На правах рукописи



ДОЛГАНОВ Григорий Дмитриевич

КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОНОВ В ДВУХФАЗНЫХ АРГОНОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ ДЛЯ ПОИСКА ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

1.3.15. – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

А в т о р е ф е р а т диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный Скорохватов Михаил Дмитриевич, доктор физикоруководитель: математических наук, профессор, руководитель Отделения физики нейтрино НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва).

Официальные Куденко Юрий Григорьевич, доктор физикооппоненты: математических наук, профессор, заведующий Лабораторией физики электрослабых взаимодействий Института ядерных исследований Российской академии наук (г. Москва г. Троицк);

> Болоздыня Александр Иванович, доктор физикоматематических наук, профессор, заведующий научноисследовательской Межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Москва).

Ведущая Московский государственный университет имени
 организация: М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (г. Москва).

Защита состоится 20 марта 2024 г., начало в 16:30, на заседании диссертационного совета 02.1.003.05, на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан ____ 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 02.1.003.05, д.ф.-м.н., доц.

B.p.S.

А. Л. Барабанов

І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сегодня существование скрытой массы Вселенной, или, в наиболее распространённой терминологии, Темной материи (далее TM), почти не подвергается сомнению благодаря ряду астрофизических и космологических свидетельств. Однако до сих пор нет ответа на важный вопрос о природе TM.

В соответствии с одной из современных гипотез, ТМ состоит из еще неизвестных частиц, которые введены в различных расширениях Стандартной модели (далее СМ). Одним из основных кандидатов являются слабовзаимодействующие массивные частицы (далее СВМЧ). Согласно космологическим наблюдениям [1], частицы ТМ должны образовывать массивные скопления, пронизывающие галактики. Предполагается, что в результате движения Солнечной системы в галактике Млечный Путь происходят столкновения СВМЧ с материей земных объектов, приводящие к образованию ядер отдачи, которые могут быть зарегистрированы в чувствительном объеме детектора.

Для поиска CBMЧ (массой от нескольких ГэВ/с² до ТэВ/с²) наиболее строгие ограничения (~9,8×10⁻⁴⁸ см² для СВМЧ с массой $36 \Gamma ЭB/c^2$) получены двухфазных при использовании времяпроекционных камер (далее ВПК) на основе сжиженных благородных газов [2,3]. Такие ВПК представляют собой сосуд (рис. 1), большая часть которого заполнена сжиженным благородным газом, за исключением сравнительно тонкого слоя (толщиной ~1 см) — газового кармана в его На небольшой глубине под газовым карманом части. верхней располагается сетка, разделяющая объём ВПК на дрейфовую часть с низкой напряжённостью электрического поля (~0,1-1,0 кВ/см), и область газового кармана с высокой напряжённостью поля (~4-7 кВ/см).

Пространственные и энергетические характеристики событий в таких детекторах восстанавливаются с использованием двух сигналов: сцинтилляционного сигнала (S1) в дрейфовом объёме и электролюминесцентного сигнала (S2) в газовом промежутке. Временной интервал между этими сигналами соответствует времени дрейфа ионизационных электронов до поверхности сжиженного благородного газа (рис. 1).



Рисунок 1 — Принцип работы двухфазного детектора: (A) – схематическое изображение двухфазного детектора и формирования сигналов S1 и S2, (Б) – форма сигналов S1 и S2, временной интервал между которыми соответствует времени дрейфа электронов (вертикальной координате события в детекторе).

рабочих Задача определения потенциалов, задающих электрическое в детекторе, поле а также учета искажений И неоднородностей полей, оказывающих существенное влияние на пространственно-временные амплитудные И характеристики регистрируемых событий, является, как показывает опыт эксплуатации двухфазных ВПК, актуальной задачей, как для проектирования новых ВПК, так и для оптимизации полей уже работающих детекторов.

В данной работе разработана оптимизация пространственного метода моделирования электрического поля и движения электронов в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов. Предложенный метод применён для расчета конфигураций электрических полей в работающем детекторе ReD [4] и в проектируемом детекторе DarkSide-20k [5] в рамках сотрудничества с коллаборацией DarkSide, входящей в состав Global Argon Dark Matter Collaboration, нацеленной на создание серии будущих экспериментов, которые позволят максимально использовать преимущества жидкого аргона в качестве сцинтиллятора. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными детектора ReD и позволили объяснить особенности, связанные с неоднородностями поля, накоплением заряда на стенках детектора, а также искажения формы электролюминесцентного сигнала S2 в результате прохождения электронного облака через сетку детектора. Полученные в данной работе данные моделирования электрического поля и кинетики электронов в детекторе DarkSide-20k используются в настоящее время при его проектировании.

<u>Цель работы:</u>

Исследование кинетики электронов в условиях неоднородности электрического поля в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов.

В соответствии с поставленной целью решены нижеследующие задачи.

- 1. Моделирование электрического поля и кинетики электронов в двухфазных ВПК детекторов ReD и DarkSide-20k.
- 2. Проверка результатов моделирования путём сравнения расчетов процессов дрейфа и диффузии электронов с имеющимися экспериментальными данными для детектора ReD.
- 3. Выявление причин возникновения неоднородностей электрического поля и их влияния на работу двухфазных аргоновых ВПК на примере детекторов ReD и DarkSide-20k.
- 4. Определение оптимальных значений рабочих потенциалов, задающих электрическое поле в детекторе и обеспечивающих минимальное искажение выходных сигналов, как для работающего детектора ReD, так и для будущего крупномасштабного детектора DarkSide-20k.

