

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
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В
ДЕТЕКТОРЕ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ DARKSIDE-20K

Научный руководитель
(Старший преподаватель)

_____ И. Н. Мачулин

Научный консультант
(к.ф.-м.н)

_____ Г. Д. Долганов

Студент

_____ Д. А. Кораблев

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент DarkSide-20k	4
1.1 Конфигурация эксперимента	4
1.2 Схема регистрации событий	5
2 Моделирование электрического поля	6
2.1 Результаты моделирования	7
2.2 Расчет электрической силы, действующей на проволоку	8
2.3 Интерпретация результатов	10
3 Заключение	11
Список использованных источников	12

ВВЕДЕНИЕ

Темная материя — одна из самых загадочных составляющих Вселенной, занимающая около 27% ее общей массы-энергии. Несмотря на значительные успехи в изучении космоса, природа темной материи остается неизвестной, поскольку она не взаимодействует с электромагнитным излучением, что делает ее невидимой для традиционных методов наблюдения. Однако гравитационные эффекты, такие как искривление света далеких галактик и движение звезд в галактических скоплениях, указывают на существование этой скрытой массы.

История изучения темной материи началась в 1930-х годах, когда астроном Фриц Цвикки обнаружил, что масса галактических скоплений, определяемая по их светимости, была значительно меньше массы, необходимой для удержания скоплений вместе под действием гравитации [1]. Этот феномен получил название «проблемы скрытой массы». Позже, в 1970-х годах, Вера Рубин и Кент Форд подтвердили существование темной материи, наблюдая плоские кривые вращения галактик, которые указывали на присутствие невидимой массы за пределами видимых звезд.

Основной проблемой поиска темной материи является ее чрезвычайно слабое взаимодействие с обычной материей. Это делает прямое наблюдение сильно затруднительным, поэтому существуют иные - косвенные методы, такие как изучение гравитационных эффектов, реликтового излучения и поведения галактических структур. Экспериментальные методы поиска включают в себя детекторы частиц, наблюдение за аннигиляцией темной материи и изучение ее влияния на астрофизические процессы. К сожалению, пока ни одна из гипотез о природе темной материи, таких как слабовзаимодействующие массивные частицы (WIMP) или аксионы, не нашла экспериментального подтверждения. Однако, стоит уточнить, что в настоящее время основной и наиболее популярной из гипотез является существование WIMP.

Для дальнейшего изучения темной материи необходимы более чувствительные технологии и модели, которые позволят интерпретировать результаты экспериментов. Современные исследования продолжают сосредотачиваться на создании высокочувствительных детекторов и разработке теорий, которые могут объяснить природу этого явления. Так, например, на сегодняшний день наиболее строгие ограничения на пространство параметров WIMPов было получено с использованием детекторов двухфазного типа.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ DARKSIDE-20K

Эксперимент **DarkSide-20k** [2] — это международный проект, направленный на поиск частиц темной материи, таких как WIMP, посредством их редких взаимодействий с ядрами атомов. Этот эксперимент является частью серии исследований Global Argon Dark Matter Collaboration [3]. Детектор будет размещен в подземной лаборатории **Gran Sasso (LNGS)** в Италии, чтобы минимизировать воздействие космического излучения. Ожидается, что эксперимент начнется в 2025 году.

1.1 Конфигурация эксперимента

DarkSide-20k представляет из себя двухфазный детектор с массой активного вещества (жидкий аргон, LAr) 50 тонн, что в тысячу раз больше, чем в предыдущем эксперименте серии - DarkSide-50. В качестве мишени используется подземный аргон со сниженным количеством ^{39}Ar для уменьшения радиоактивного фона от β -распада.

