

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.123  
Рег. № 122041100249-4  
Рег. №



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯИ РАН,  
чл.-корр. РАН

М.В. Либанов

«28» декабря 2024 г.

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

122041100249-4

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ,  
ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, КОСМОЛОГИЯ

(итоговый за 2024 год)

ФЦП

Руководитель НИР,  
Директор ИЯИ РАН,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

М.В. Либанов  
«28» декабря 2024 г.

Москва 2024 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, директор  
ИЯИ РАН, член-корр. РАН, д-р  
физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_

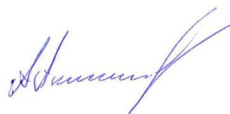


М. В. Либанов  
(введение, заключение)

Исполнители:

Зам. директора ИЯИ РАН, канд.  
физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_



А. Г. Панин  
(реферат, введение, заключение)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



Д. В. Кирпичников  
(разделы 1, 2, 4, заключение)

Гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



Н. В. Красников  
(разделы 2, 4)

Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



С. Н. Гниненко  
(разделы 4)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



Ю. М. Андреев  
(разделы 4)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



А. В. Копылов  
(разделы 4)

Гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

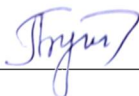
\_\_\_\_\_



Ю. М. Куденко  
(разделы 6, 7)

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



А. В. Буткевич  
(разделы 8)

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



В. С. Пантуев  
(разделы 9)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



В. В. Казалов  
(разделы 10, 11)

Гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



Л. Б. Безруков  
(разделы 12, 13)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



Н. Ю. Агафонова  
(разделы 14, 15)


Ст. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

\_\_\_\_\_



Ю. Н. Ерошенко  
(разделы 16)

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат.  
наук

  
\_\_\_\_\_

Б. К. Лубсандоржиев  
(разделы 17)

Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

  
\_\_\_\_\_

Н. А. Титов  
(разделы 18)

Нормконтроль

  
\_\_\_\_\_

О. Н. Либанова  
(введение, заключение)

## РЕФЕРАТ

Отчет содержит 164 стр., 61 рис., 5 табл., 181 источн., 1 прил.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИЯ, АСТРОФИЗИКА, РАСШИРЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, ГРАВИТАЦИЯ, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ, РАННЯЯ ВСЕЛЕННАЯ, НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ.

Объектом исследования являются Стандартная Модель физики элементарных частиц, расширения Стандартной Модели, в том числе содержащие стерильные нейтрино, в рамках которых можно интерпретировать экспериментальные данные об осцилляциях нейтрино, модели темной материи, модифицированные теории гравитации, модели физики ранней Вселенной, механизмы генерации барионной асимметрии, образования структур, процессы, происходившие на инфляционной стадии, математический аппарат для описания таких моделей.