<u>Научная новизна:</u>

- 1. Оптимизирован алгоритм для моделирования кинетики электронов в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов.
- 2. Изучено влияние неоднородности электрического поля на работу двухфазных ВПК детекторов ReD и DarkSide-20k.
- Показано влияние накопления заряда на стенках детектора и искажения электронного облака при его прохождении сетки на работу двухфазных ВПК на основе сжиженного аргона на примере детекторов ReD и DarkSide-20k.

Практическая значимость:

Реализованный метод моделирования кинетики электронов в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов позволяет учесть при обработке и анализе полученных с его помощью данных:

- 1. влияние неоднородности поля при восстановлении координат событий;
- 2. процесс накопления заряда на стенках камеры и оценить его влияние на работу детектора;
- 3. изменение формы импульса сцинтилляционного сигнала ввиду искажения электронного облака при его прохождении через сетку.

Таким образом, реализованный метод позволяет повысить точность определения амплитудных и пространственно-временных характеристик регистрируемых событий не только уже работающих, но и проектируемых двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1. Предложена оптимизация метода 3D-моделирования кинетики электронов в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов.
- 2. Показано влияние эффекта неоднородности электрического поля на амплитудные и пространственно-временные характеристики событий в двухфазных аргоновых ВПК ReD и DarkSide-20k.
- Продемонстрирована необходимость учёта накопление заряда на стенках двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов для повышения точности результатов моделирования электрического поля.
- Показано, что фокусировка электронов при прохождении через сетку ВПК приводит к возникновению запаздывающих электронов и меняет форму электролюминесцентного сигнала.

<u>Достоверность:</u>

Достоверность основных научных результатов данной диссертационной работы обеспечивается их согласованностью с экспериментальными данными.

<u>Личный вклад автора:</u>

- Подготовка 3D геометрии конструкций детекторов ReD и DarkSide-20k для использования в программном пакете «COMSOL Multiphysics» [6] и последующее проведение на его основе моделирования электрического поля;
- 2. Определение оптимальных значений рабочих потенциалов анода, катода, сетки и формирующих поле колец для детекторов ReD и DarkSide-20k;
- 3. Разработка кода для моделирования кинетики электронов в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов;
- 4. Проведение моделирования кинетики электронов в детекторах ReD и DarkSide-20k с учетом полученных данных о конфигурации электрического поля в этих детекторах;
- Объяснение наблюдённого в детекторе ReD изменения амплитуды электролюминесцентного сигнала и максимального времени дрейфа электронов со временем, прошедшим с момента создания электрического поля;
- 6. Оценка влияния неоднородностей электрического поля и искажений электронного облака при прохождении сетки на работу детекторов ReD и DarkSide-20k.

Апробация работы:

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, докладывались на двух международных научных конференциях:

- 1. The 6-th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (Москва, Россия, с 29 ноября по 2 декабря 2022 г.);
- LXX International conference "NUCLEUS 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies" (конференция проводилась дистанционно (online), 11–17 октября 2020 г.).

Получено авторское свидетельство на разработанный код для моделирования кинетики электронов в электрическом поле ВПК:

1. Долганов Г.Д., Ильясов А.И. Программа для ЭВМ: "Программа для моделирования дрейфового движения электронов под воздействием электрического поля для двухфазных аргоновых детекторов

"ElectronDrift3D.cpp". Свидетельство о государственной регистрации программы РФ № 2022618774; опубл. 13 мая 2022 г.

Основные публикации по теме диссертации:

Основные результаты по теме диссертации изложены в трёх работах, опубликованных в период с 2021 по 2023 гг. в рецензируемых научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus и имеющих квартили Q1 (одна работа) и Q3–Q4 (две работы).

<u>Основное содержание диссертации опубликовано в следующих</u> работах:

- Performance of the ReD TPC, a novel double-phase LAr detector with silicon photomultiplier readout / P. Agnes, S. Albergo, ... G. Dolganov [et al.] // European Physical Journal C. — 2021. — Vol. 81, № 11. — P. 1014. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09801-6.
- Dolganov, G. D. Investigation of the Electric Field Uniformity in the ReD Detector / G. D. Dolganov for the ReD Working Group of DarkSide Collaboration // Physics of Particles and Nuclei. — 2022. — Vol. 53, № 2. — P. 493–496. — DOI: 10.1134/S1063779622020289.
- Dolganov, G. D. Estimation of the Influence of the Electric Field Nonuniformity on the Error of Reconstructed Coordinates of Events in the ReD TPC / G. D. Dolganov for the ReD Working Group of the Global Argon Dark Matter Collaboration // Physics of atomic nuclei. — 2023. — Vol. 86, № 5. — P. 838–840. — DOI: 10.1134/S1063778823050149.