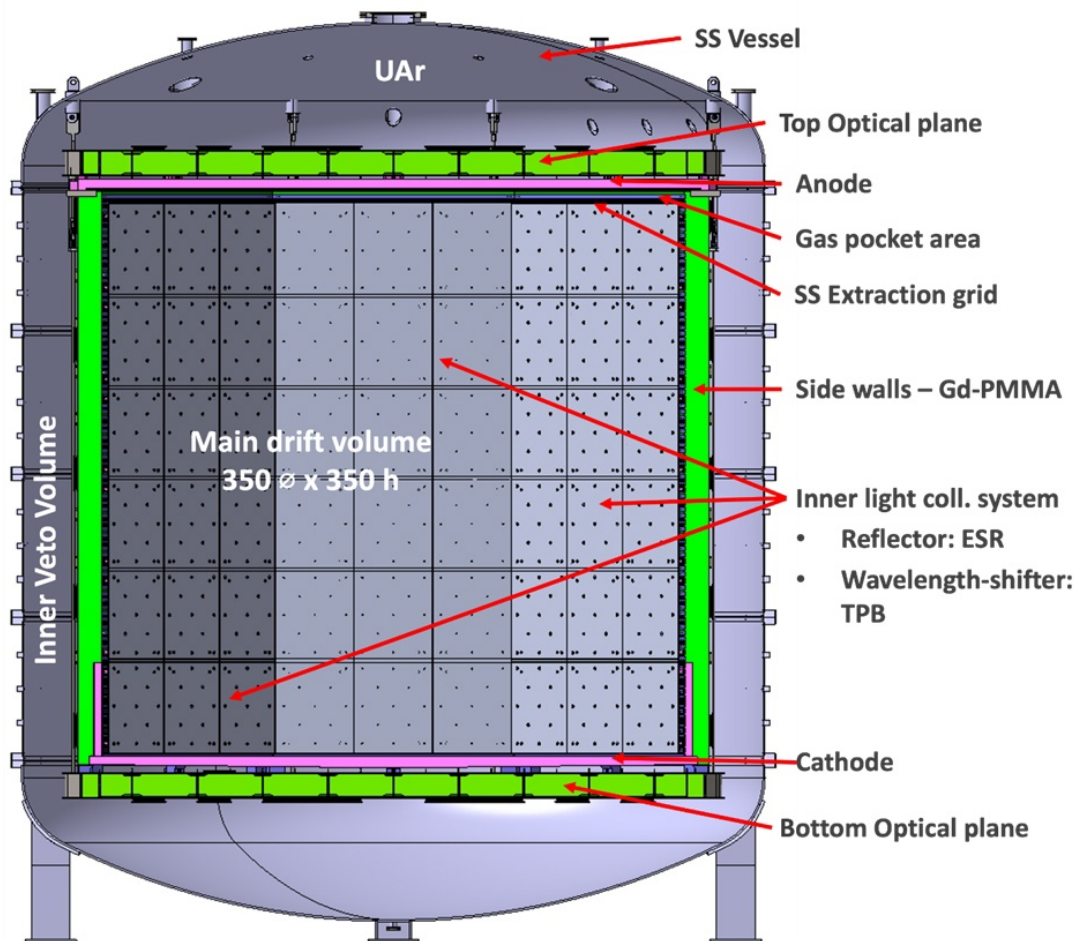


Рисунок 1 — Конструкция детектора [2]

Ввиду того, что аргон излучает в ультрафиолетовом спектре, стенки детектора покрыты тетрафенилбутадиеном, который смещает излучение в видимую область для кремниевых фотоумножителей (SiPM), которые находятся сверху и снизу и позволяют просматривать весь объем мишени.