Цель работы – уточнение параметров частиц Стандартной Модели, построение новых теорий и моделей физики высоких энергий, способных решить широкий круг проблем современной физики, возникающих на стыке сразу нескольких направлений, таких как физика элементарных частиц, астрофизика и космология, а также проверка таких теорий и моделей в экспериментах NA64, NA62, DUNE, CHARM, OKA, NOvA, T2K, JUNO, Xe-124, GERDA, Троицк-ню-масс и др.. Основным инструментом, используемым для исследования процессов и явлений в физике элементарных частиц, является экспериментальное изучение и проверка теорий и моделей в ускорительных, лабораторных и наблюдательных экспериментах. В работе особое место уделено разработке и созданию детекторов для современных экспериментов, а также обработке экспериментальных данных. Для вычисления количественных характеристик экспериментально наблюдаемых величин, таких как время жизни частиц, сечение рассеяния и т.д., использован аппарат квантовой теории поля, квазиклассическое приближение, методы теории симметрий и суперсимметрий. Для решения задач, не поддающихся аналитическому исследованию, были использованы пакеты программ, такие как LatticeEasy, CompHEP, microOMEGAs, HYDJET++, CASCADE, PYTHIA, NMSSMTools и другие.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню. Результаты могут быть использованы для выработки предсказаний, а так же обработки экспериментальных данных ускорительных экспериментов и астрофизических экспериментов, таких как эксперименты на LHC, Tevatron, ILC, а так же Planck, Fermi, Telescope Array и др.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ .....	2
РЕФЕРАТ .....	4
СОДЕРЖАНИЕ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц. Разработка необходимого математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля и теорий за рамками стандартной модели .....	32
1.1 Численное моделирование эволюции системы доменных стенок в расширяющейся Вселенной и оценка спектра образуемых ими гравитационных волн .....	32
1.2 Перспективы экспериментального исследования физики элементарных частиц на проектируемой Супер-Чарм-Тау-Фабрике .....	35
1.3 Долгоживущие сголдстино в нейтринных телескопах .....	36
1.4 Рождение тёмных фотонов в процессе упругого тормозного излучения протона с ненулевым переданным импульсом .....	37
1.5 Перспективы проекта NICA по поиску новой физики: модель с темным фотоном и аксионоподобной частицей .....	38
1.6 Поиски астрофизических проявлений аксионов и аксионоподобных частиц .....	39
1.7 Резонансная генерация электромагнитных мод в нелинейной электродинамике: квантовый подход .....	41
1.8 Ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности кубического типа в квантовой электродинамике из формирования фотонных атмосферных ливней .....	41
2 Построение новых теорий и моделей, предсказывающих существование частиц – кандидатов на роль темной материи Вселенной. Разработка математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля .....	42
2.1 Галактическая темная материя, состоящая из стерильных нейтрино, с массами несколько кэВ по данным NuSTAR после 11 лет работы .....	42
2.2 Поиск скалярных медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью .....	42
2.3 Теоретическое и феноменологическое исследование партонных распределений и глубоконеупругих структурных функций в протонах, нейтронах и ядрах .....	44
2.4 Теоретическая поддержка нейтринного эксперимента DUNE .....	45
2.5 Рост аксионных звезд .....	45

2.6	Применение метода эффективного потенциала для стационарных задач в квантовой теории поля	46
2.7	Фантомное скалярное поле в ОТО, приводящее к существованию кротовой норы с взаимодействующими устьями	47
2.8	Конформно инвариантная гравитация и гравитирующие миражи	48
3	Изучение космологических решений в теории Хорндески	50
4	Проверка новых моделей с лёгкими гипотетическими частицами на установке NA64	52
4.1	Общий статус эксперимента NA64	52
4.2	Проведение сеансов набора данных на установке NA64	52
4.2.1	Установка NA64e и результаты сеанса на канале H4	53
4.2.2	Установка NA64μ и набор данных в сеансе на канале M2	57
4.3	Поиск скрытого сектора материи в эксперименте NA64	58
5	Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика	62
5.1	Описание методики	62
5.2	Результаты измерений	67
5.3	Поиск суточных вариаций скорости счета	69
6	Определение параметров осцилляций и иерархии масс нейтрино в эксперименте T2K	74
6.1	Работы по обновлению установки международного нейтринного эксперимента T2K и набору данных в 2024 году	74
6.2	Анализ данных и получение осцилляционных параметров нейтрино в эксперименте T2K в 2024 году	76
7	Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино)	79
7.1	Эксперимент NA62	79
7.2	Эксперимент ОКА (Протвино)	80
8	Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOνA с пучком мюонных (анти)нейтрино	82
8.1	Байесовский подход для измерения параметров нейтринных осцилляций	82
8.2	Поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, нарушающих CP-инвариантность	83
8.3	Приведенные сечения квази-упругого рассеяния электронов и нейтрино на ядрах	84
9	Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс	86
9.1	Экспериментальная установка	86