Объем и структура диссертации

Основной текст диссертации изложен на 123 страницах и состоит из введения, четырех глав и заключения. В тексте содержится 67 рисунков и 3 таблицы. Список цитированной литературы состоит из 168 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость результатов исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко рассмотрены: предпосылки для поиска ТМ, основные теории о её природе, свойства слабовзаимодействующих массивных частиц (СВМЧ) как одного из основных кандидатов на роль частиц ТМ, основные методы непосредственного (прямого) детектирования СВМЧ и текущие ограничения на пространство массысечения взаимодействия СВМЧ.

астрофизические Приведены основные И космологические свидетельства существования скрытой массы: кривые скоростей вращения галактик, гравитационное линзирование скоплениями галактик, анизотропия реликтового излучения (СМВ) [7], состав Вселенной и прочие ограничения космологической модели, полученные с помощью СМВ и других методов, указывающие на существование ТМ [8], N-body крупномасштабная структура [9], Вселенной [10]. симуляция нуклеосинтез и теория Большого Взрыва [11].

Рассмотрены существующие ограничения на параметры гипотетических частиц ТМ.

Среди всех кандидатов на TM за последние десятилетия основное внимание было направлено на тепловые CBMЧ, которые образовались в результате тепловой «закалки» [12], масса которых может находиться в достаточно широком диапазоне от нескольких эВ до ~120 ТэВ (в энергетической системе единиц).

Для обнаружения CBMЧ детектор должен быть способен однозначно идентифицировать небольшое число событий с образованием ядер или электронов отдачи в результате взаимодействия CBMЧ с атомами мишени детектора в течение длительной экспозиции.

Сечение рассеяния СВМЧ-ядро может быть представлено в виде спин-независимой и спин-зависимой компонент [13].

На текущий момент, наиболее строгие ограничения спиннезависимого сечения взаимодействия для масс СВМЧ >3 ГэВ/с² были получены в эксперименте LUX-ZEPLIN, использующем двухфазную ВПК на основе мишени из 10 т сжиженного ксенона [2]. В диапазоне масс 1,8-3,0 ГэВ/с² ограничения были наиболее строгие установлены экспериментом DarkSide-50 [3] с двухфазным ВПК на основе сжиженного качестве детектора аргона в И на основе данных только электролюминесцентного сигнала (S2).

В жидком аргоне (механизм сцинтилляции одинаков для всех сжиженных благородных газов) возбужденный в результате столкновений атом образует с нейтральным атомом возбужденный димер, который впоследствии испускает гамма-квант:

$$Ar^* + Ar \to Ar_2^* \to 2Ar + \gamma. \tag{1}$$

При ионизации положительные ионы образуют заряженные димеры с нейтральными атомами. Свободные электроны термализуются, после чего могут быть захвачены (рекомбинация). Это также приводит к образованию возбужденных димеров и, следовательно, к испусканию сцинтилляционного света:

$$Ar^+ + Ar \to Ar_2^+; \quad Ar_2^+ + e^- \to Ar_2^* \to 2Ar + \gamma.$$
⁽²⁾

Одной из ключевых особенностей использования благородных газов в качестве сцинтиллятора является возможность отделить события с электронами событий ядрами отдачи от с отдачи по форме сцинтилляционного импульса. Возбуждённый атом благородных газов может находится в двух состояниях: синглетном ${}^{1}\Sigma_{n}^{+}$ и триплетном ${}^{3}\Sigma_{n}^{+}$. В то время как в жидком ксеноне времена жизни этих состояний равны $\tau_1 \approx 4$ нс и $\tau_2 \approx 22$ нс, для жидкого аргона они отличаются более чем в 200 раз: $\tau_1 \approx 7$ нс и $\tau_2 \approx 1.6$ мкс [14] (нижний индекс 1 обозначает синглет, а 2 — триплет).

Двухфазные ВПК представляют собой дальнейшее развитие детекторов на основе сжиженных благородных газов. Впервые идея использования двухфазного режима работы для детекторов с мишенями из сжиженных благородных газов была разработана и испытана в МИФИ Б. А. Долгошеиным и др. ещё в 1970 г. [15]. В современных двухфазных ВПК обычно используются массивы фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), установленных над и под мишенью, которые позволяют регистрировать как сцинтилляционный сигнал в мишени (S1), так и электролюминесцентный (S2) сигнал в газовой фазе. Электрическое дрейфовое поле ($E_d = 0,1-1,0$ кВ/см), созданное в объёме жидкой мишени, вытягивает электроны ионизации с трека провзаимодействовавшей

частицы к поверхности сжиженного газа. Электролюминесцентное поле (~4-10 кВ/см) извлекает электроны из сжиженного газа через границу раздела фаз и ускоряет их в газовом кармане, где они создают сигнал S2 в результате столкновений с атомами газа. Для разделения дрейфового и электролюминесцентного поля на несколько мм ниже поверхности жидкости устанавливается сетчатый электрод. Сегментация матрицы ФЭУ позволяет локализовать взаимодействие в плоскости, дрейфа, перпендикулярной направлению чему дополнительно способствует яркость сигнала S2, в то время как вертикальное положение определяется временем дрейфа ионизационных электронов, т.е. разницей во времени между сигналами S1 и S2 (рис. 1).

Идею использования двухфазных ВПК для поиска СВМЧ впервые выдвинули А.С. Барабаш и А.И. Болоздыня в 1989 г. [16]. С момента получения первых результатов в ZEPLIN-II [17] в 2007 году двухфазные ВПК на основе LXe лидируют в поиске CBMЧ с массой выше нескольких ГэB/c².

