёмной материи и тёмной энергии [1].

Состав и природа тёмной материи на настоящий момент неизвестны. В рамках общепринятой космологической модели наиболее вероятной считается модель холодной тёмной материи. Наиболее вероятные кандидаты на роль частиц тёмной материи - вимпы. Несмотря на активные поиски, экспериментально они пока не обнаружены. В связи с этим фактом, задача по поиску частиц темной материи на настоящий момент является особенно актуальной.

1 Темная материя

Современная история изучения скрытой массы начинается в 1920-х годах. В 1922 году Якубус Каптейн, а затем и Джеймс Джинс, опубликовали исследования динамической структуры Млечного Пути, в которых они заключили, что в его диске присутствуют «темные звезды», чья масса превышает массу светящихся звезд. Там же впервые появляется и термин «темная материя» («dark matter»). Первое свидетельство существования скрытой массы на внегалактических масштабах было получено в 1933 году Фрицем Цвикки, который рассмотрел радиальные скорости 8 галактик в скоплении Кома в созвездии Волосы Вероники. Наблюдаемый разброс скоростей оказался очень велик – около 1000 км/с. Из этого факта Цвикки заключил, что, если скопление в целом находится в равновесии, то есть не сжимается и не разлетается, то его полная масса должна быть примерно в 400 раз больше, чем звездная масса галактик скоплениях [2].

В 1939 году Хорес Бэбкок опубликовал самую подробную к тому времени кривую вращения галактики туманность Андромеды. Кривая вращения оказалась необычной – на большом расстоянии от центра скорость вращения

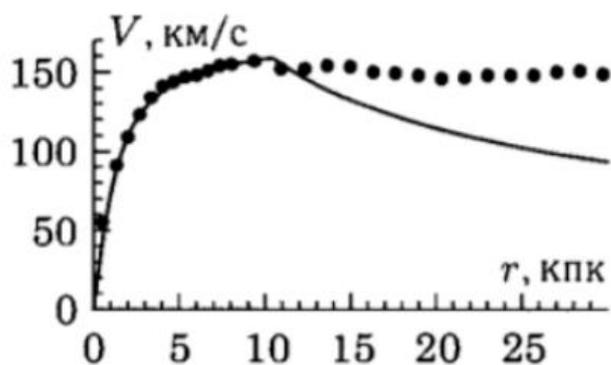


Рисунок 1 – Кривые вращения галактик

не спадала, как ожидалось, а оставалась высокой (рис.1). Годом позже Ян Оорт обсудил кривую вращения галактики NGC 3115 и также заключил, что наблюдаемая скорость вращения внешних областей галактики не соответствует ожидаемой для

случая, если вся масса галактики заключена в ее звездах. И Бэбкок, и Оорт отметили важность исследования кривых вращения внешних областей галактик, однако их результаты не привлекли в то время внимания, как, впрочем, и результаты Цвикки.

Но спустя 30 лет к проблеме скрытой массы вернулись вновь. С этого времени темная материя становится все более популярна и вездесуща – без ее притяжения сейчас не объяснить ни свойств отдельных галактик, ни их систем, ни крупномасштабную структуру Вселенной в целом.

С тех пор было собрано не мало как наблюдательных, так и теоретических доказательств существования темной материи. Но обнаружить ее пока не представилось возможным.

С конца 1980-х – начала 1990-х годов большинство космологов стали отдавать предпочтение теории холодной темной материи (в основном Λ CDM). В теории холодной темной материи роль карликовых галактик является существенно важной, поскольку их считают блоками, из которых образуются более крупные структуры, созданными маломасштабными флуктуациями плотности в ранней Вселенной [5].

Сложно сразу определить, из каких именно компонентов состоит холодная темная материя, однако было выдвинуто несколько кандидатов, которых можно разделить на три группы:

- WIMP: темная материя может состоять из слабо взаимодействующих массивных частиц. Поиск вимпов включает попытки прямого обнаружения высокочувствительными детекторами, а также попытки их создания на ускорителях частиц. Вимпы обычно рассматривают как наиболее вероятные кандидаты в составляющие темной материи.