1.2 Схема регистрации событий

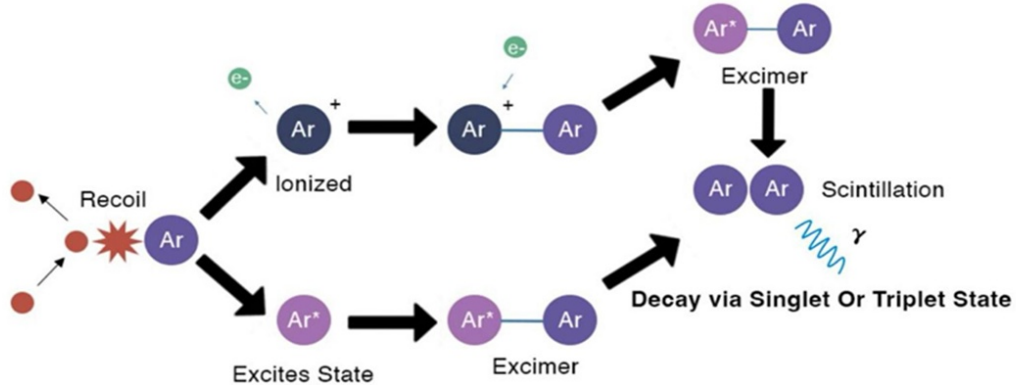


Рисунок 2 — Схема взаимодействия частиц с аргоном в детекторе

Для обнаружения событий DarkSide имеет следующую конфигурацию: небольшая область газообразного аргона (GAr) находится над основной мишенью из LAr, разделителем GAr и LAr в детекторе является сетка, моделирование которой - задача данной работы. Равномерное электрическое поле создается с помощью колец на боковых стенках, на которые подается потенциал с рассчитанным шагом. Это однородное поле перемещает ионизационные электроны, возникающие при взаимодействии частиц с веществом, вверх к поверхности жидкости. Там электрическое поле извлекает электроны в газовую фазу, где они производят вторичные сцинтилляционные фотоны (S2) с помощью процесса, называемого «электролюминесценцией». Вторичные фотоны регистрируются с помощью SiPM.

Благодаря такой конфигурации, эксперимент позволяет определять координаты взаимодействия по трем осям: координаты X-Y - по распределению откликов на верхней фотодетектора, координата Z - по времени между сигналами S1 и S2. Это дает возможность, зная конфигурацию электрического поля в детекторе, производить реконструкцию событий с довольно хорошей точностью.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Основная цель моделирования электрического поля, заключается в том, чтобы обеспечить, по возможности, однородное дрейфовое и электролюминисцентное электрическое поле с целевыми параметрами. А в случае присутствия неоднородностей поля - учесть их влияние на работу детектора. Одна из таких неоднородностей поля неизбежно возникает вблизи проволочек сетки из-за сильной разницы напряжённости электролюминисцентного и дрейфового поля.

В рамках данной задачи проводилось моделирование электрического поля вблизи проволочек сетки и электростатических сил действующих на них. Это позволит оценить смещение проволочек под действием электростатических сил и учесть влияние неоднородности поля вблизи сетки на работу детектора.

2.1 Результаты моделирования

Таблица 1 — Параметры модели для симуляции электрического поля

Параметр	Значение
Радиус проволоки	0.1 мм
Толщина газового слоя	7 мм
Толщина слоя жидкого аргона	3530 мм
Напряжение на аноде	0 В
Напряжение на катоде	-75273 В
Напряжение проволоки	-4969 В