Во второй главе исследованы особенности моделирования электрического поля и кинетики электронов в нём для двухфазных детекторов на основе сжиженных благородных газов.

Одним из необходимых условий для эффективной работы двухфазных ВПК является однородность электрического поля в них. Неоднородность поля в детекторе приводит смещению электронного облака в процессе дрейфа и нелинейной зависимости времени дрейфа от вертикальной координаты события. Кроме того, число вытягиваемых ионизационных электронов, как и количество фотонов, приходящихся на один электрон в сигнале S2, тоже зависят от напряжённости электрического поля. Таким образом, неоднородность электрического поля в детекторе существенно затруднит его калибровку и потенциально может привести к снижению точности его работы.

Отметим, что моделирование является единственным способом получения информации о конфигурации электрического поля в детекторе. Однако в случае работы ВПК с неоднородным дрейфовым полем возможное накопление заряда на стенках камеры значительно затруднит моделирование реальной рабочей конфигурации электрического поля в детекторе. Из-за сильной разницы напряжённости электрического поля в дрейфовом объёме и газовом кармане, происходит так называемая «утечка поля» сквозь разделяющую эти объёмы сетку (рис. 2).



Рисунок 2 — Эквипотенциальные линии электрического поля в непосредственной близости от проволочек сетки в детекторе DarkSide-20k.

Другой возможный источник неоднородности поля — краевые эффекты, связанные с изменением утечки поля вблизи стенок камеры изза разницы коэффициентов диэлектрической проницаемости материалов.

На сегодняшний день моделирование электрического поля и дрейфа электронов в нём реализовано, например, для двухфазных ВПК на основе LXe в эксперименте LZ [18], и для двухфазного ВПК на основе LAr, использующего газовые электронные умножители в качестве электродов, создающих дрейфовое и электролюминесцентное поля [19]. Однако моделирование и электрического поля, и дрейфа, и диффузии электронов в нём необходимо проводить для каждой двухфазной ВПК.

Для моделирования дрейфа электронов обычно используется программный пакет «Garfield++» [20], моделирующий дрейф электронов на основе уже имеющейся информации о конфигурации электрического поля в детекторе. Однако данный программный пакет ориентирован на работу с неоднородными полями. В силу достаточно больших размеров двухфазных ВПК и относительной однородности поля в них, функционал данного программного пакета для них избыточен, при этом потребуется

значительные вычислительные ресурсы и время для моделирования дрейфа электронов в детекторе.

В рамках данной работы был предложен и реализован для детекторов ReD и DarkSide-20k метод моделирования дрейфа и диффузии электронов, оптимизированный для работы с двухфазными детекторами.

Скорость дрейфа электронов в предложенном методе рассчитывалась по формуле:

$$v\left[\frac{MM}{MKC}\right] = \mu \frac{E}{100}; \ \mu = \left(\frac{a_0 + a_1E + a_2E^{3/2} + a_3E^{5/2}}{1 + (a_1/a_0)E + a_4E^2 + a_5E^3}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где: μ — подвижность электронов, $a_0 = 551,6$ [см²/B/c]; $a_1 = 7158,3$; $a_2 = 4440,43$, $a_3 = 4,29$; $a_4 = 43,63$; $a_5 = 0,2053$; $T_0 = 89$ K; *E* [кB/см] — напряжённость электрического поля; *T* [K] — температура жидкого аргона [21, 22].

Коэффициент диффузии вычислялся по формулам [21]:

$$D_L = \frac{\mu \epsilon_L}{e}; \quad \frac{D_L}{D_T} = 1 + \frac{E}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial E}, \tag{4}$$

где D_L — коэффициент продольной диффузии (вдоль направления электрического поля), D_T – коэффициент поперечной диффузии, μ — подвижность электронов, ϵ_L — продольная энергия дрейфующих электронов:

$$\epsilon_L = \left(\frac{b_0 + b_1 E + b_2 E^2}{1 + (b_1/b_0)E + b_3 E^2}\right) \left(\frac{T}{T_1}\right),\tag{5}$$

где: $b_0 = 0,0075$ [эВ]; $b_1 = 742,9$; $b_2 = 3269,6$; $b_3 = 31678,2$; $T_1 = 87$ К.

Для моделирования диффузии электронного облака из каждой точки, соответствующей начальной координате события, запускалось по 100 электронов. Определение значения координаты сигнала S2 и времени дрейфа электронного облака осуществлялось по среднему значению координат электронов на поверхности и времени их дрейфа.

<u>В третьей главе</u> приведены результаты моделирования электрического поля и дрейфа электронов для детектора ReD. Проведено сравнение результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными, предложено объяснение изменения максимального наблюдаемого (полного) времени дрейфа электронов и амплитуды сигнала S2 со временем, прошедшим с момента создания электрического поля в детекторе.

Основная цель эксперимента ReD — проверка чувствительности двухфазных ВПК к направлению трека детектируемых частиц [4]. Помимо основной цели эксперимента, ВПК ReD может использоваться для определения характеристик отклика детектора на существенно низкоэнергетические (≲1 кэВ) ядра отдачи, являющиеся потенциальной сигнатурой легких СВМЧ с массами в несколько ГэВ/с².