- Аксионы: очень лёгкие частицы, введены в рассмотрение в моделях, связанных с нарушениями CP-симметрии в сильных взаимодействиях.

- MACHO или массивные компактные объекты гало: являются крупными плотными объектами, такими как чёрные дыры, нейтронные звёзды, белые карлики, очень слабые звёзды или несветящиеся объекты типа планет.

2 Эксперимент DarkSide

Поиски темной материи на данный момент ведутся несколькими коллаборациями, в частности, к ним относится и DarkSide. В настоящее время на установках коллаборации DarkSide ведутся поиски частиц темной материи, которые считаются наиболее вероятными кандидатами на эту роль, а именно, вимпов.

Darkside – международный экспериментальный проект по прямому детектированию частиц темной материи, основанный на радиочистом аргоне.

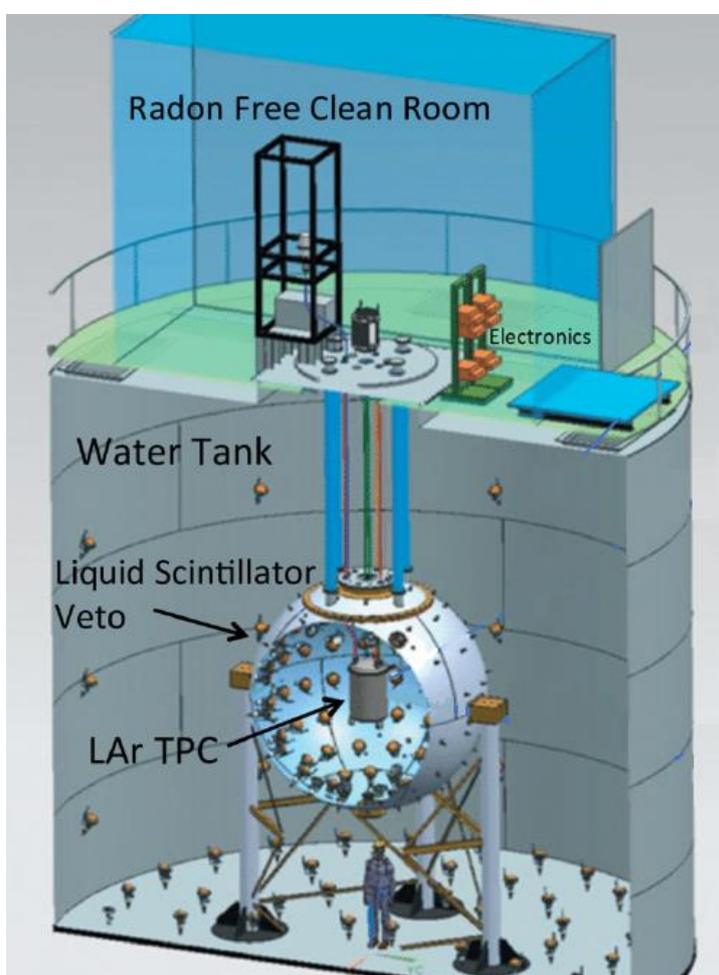


Рисунок 2 – Конструкция детектора DarkSide-50

Основная цель программы DarkSide - обнаружение редких ядерных упругих столкновений с гипотетическими частицами темной материи (WIMP). Настоящий детектор DarkSide-50 (рис.2), расположенный в Лаборатории Гран Сассо (LNGS), представляет собой двухфазную время-проекционную камеру (TPC), заполненную сверхчистым жидким аргоном, извлеченным из подземных источников (UAr). Это сделано потому, что в аргоне, который можно получить из атмосферного воздуха, хоть и в очень малом

количестве, но содержится изотоп ^{39}Ar . Для подавления фона время-проекционные камеры окружают активные вето нейтронов и мюонов. Одной

из ключевых особенностей аргона является способность различать отдачу электронов и ядер, используя различные формы сигналов [4].