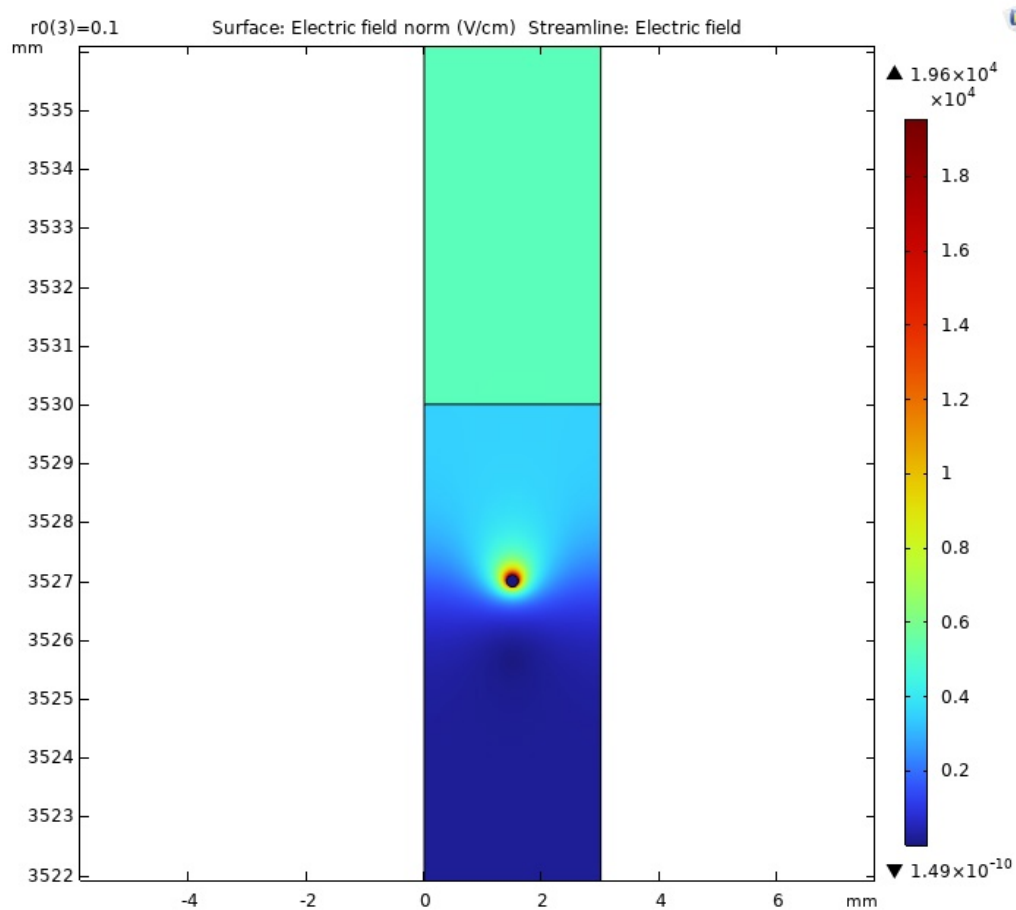


Рисунок 3 — Конфигурация поля вблизи проволоки

Из Рис.3 отчетливо видно распределение электрического поля рядом с проволокой, кроме того, функционал ПО COMSOL позволяет определить численное значение поля в любой из интересующих точек, что может быть использовано в дальнейшем.

2.2 Расчет электрической силы, действующей на проволоку

Физические значения, получаемые в результате работы ПО COMSOL сильно зависят от параметров расчетной сетки, задаваемой пользователем.