Внешний вид ВПК эксперимента ReD схематично показан на рисунке 3. Верхнее и нижнее окна покрыты с обеих сторон прозрачным токопроводящим слоем оксида индия-олова толщиной 25 нм, который позволяет окнам служить в качестве электродов (анода и катода). Вытягивающая сетка изготовлена из нержавеющей стали толщиной 50 мкм, с шестиугольными ячейками шириной 1,95 мм.



Рисунок 3 — Схематический рисунок поперечного сечения ВПК эксперимента ReD.

Ранее, в эксперименте ReD для нахождения оптимальных потенциалов катода, анода и первого кольца проводилось моделирование электрического поля в приближении 2D геометрии с использованием программного пакета COMSOL. Однако в этом случае наблюдалось

значительное расхождение между экспериментально измеренной скоростью дрейфа электронов и результатами моделирования. При моделировании в 3D геометрии, использование потенциалов, полученных в рамках 2D модели, приводит к неоднородности поля ~35–50 В/см для всех рассмотренных конфигураций.

В рамках данной работы для целевых значений дрейфового поля от 50 В/см до 1620 В/см были найдены оптимальные значения потенциалов анода, катода и первого кольца, обеспечивающие наиболее однородное дрейфовое поле.

Следует отметить, что из-за большей «утечки поля» сквозь сетку внутри акриловых стенок возникает локальная неоднородность поля, не позволяющая получить полностью однородное дрейфовое поле в ВПК ReD.

В результате тепловой диффузии ионизационные электроны образуют «облако», дрейфующее к аноду. Из-за «утечки поля» сквозь сетку, конфигурация электрического поля вблизи её проволочек такова, что дрейфующие электроны фокусируются в центры ячеек сетки при прохождении через неё. При этом, эффект фокусировки будет влиять на электроны облака в разной степени, в зависимости от их положения относительно проволочек сетки.

Фокусировка электронов влияет не только на наблюдаемый поперечный размер электронного облака, но и на его продольный размер. На рисунке 4 представлена зависимость дисперсии времени дрейфа электронов в зависимости от начальных координат событий. Увеличение дисперсии времени дрейфа электронов для событий под проволочками сетки вызваны отдельными запаздывающими электронами, время дрейфа которых увеличилось на несколько мкс из-за фокусировки (рис. 5).

В результате диффузии или под влиянием неоднородного поля часть электронов облака может оказаться на стенке камеры детектора. По итогам моделирования, на стенках камеры оседает ≈7,5% от выбранного числа пробных электронов, начальные координаты которых равномерно распределены по объёму детектора для конфигурация электрических потенциалов: анод — 5211 В, катод — (-744) В, первое кольцо — 70 В.



Рисунок 4 — Зависимость дисперсии времени дрейфа электронов в облаке от начальной координаты электронов. Расстояние дрейфа электронного облака до сетки равно 5 мм. Конфигурация электрического поля: анод = 5211 В, катод = -744 В, первое кольцо = 70 В.



Рисунок 5 — Усреднённое распределение времён дрейфа электронов в облаке относительно среднего времени дрейфа для событий с дисперсией времени дрейфа электронов облака ≤0,015 мкс² (А), >0,015 мкс² (Б), и дрейфовым расстоянием до сетки равным 5 мм. Конфигурация электрических потенциалов: анод — 5211 В, катод — (-744) В, первое кольцо — 70 В.

Накопление заряда на стенках ВПК должно компенсировать неоднородность электрического поля, приводящую к оседанию электронов на стенках. Для оценки величины заряда, при котором дальнейшее оседание электронов на стенки прекратится, модель детектора в COMSOL была модифицирована. Внутренние стенки ВПК от катода до сетки были разбиты на полоски шириной 1 мм, на которых задавался поверхностный заряд, пропорциональный количеству осевших (по результатам моделирования) на стенках электронов. Для оценки

16

необходимого заряда использовалась конфигурация потенциалов: анод — 5211 В, катод — (−744) В, первое кольцо — 86 В. Установлено, что при распределении по стенкам камеры заряда ≈21,4 пКл получающаяся конфигурация поля практически не приводит к дальнейшему накоплению заряда на стенках.

Если предположить, например, что этот заряд накапливается в течение суток, то необходимый темп накопления составит ≈1550 электронов в секунду. При частоте фоновых событий ~40 Гц, средней энергии ~160 кэВ, и выходе электронов ~8 е/кэВ, количество ионизационных электронов, рождающихся в детекторе, будет составлять ~50000 электронов в секунду. Следовательно, необходимый темп накопления заряда соответствует ~3% оседающих электронов.

Из результатов моделирования следует также параболическая зависимость полного времени дрейфа от потенциала первого кольца с минимумом в области ≈86 В. При сравнении полученных величин с измеренными следует отметить значительный разброс полного времени дрейфа для разных наборов данных при одинаковой конфигурации электрических потенциалов (рис. 6).



Рисунок 6 — График зависимости полного времени дрейфа согласно результатам моделирования и экспериментальными данным.

Потенциал первого кольца меньше оптимально (обеспечивающего однородную конфигурацию поля) приводит к «фокусировке»

дрейфующих электронов в центр ВПК. В этом случае заряд на стенках не накапливается и не может скомпенсировать неоднородность поля. Более того, если на стенках уже присутствует заряд, то возникнет дополнительная неоднородность поля.