В более общем плане инертные элементы - хороший выбор в качестве материала среды детектора темной материи, потому что они обладают хорошими сцинтилляционными и ионизационными свойствами и химически инертны.

Прямое детектирование частиц темной должно происходить следующим образом: частица темной материи, летящая сквозь Землю, испытывает рассеяние на ядрах рабочего вещества детектора, расположенном под землей. Ядро, на котором, произошло рассеяние приобретает энергию отдачи.

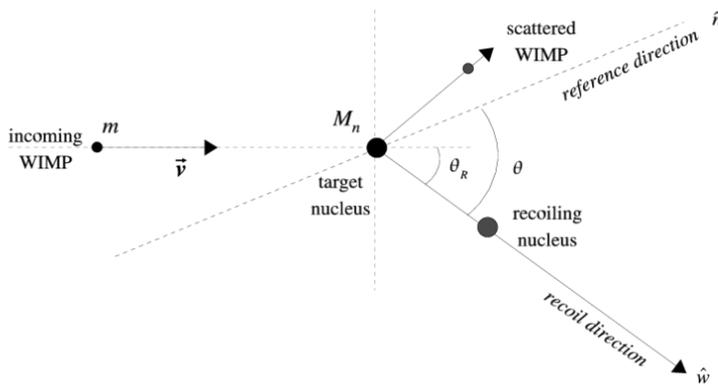


Рисунок 3 – Взаимодействие WIMP с ядром мишени

энергия отдачи достаточно велика, возможно будет обнаружить рассеянную частицу, и по ее кинематике сделать вывод о свойствах частицы (рис.3).

Если частица темной материи рассеивается на ядре с массой m_N , то энергия отдачи будет равна:

$$E_R = \frac{q^2}{2m_N} \approx 50keV \left(\frac{m_\chi}{100GeV} \right)^2 \left(\frac{100GeV}{m_N} \right), \quad (2.1)$$

где $q \sim m_\chi v$ - изменение импульса при столкновении, $v \sim 10^{-3}$ - скорость входящей частицы.

Кинетическая энергия налетающей частицы с массой 100 ГэВ составляет приблизительно 10 кэВ, что намного меньше энергии связи атомов мишени. В результате, нужно рассматривать только рассеяние частицы темной материи от ядра в целом. В экспериментах с аргоном энергетический порог составляет

около 30 кэВ, поэтому согласно (2.1) детектор оптимален для обнаружения частиц темной материи с массой приблизительно 100 ГэВ, где энергия отдачи порядка десятков КэВ.

Ионизирующее излучение в жидких благородных газах приводит к образованию нестабильное химическое соединение инертных газов в синглетном или триплетном состояниях, которые распадаются до основного состояния с характерным быстрым и медленным временем жизни. Синглетные и триплетные состояния возникают с различной амплитудой в зависимости от ионизирующего излучения. Кроме того, явление рекомбинации, эффективно трансформирующее ионизацию в сцинтилляцию, зависит от плотности ионизации в среде. На основе этих свойств было показано, что относительную долю сцинтилляции и ионизации и временную структуру аргонового сцинтилляционного света можно использовать для различения ядерных отдач на фоне γ и электронов, которые попадают в чувствительную область детектора.

Детекторы DarkSide работают как двухфазные аргоновые время проекционные камеры. Считывающее устройство заряда будет расположено в газовой фазе наверху сосуда, а фотодетекторы, чувствительные к одиночным фотонам, будут расположены в жидком аргоне внизу устройства. Сцинтилляционный УФ-свет жидкого аргона составляет менее 150 нм. Использование отражателей, покрытых устройством сдвига длины волны, наряду со стандартными фотоумножителями (ФЭУ) является экономичной реализацией эффективной системы считывания.