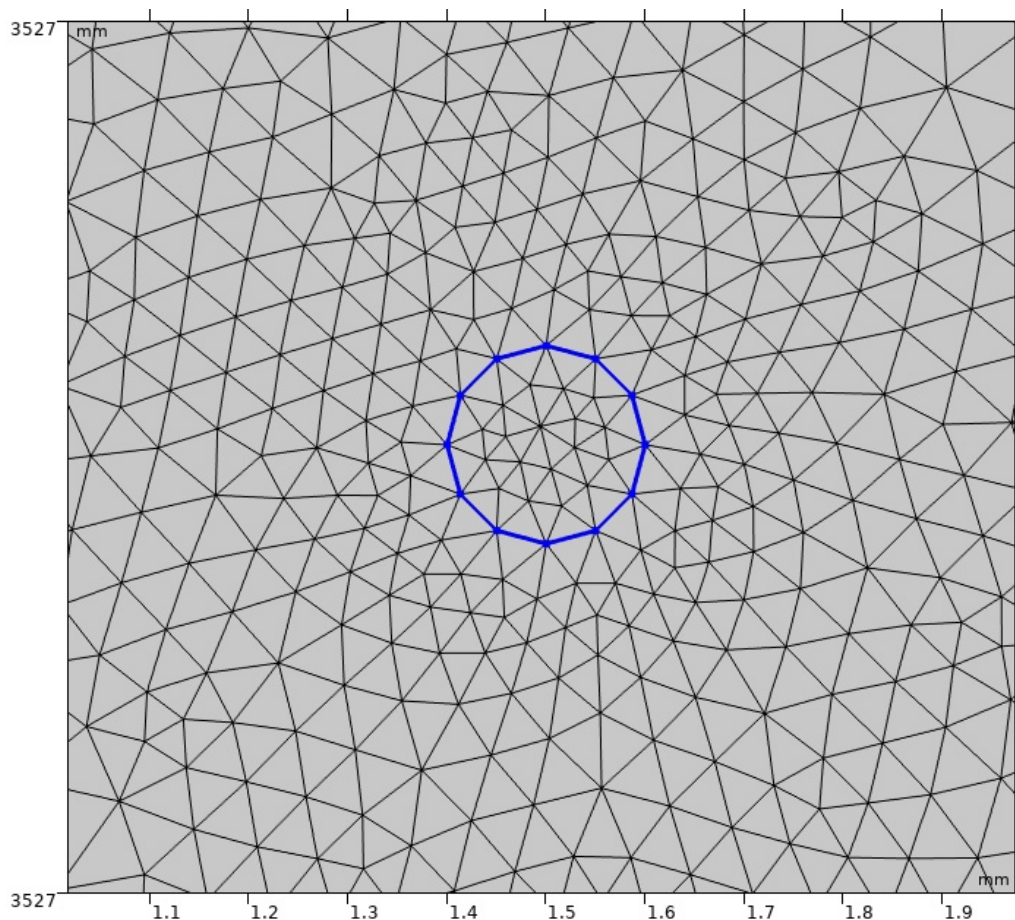
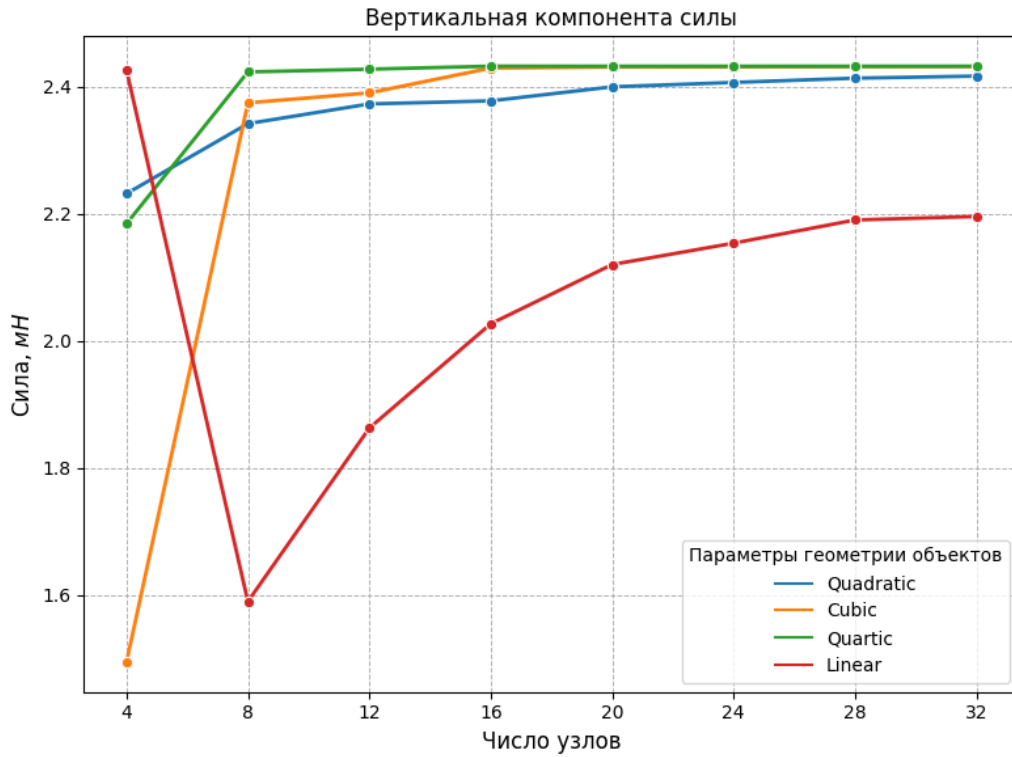
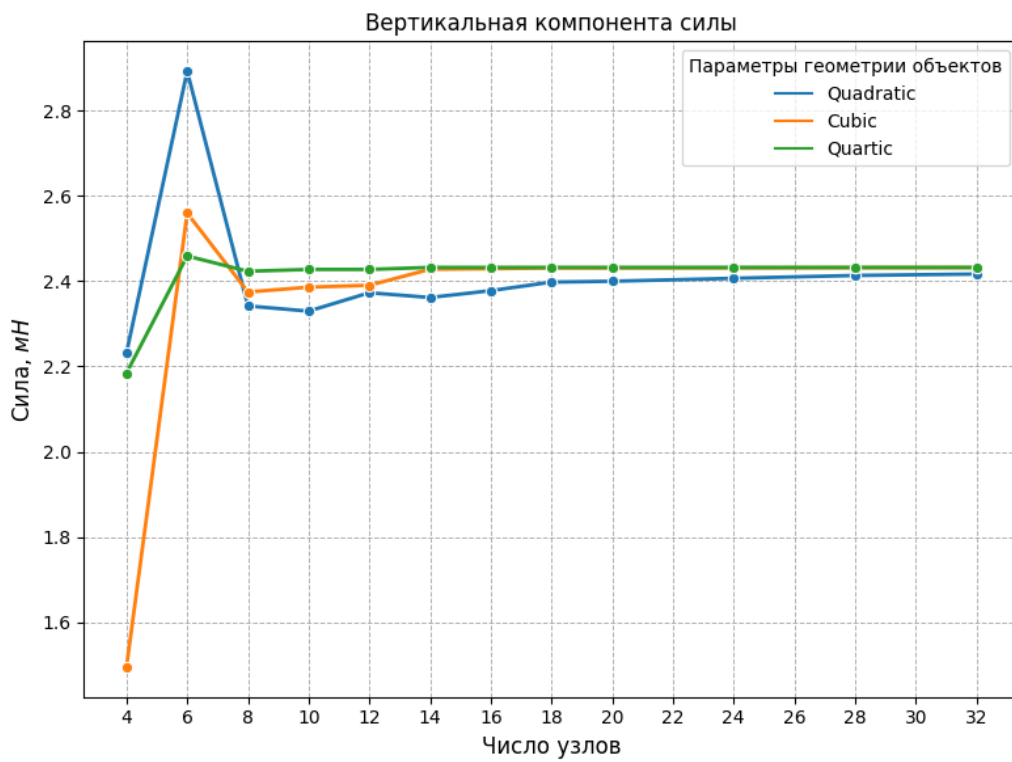