Для оценки скорости накопления заряда и его влияния на работу детектора анализировались две серии измерений, в которых конфигурация поля оставалась постоянной на протяжении всего времени работы детектора (рис. 7).



Рисунок 7 — Зависимость полного времени дрейфа электронов от времени, прошедшего с задания электрического поля в детекторе. Конфигурация: потенциал анод — 5211 В, катода — (-744) В, первого кольца — 86 В.

В отличие от зависимости полного времени дрейфа от потенциала первого кольца, в данном случае наблюдается увеличение полного дрейфа. Этот эффект объясняется тем, что в данном случае накопление заряда обусловлено преимущественно локальной неоднородностью поля из-за большей «утечки поля» внутри стенок камеры детектора. Как видно из рисунка 8А, эта неоднородность приводит к уменьшению полного времени дрейфа электронов вблизи стенок камеры. При добавлении ≈21,4 пКл заряда на стенки ВПК разница времени дрейфа между центральной и периферийной частью детектора уменьшается (рис. 8Б).



Рисунок 8. График зависимости полного времени дрейфа от конечной координаты электронов для всей области до (А) и после (Б) добавления заряда (≈21,4 пКл) на стенки камеры. Конфигурация: потенциал анод — 5211 В, катода — (−744) В, первого кольца — 86 В.

Компенсация локальной неоднородности поля в результате накопления заряда на стенках ВПК будет сопровождаться не только увеличение наблюдаемого полного времени дрейфа электронов, но и снижение темпов дальнейшего накопления заряда. Это соответствует экспериментальным результатам для двух рассмотренных выше серий измерений, для которых амплитуда сигнала S2 в центре детектора оставалась неизменной, а в периферийной части — увеличивалась с постепенным выходом на плато.

<u>В четвёртой главе</u> приводятся результаты моделирования электрического поля и дрейфа электронов для детектора DarkSide-20k. Представлены результаты оценки возможной неоднородности электрического поля как в газовом кармане, так и в дрейфовом объёме.

В основе детектора DarkSide-20k [5] лежит двухфазная ВПК с 49,7 т. жидкого аргона в активном объеме (рис. 9). Объем ВПК представляет собой правильную восьмиугольную призму, диаметром 350 см и высотой 349 см. Стенки ВПК выполнены из акрила, а катод, анод и формирующие поле кольца создаются с помощью Clevios — прозрачного проводящего полимера. Газовый карман, в котором происходит электролюминесценция, имеет толщину 7,0±0,5 мм. Вытягивающая сетка представляет собой массив параллельно натянутых с шагом 3 мм проволочек диаметром 150 мкм.

Используя опыт, полученный в ходе работ по исследованию и моделированию электрического поля для детектора ReD, было проведено

19

моделирование электрического поля для детектора DarkSide-20k используя программный пакет COMSOL.

В результате получены значения потенциалов сетки, первого формирующего поля кольца и катода, обеспечивающие однородность электрического поля в дрейфовом объёме и газовом кармане ВПК.



Рисунок 9 — Внешний вид ВПК детектора DarkSide-20k [23].

Наблюдаемая зависимость дисперсии координат электронов облака вдоль вертикальной координаты имеет линейный характер для времени дрейфа ≥500 мкс:

 $\sigma_L^2 = 2D_L + \sigma_0^2$, где $D_L = 6,002 \pm 0,010$ см²/с — продольный коэффициент диффузии ($D_L = 6,0689$ см²/с для 200 В/см и 88,2 К);

 $\sigma_0^2 = 0,155 \pm 0,005 \text{ мм}^2$ — компонента, связанная с увеличением размера облака при прохождении сетки.

Так как увеличение дисперсии координат электронов облака вдоль вертикальной координаты (времени дрейфа) в области малых времён дрейфа преимущественно связано с возникновением запаздывающих электронов, то было необходимо исследовать их влияние на наблюдаемую форму сигнала S2. Для этого, на основе полученных распределений времён дрейфа электронов, генерировался сигнал S2 по формулам из работы [24]:

$$y_{ideal}(t;\tau_1,\tau_2,p,T) = p \cdot y'_{ideal}(t;\tau_1,T) + (1-p) \cdot y'_{ideal}(t;\tau_2,T); \quad (6)$$

$$y'_{ideal}(t;\tau,T) = \frac{1}{T} \begin{cases} 0, & \text{if } t < 0\\ 1 - e^{-t/T}, & \text{if } 0 < t < T, \\ e^{-(t-T)/T} - e^{-t/T}, & \text{if } t < T \end{cases}$$
(7)

где t — время прошедшее с выхода первого электрона в газовую фазу, T = 1,2 мкс — время дрейфа электронов в газовом кармане, $\tau_1 = 0,011$ мкс и $\tau_2 = 3,2$ мкс — время быстрой и медленной компоненты сцинтилляции, p = 0,08 — доля быстрой компоненты.