Система считывания света будет состоит из полусферических ФЭУ, изготовленных из особо радиочистого боросиликатного стекла и оснащенных фотокатодами для работы при криогенных температурах.

Представленные последние результаты работы DarkSide-50, полученные при экспозиции в 532,4 дня. Этот анализ устанавливает верхний предел сечения взаимодействия темной материи с ядром нуклона, независимо от спина на уровне $1,1 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$ для массы вимпов 100 ГэВ/ c^2 .

Следующим этапом проекта DarkSide-20k (рис. 4) станет новый детектор с массой аргона на уровне 20 тонн. Сцинтилляционный сигнал в аргоне будет регистрироваться криогенными кремниевыми фотоумножителями (SiPM) [6].

Активное veto DS-20k будет использовать 300 т жидкого Ar, содержащегося в корпусе с шириной 10 см, окружающим проекционные камеры. Количество очищенного аргона, необходимое для заполнения детектора, будет извлекаться в Колорадо, как это было сделано для DarkSide-50, с использованием модернизированной экстракционной установки. Затем добытый аргон будет очищен с использованием ректификационной колонны.

Предполагается, что DarkSide-20k сможет исключить WIMP-нуклонное сечение до $2,8 \cdot 10^{-48} \text{ см}^2$ для массы 100 ГэВ/c².

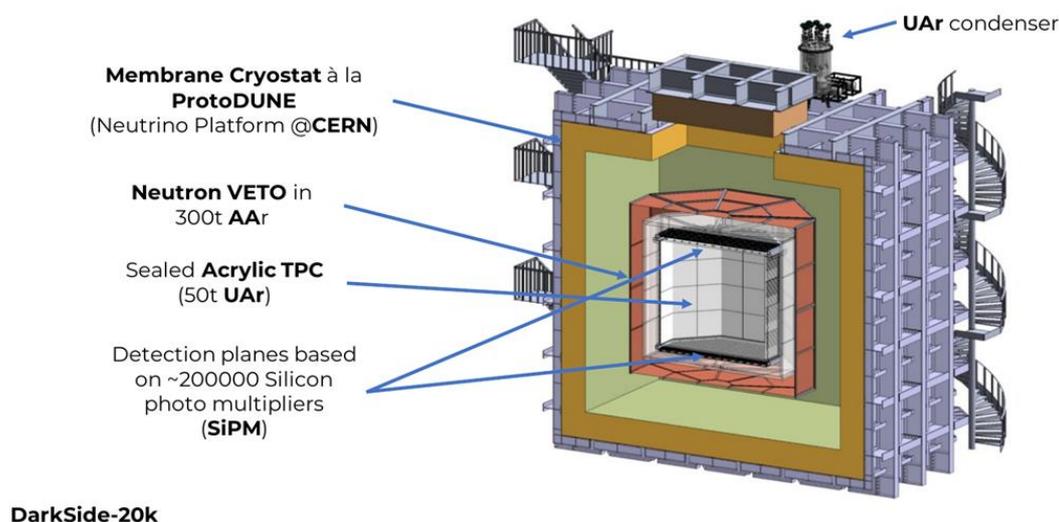
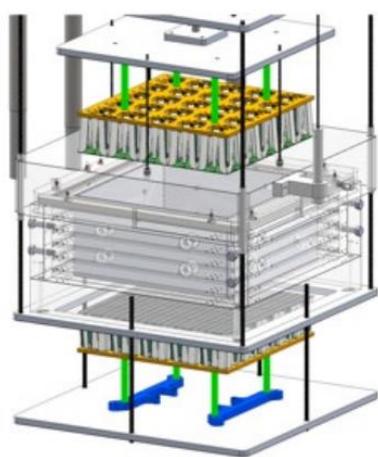