Рисунок 4 — Пример расчетной сетки с двенадцатью узлами на проволоке

Вследствие этого, было принято решение провести исследование зависимости модуля электрической силы, действующей на проволоку, от количества узлов сетки на проволоке и способа аппроксимации функции между узлами. Для этого в диапазоне от 4 до 32 узлов с шагом 4 вычислялась действующая на проволоку сила. Данный шаг был проделан для линейной, квадратичной, кубической и квартной функции аппроксимации между узлами сетки. Также для уточнения особенностей гладких функций шаг в диапазоне 4-20 узлов изменен до двух.



(а)



(б)

Рисунок 5 — Графики зависимости силы от параметров расчетной сетки

2.3 Интерпретация результатов

На Рис. 5а видно, что линейная функция аппроксимации показывает наиболее плохой результат среди других функций, так как она еще продолжает сходиться с ростом числа узлов и неясно, когда будет достигнут этот максимум. Из Рис. 5б что квадратичный и кубический порядок дискретизации сходятся медленнее, чем четвертый порядок, кроме того не была достигнута асимптота для квадратической дискретизации, для решения данной проблемы требуется увеличить количество узлов, что приведет к росту параметров и увеличению времени счета. Однако, из графика видно, что для расчета электростатических сил оптимален четвертый порядок геометрии, но это может быть вычислительно затратно в более сложных моделях.

Также из графиков можно оценить вертикальную электрическую силу, действующую на единицу длины проволоки. Она равна 2.43 мН/м. Полученное значение может быть использовано в дальнейшем для вычисления отклонения проволоки от положения равновесия.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной научно-исследовательской работы было проведено моделирование электрического поля в детекторе темной материи DarkSide-20k.

Произведённое моделирование позволило оценить распределение электрического поля рядом с проволокой. Результаты симуляций могут быть использованы для оптимизации конфигурации детектора и оценки его чувствительности к слабым сигналам, вызванным взаимодействием частиц темной материи с ядрами. Также в ходе работы было изучено ПО COMSOL и особенности его работы.

Тем не менее, остаются определенные аспекты, требующие дальнейшего изучения. В частности, необходима валидация результатов моделирования на основе данных с реального прототипа установки. Также перспективным направлением является использование более детализированных моделей, учитывающих сложные эффекты и геометрию установки.

В дальнейшем, основываясь на конфигурации поля в детекторе, полученного в данной работе, можно произвести воссоздание траектории электрона, возникшего после взаимодействия с ядрами аргона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fritz Zwicky. On the masses of nebulae and of clusters of nebulae. *The Astrophysical Journal*, 86:217, 1937.
2. C. E. Aalseth et al. Darkside-20k: A 20 tonne two-phase lar tpc for direct dark matter detection at lngs. *The European Physical Journal Plus*, 133(3), 2018.
3. The Global Argon Dark Matter Collaboration. Future dark matter searches with low-radioactivity argon. https://indico.cern.ch/event/765096/contributions/3295671/attachments/1785196/2906164/DarkSide-Argo_ESPP_Dec_17_2017.pdf. Дата обращения: 2024-12-25.