Сгенерированный сигнал аппроксимировался функцией [24]:

$$y_{fit}(t;\tau_1,\tau_2,p,T,\sigma,A,\sigma,y_0,t_0) = y_0 + A \times y(t-t_0;\tau_1,\tau_2,p,T,\sigma); \quad (8)$$

$$y(t;\tau_1,\tau_2,p,T,\sigma) = p \cdot y'(t;\tau_1,T,\sigma) + (1-p) \cdot y'(t;\tau_2,T,\sigma);$$
(9)

$$y'(t;\tau,T,\sigma) = \frac{1}{2T} \big(y''(t;\tau,\sigma) - y''(t-T;\tau,\sigma) \big); \tag{10}$$

$$y''(t;\tau,\sigma) = \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right) - e^{-t/T}e^{\sigma^2/2\tau^2}\operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma^2 - t\tau}{\sqrt{2}\sigma\tau}\right).$$
(11)

Параметры σ , A, t₀ определялись по результатам наилучшей аппроксимации, а T, τ_1 , τ_2 и р были зафиксированы соответственно таковым для сгенерированного сигнала.

Зависимость продольного размера облака от времени дрейфа, полученная путём аппроксимации сгенерированного сигнала S2, сохраняет свою линейность с практически неизменным коэффициентом диффузии $D_L = 6,014 \pm 0,011 \text{ см}^2/\text{с}$, однако параметр, отвечающий за увеличение размера облака при его прохождении через сетку, уменьшается до значения $\sigma_0^2 = 0,109 \pm 0,006 \text{ мм}^2$. Это изменение хорошо видно на рисунке 10, где представлены зависимости продольного размера (дисперсии) облака от времени дрейфа и положения начальной координаты относительно проволочки сетки.

В эксперименте DarkSide-50 также наблюдался скачок в наблюдаемом продольном размере электронного облака [24], который, согласно результатам моделирования кинетики электронов в двухфазных ВПК, вызван искажением формы электронного облака при прохождении сетки. Разница между результатами, полученными при моделировании детектора DarkSide-20k и экспериментальными данными BПК DarkSide-50 может быть объяснена использованием разных типов вытягивающих сеток. Так, искажение размеров электронного облака сильно зависит от шага сетки, а для BПК ReD, в которой используется сетка аналогичная таковой в ВПК DarkSide-50 по результатам моделирования тоже ожидается скачок в наблюдаемом продольном размере электронного облака для времени дрейфа ≥20 мкс. Однако небольшие размеры детектора ReD не позволяют провести точное сравнение результатов работы этих двух детекторов.



Рисунок 10 — График зависимости дисперсии электронного облака вдоль вертикальной координаты от времени его дрейфа и положения начальной координаты относительно проволочки сетки (x=0), полученного из распределения времени дрейфа электронов облака (A) и путём аппроксимации сгенерированного сигнала S2 (Б). Напряжённость дрейфового поля — 200 В/см, поле в газовом кармане — 4200 В/см.

<u>В заключении</u> коротко изложены результаты, полученные в работе.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках настоящей работы реализован метод моделирования электрического поля и кинетики электронов для двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов. Данный метод позволил определить влияние неоднородностей электрического поля на кинетику электронов и работу двухфазных ВПК на основе аргона.

Основные результаты работы можно свести к следующим выводам (итогам):

- 1. Реализован метод 3D-моделирования электрического поля и движения электронов в нём для двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов.
- 2. Определены оптимальные значения рабочих потенциалов, задающих электрическое поле в детекторе как для работающего детектора ReD,

так и для проектируемого крупномасштабного детектора DarkSide-20k, обеспечивающие минимальные искажения выходных сигналов.

- Проведено исследование кинетики электронов в двухфазных ВПК на основе сжиженных благородных газов в условиях неоднородности электрического поля.
- 4. Показано согласие расчетных и экспериментальных характеристик дрейфа и диффузии электронов в электрическом поле для детектора ReD.
- 5. Выявлена причина неоднородностей электрического поля и объяснено их влияние на амплитудные и пространственно-временные характеристики регистрируемых событий.
- 6. Показано, что накопление заряда на стенках детектора существенно изменяет конфигурацию электрического поля в нём.
- Показано, что фокусировка электронов при их прохождении через сетку сопровождается возникновением запаздывающих электронов и приводит к изменению формы электролюминесцентного сигнала.

Список сокращений и условных обозначений:

ТМ – Тёмная материя

WIMP (CBMЧ) – Weakly Interacting Massive Particles (слабовзаимодействующая массивная частица)

TPC (ВПК) – Time projection chamber (время-проекционная камера)

ФЭУ – Фотоэлектронный умножитель

SiPM – Silicon photomultiplier (кремниевый фотоумножитель)

SM (CM) – Standard model (Стандартная модель в физике элементарных частиц)

СМВ – Cosmic microwave background (анизотропия реликтового излучения)

 $B Y \Phi - B a куумный ультрафиолет$

 ${}^{1}\Sigma_{u}^{+}$ – Синглетное возбуждённое состояние молекулы аргона/ксенона

 ${}^{3}\Sigma_{u}^{+}$ – Триплетное возбуждённое состояние молекулы аргона/ксенона

Список литературы:

- Zavala, J. Dark Matter Haloes and Subhaloes / J. Zavala, C. S. Frenk // Galaxies. — 2019. — Vol. 7, № 4. — P. 81. — DOI: 10.3390/galaxies7040081.
- 2. First Dark Matter Search Results from the LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment
 / J. Aalbers, D. S. Akerib, C. W. Akerlof [et al.] // Physical Review Letters.
 2023. Vol. 131, № 4. P. 041002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.041002.
- Search for Dark-Matter–Nucleon Interactions via Migdal Effect with DarkSide-50 / P. Agnes, I. F. M. Albuquerque, T. Alexander [et al.] // Physical Review Letters. — 2023. — Vol. 130, № 10. — P. 101001. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.101001.
- Performance of the ReD TPC, a novel double-phase LAr detector with silicon photomultiplier readout / P. Agnes, S. Albergo, ... G. Dolganov [et al.] // European Physical Journal C. 2021. Vol. 81, № 11. P. 1014. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09801-6.
- DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS / C. E. Aalseth, F. Acerbi, P. Agnes [et al.] // European Physical Journal Plus. — 2018. — Vol. 133. — P. 131. — DOI: 10.1140/epjp/i2018-11973-4.
- 6. COMSOL Multiphysics®, Version 5.4, Stockholm, Sweden (2018). https://www.comsol.it. Accessed June 2021 (дата обращения: 15.08.2023).
- Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters / N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown [et al.] // Astronomy and Astrophysics. 2020. Vol. 641. P. A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910.
- Li, H. Comparison of distance information given by SN Ia, BAO and CMB /H. Li// Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics. — 2011. — Vol. 697, № 3. — P. 173–177. — DOI: 10.1016/j.physletb.2011.01.060.
- Baldi, M. Dark Energy simulations / M. Baldi // Physics of the Dark Universe. — 2012. — Vol. 1, № 1–2. — P. 162–193. — DOI: 10.1016/j.dark.2012.10.004.

- Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution / V. Springel, S.D.M. White, A. Jenkins, et al.// Nature. 2005. Vol. 435. P. 629–636. DOI: 10.1038/nature03597.
- D Dar, A. Baryonic Dark matter and Big Bang Nucleosynthesis / A. Dar. // Astrophysical Journal. — 1995. — Vol. 449. — P. 550–553. — DOI: 10.1086/176078.
- Baer, H. Dark matter production in the early Universe: Beyond the thermal WIMP paradigm. / H. Baer, K.Y. Choi, J.E. Kim, L. Roszkowski. // Physics Reports. — 2015. — Vol. 555. — P. 1–60. — DOI: 10.1016/j.physrep.2014.10.002.
- Schumann, M. Direct detection of WIMP dark matter: Concepts and status.
 / M. Schumann. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2019. Vol. 46. — P. 103003. — DOI: 10.1088/1361-6471/ab2ea5.
- 14. Effect of ionization density on the time dependence of luminescence from liquid argon and xenon / A. Hitachi, T. Takahashi, N. Funayama [et al.] // Physical Review B. 1983. Vol. 27, № 9. P. 5279–5286. DOI: 10.1103/PhysRevB.27.5279.
- Долгошеин, Б. А. Новый метод регистрации следов ионизующих частиц в конденсированном веществе / Б. А. Долгошеин, В. Н. Лебеденко, Б. У. Родионов // Письма в ЖЭТФ. — 1970. — Т. 11. — С. 513–516.
- 16. Барабаш, А. С. Как зарегистрировать "тёмное вещество" галактики, если его составляют нейтральные слабовзаимодействующие частицы с массами 1 ÷ 10 ГэВ/с² / А. С. Барабаш, А. И. Болоздыня // Письма в ЖЭТФ. — 1989. — Т. 49, № 6. — С. 314–317.
- 17. First limits on WIMP nuclear recoil signals in ZEPLIN-II: A two-phase xenon detector for dark matter detection / G. J. Alner, H. M. Araújo, A. Bewick [et al.] // Astroparticle Physics. 2007. Vol. 28, № 3. P. 287–302. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2007.06.002.
- 18. Simulations of events for the LUX-ZEPLIN (LZ) dark matter experiment / D. S. Akerib, C. W. Akerlof, A. Alqahtani [et al.] // Astroparticle Physics.
 2021. Vol. 125. P. 102480. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2020.102480.
- 19. Electron transport and electric field simulations in two-phase detectors with THGEM electrodes / A. Bondar, A. Buzulutskov, E. Frolov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Vol. 943. — P. 162431. — DOI: 10.1016/j.nima.2019.162431.

- 20. Garfield++ : [сайт]. URL: https://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/ (дата обращения: 19.09.2023).
- Measurement of longitudinal electron diffusion in liquid argon / Y. Li, T. Tsang, C. Thorn [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. Vol. 816. P. 160–170. DOI: 10.1016/j.nima.2016.01.094.
- 22. Notes on Electron Transportation: [сайт]. URL: https://lar.bnl.gov/properties/trans.html (дата обращения: 29.08.2023).
- 23. Thorpe, T. N. The DarkSide-20k TPC and underground argon cryogenic system / T. N. Thorpe // SciPost Physics Proceedings. 2023. P. 069. DOI: 10.21468/SciPostPhysProc.12.069.
- 24. Electroluminescence pulse shape and electron diffusion in liquid argon measured in a dual-phase TPC / P. Agnes, I. F. M. Albuquerque, T. Alexander [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. Vol. 904. P. 23–34. DOI: 10.1016/j.nima.2018.06.077.