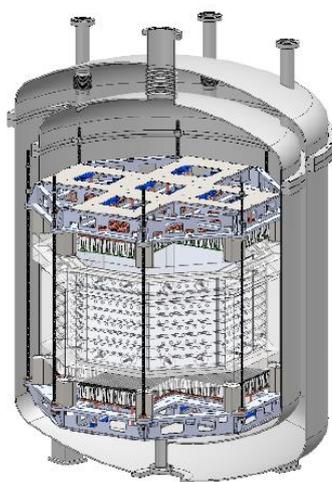
Рисунок 4 – Конструкция детектора DarkSide-20k

3 Модель эксперимента по калибровке

Для того, чтобы отработать необходимые технологии, которые будут затем использованы в самом эксперименте DarkSide-20k, который по масштабам будет гораздо превосходить предыдущий этап проекта, возникла необходимость в создании испытательного стенда. И этим стендом являются детекторы Proto0 и Proto1T (рис.5). Детектор Proto0 представляет из себя испытательный стенд, в котором используются те же технологии, что и на DS-20k, но в меньшем масштабе. Так, масса аргона в Proto0 составляет всего 10 кг.



Proto-0



Proto-1T

Рисунок 5 – Конструкции детекторов Proto-0 и Proto-1T

Детектор Proto1T уже является следующим шагом к детектору DS-20k: он представляет уже масштабную рабочую копию DS-20k, где используется 175 кг аргона [7].

Но прежде чем создать и откалибровать детектор, современные технологии позволяют смоделировать сам детектор. Поэтому основной задачей данной работы были именно шаги в направлении решения данного вопроса, а именно изучение выбранного программного пакета и непосредственно моделирование процессов, которые помогут откалибровать детектор Proto. В дальнейшем работа по калибровке будет продолжена.

3.1 Geant4

Для моделирования процессов была выбрана программа Geant4.

Geant4 - это инструментарий для моделирования прохождения частиц через материю. Его области применения включают физику высоких энергий, ядерную физику и физику ускорителей, а также исследования в области медицины и космические физические исследования. Разработана в CERN на объектно-ориентированном языке программирования C++.

Geant4 включает средства для обработки геометрии, трекинга, отклика детектора, управления запуском, визуализации и пользовательского интерфейса. Для многих симуляций физики это означает, что меньше времени нужно тратить на детали низкого уровня, и исследователи могут немедленно приступить к более важным аспектам симуляции.

Ниже приводится краткое описание каждого из перечисленных выше объектов:

- Геометрия - это анализ физической схемы эксперимента, включая детекторы, поглотители и т. Д., И рассмотрение того, как эта схема повлияет на путь частиц в эксперименте.
- Трекинг - это имитация прохождения частицы через материю, которая включает рассмотрение возможных взаимодействий и процессов распада.
- Отклик детектора регистрирует, когда частица проходит через объем детектора, и приблизительно соответствует тому, как реагирует настоящий детектор.
- Управление запуском записывает подробности каждого запуска (набор событий), а также настраивает эксперимент в различных конфигурациях между запусками [5].

3.2 Модель эксперимента

Предполагалось осуществить калибровку детектора с помощью Am-Be источника нейтронов.

AmBe источник - источник нейтронного и γ -излучения, возникающего под действием реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}^* + n; {}^{12}_6\text{C}^* + \gamma, E_\gamma = 4,43\text{МэВ}$.

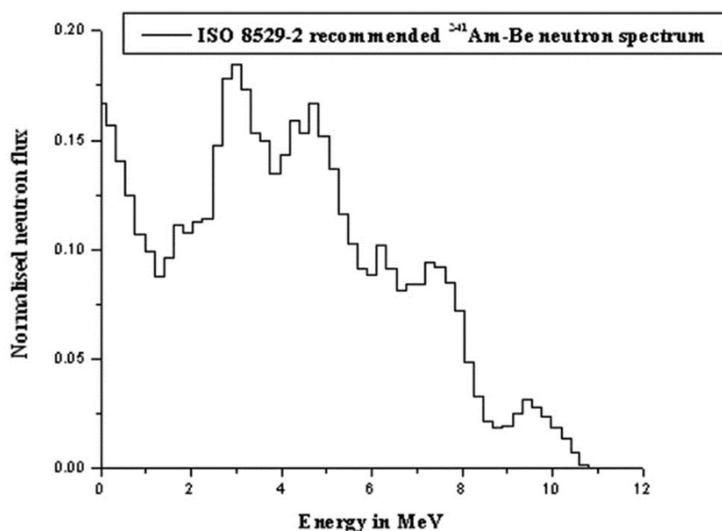


Рисунок 6 – Спектр Am-Be источника

На рисунке 6 представлен типичный спектр AmBe источника.

Но прежде необходимо было зарегистрировать Am-Be источник в сцинтилляторе, в качестве которого был выбран иодид натрия легированный таллием NaI(Tl).

NaI(Tl) - наиболее широко используемый материал из всех доступных сцинтилляторов. Выращивается из основного материала йодид натрия, легированный соответствующим процентным содержанием таллия. Основная длина волны излучения составляет 415 нм, что хорошо согласованы с рабочей длиной волны фотоэлектронных умножителей. Имеет очень высокое свечение, эффективность и не проявляет значительного самопоглощения сцинтилляционного света.

В результате была получена следующая расчетная модель, состоящая из AmBe источника, сцинтиллятора NaI(Tl), а также чувствительного детектора, расположенного за сцинтиллятором (рис.7)

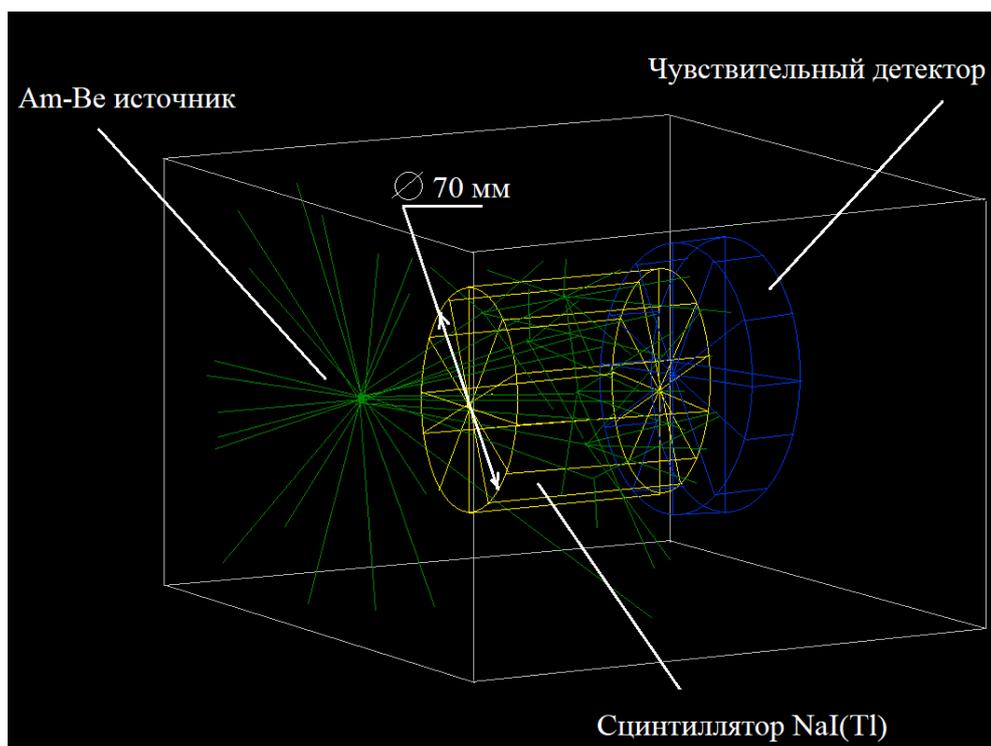


Рисунок 7 -Расчетная модель

Было проведено две симуляции. Одна симуляция соответствовала случаю, когда нейтроны отсутствовали, и регистрировались только гамма-кванты от Am-Be источника. Вторая симуляция была проведена с учетом присутствия нейтронов. Всего было разыграно 10^5 событий, из которых зарегистрировано оказалось около 10^4 . Далее по полученным результатам был построен спектр от Am-Be источника.

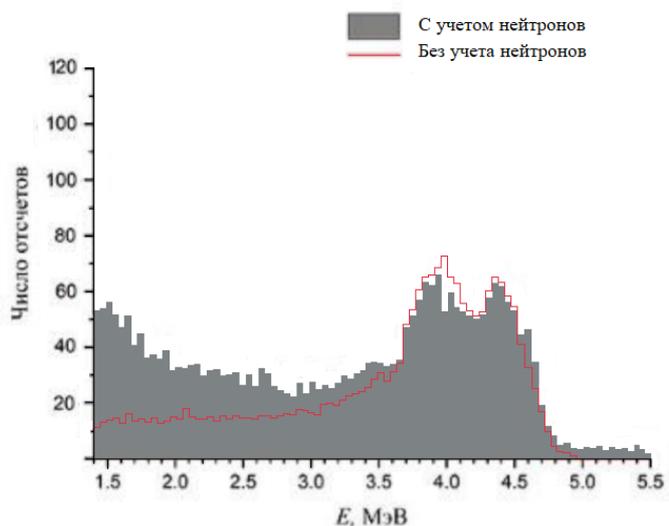


Рисунок 8 – Полученный спектр от Am-Be источника

3.3 Анализ результата

Таким образом, сравнивая полученные зависимости, можно заметить, что имеется определенное отличие. Так, для энергий ниже 2,7 МэВ можно видеть несоответствие спектров. Это объясняется тем, что в спектр вносят вклад реакции неупругого рассеяния и захвата нейтронов от AmBe источника, участие которых и было учтено во второй симуляции. Таким образом, можно сказать, что в NaI(Tl) был зарегистрирован AmBe источник.

4 Заключение

В результате, в ходе работы были изучены теоретические сведения об имеющихся моделях темной материи. Подробно рассмотрен эксперимент коллаборации DarkSide. Также были освоены основы работы в программе Geant4 и начато выполнение задачи по калибровке детектора Proto, работа над которой будет продолжаться в дальнейшем. Был получен промежуточный результат расчета в Geant4, связанный с регистрацией AmBe источника в сцинтилляторе NaI(Tl).

В дальнейшем планируется продолжить работу связанную с включением в симуляцию непосредственно модель детектора Proto. Также планируется провести моделирование с измерением слабых потоков нейтронов в подземных лабораториях. Потому что при проведении поиска редких процессов важной задачей является учет вклада нейтронов в общий результат измерений. При этом основной экспериментальной трудностью является необходимость регистрации потоков нейтронов на уровне ниже 10^{-5} нейтронов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Список используемых источников

1. *Planck Collaboration. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*// *Astronomy and Astrophysics: journal.* - 2016. - Vol. 594, no. 13. - P. 13.
2. *Решетников В.* // Как устроена Вселенная. - Фрязино: Век 2, 2012. - 167 с.
3. *Battinelli, P.; S. Demers.* The C star population of DDO 190: 1. Introduction // *Astronomy and Astrophysics: journal.* - *Astronomy & Astrophysics*, 2005. - 6 October (vol. 447). - P. 1/
4. *DarkSide: Latest results and future perspectives* // *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C*, 2019 Vol. 42, No. 4, Q4.
5. Geant4 A Simulation Toolkit – URL: <https://geant4.web.cern.ch/node/1>.
6. Liugi Rignanese “DarkSide-20k and the Direct Dark Matter Search with Liquid Argon” (2020)
7. Xiang Xiao “Development of Photosensor and Inner Detector in DarkSide-20k” (2019)