9.2	Первичная обработка экспериментальных данных .....	88
9.3	Учёт рассеяния на задней стенке тритиевого источника .....	89
9.4	Работы над усовершенствованием и модернизацией криогенной системы.	90
9.5	Развитие программного обеспечения .....	91
10	Поиск 2К-захвата в $^{124}\text{Xe}$ .....	93
11	Поиск безнейтринного двойного бета распада $^{100}\text{Mo}$ в составе международной коллаборации AMoRE .....	96
12	Поиск двойного безнейтринного бета распада $^{76}\text{Ge}$ в составе международной коллаборации GERDA и LEGEND .....	100
13	Увеличение точности измерения угла смешивания $\theta_{13}$ осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz	102
13.1	Измерения угла смешивания нейтрино $\theta_{13}$ .....	102
13.2	Измерение спектра антинейтрино ядерного реактора .....	103
13.3	Расчет спектров антинейтрино от изотопов урана и плутония .....	104
14	Анализ данных детектора LVD, накопленных за 20 лет работы, по исследова- нию мюонной компоненты космических лучей и естественной радиоактивности, являющихся основными источниками фона в экспериментах по поиску редких событий, проводимых в подземной лаборатории Гран Сассо (LNGS) .....	106
14.1	Частотно-временной анализ измерений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS .....	106
14.2	Источники фоновых событий в детекторе LVD .....	109
14.3	Изучение пампинг эффекта под землей .....	111
15	Анализ экспериментальных данных первого этапа эксперимента NEWSdm с использованием результатов расчетов для корректного выделения событий взаимодействия темной материи и фоновых событий .....	114
15.1	Эксперимент NEWSdm .....	114
15.2	Считывание и обработка эмульсии .....	116
16	Изучение физических условий в газе в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности, создаваемых гало темной материи и первичны- ми черными дырами, и расчет поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см нейтрального водорода .....	118
17	Эксперимент JUNO .....	122
18	Поиск стерильных нейтрино в области масс 0,1-10 кэВ в бета-распаде трития	124
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	128
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	143
	<b>Приложение А Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.</b> .....	159

## ВВЕДЕНИЕ

**1 Задача "Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц. Разработка необходимого математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля и теорий за рамками стандартной модели"**

**1.1 Численное моделирование эволюции системы доменных стенок в расширяющейся Вселенной и оценка спектра образуемых ими гравитационных волн**

Регистрация гравитационно-волновых сигналов от слияния двойных систем (в подавляющем числе – чёрных дыр) гравитационными интерферометрами LIGO и Virgo и возможное обнаружение сигнала от стохастического фона гравитационных волн в экспериментах по мониторингу времени прихода сигналов от миллисекундных пульсаров вызвали широкую волну интереса к возможным источникам гравитационных волн, в том числе реликтового характера. Данные по наблюдениям пульсаров неплохо описываются аналитическими оценками сигналов от систем космических доменных стенок, появление которых в ранней Вселенной, а затем распад, предсказывается в ряде обобщений СМ. Нами была выполнена задача о численном моделировании такой системы доменных стенок и изучен вопрос об образовании ими гравитационных волн.

**1.2 Перспективы экспериментального исследования физики элементарных частиц на проектируемой Супер-Чарм-Тау-Фабрике**

Экспериментальные методы изучения физики элементарных частиц во многом основываются на исследовании процессов рассеяния стабильных электрически заряженных частиц. Как правило, используются протоны, электроны и их античастицы. Преимущество коллайдеров по сравнению с рассеянием пучков на мишени в существенном повышении энергии в системе центра масс сталкивающихся частиц, а значит, возможность рождать более тяжёлые элементарные и составные частицы. Последние годы широко обсуждается создание нового поколения электрон-позитронных коллайдеров с энергиями пучков 2-5 ГэВ, в частности, развивается проект построения супер-чарм-тау фабрики в рамках Национального Центра Физики и Математики в Нижегородской области или в Институте ядерной физики СО РАН в Новосибирске. Выполненная работа – обзор технической составляющей проекта и физических задач, которые можно будет выполнить в случае его успешной реализации.

**1.3 Долгоживущие сголдстино в нейтринных телескопах**

В настоящее время в связи с отсутствием прямых экспериментальных подтверждений существования физики за пределами Стандартной модели на масштабе масс порядка и несколько выше электрослабого масштаба, значительные усилия на-



учного сообщества сконцентрированы на поисках новой физики в ГэВ-ной области. Комбинация прямых (ускорительных) и косвенных (астрофизических и космологических) наблюдений позволит в ближайшем будущем исключить (или обнаружить?!) модели с новыми легкими частицами, достаточно слабо взаимодействующими с частицами Стандартной модели. В значительном количестве таких сценариев такие новые частицы являются долгоживущими. Одним из главных механизмов образования таких частиц в коллайдерных экспериментах являются распады адронов. С другой стороны, “природным коллайдером”, в котором образуется значительное количество адронов, являются космические лучи, непрерывно бомбардирующие атмосферу. Образующиеся в результате распространения широких атмосферных ливней адроны в рамках моделей новой физики могут распадаться в новые легкие долгоживущие частицы, которые в свою очередь могут дать сигнал в детекторах существующих и планируемых экспериментов (см., например, [1, 2, 3, 4]). В работе изучались перспективы поиска легких долгоживущих скалярных и псевдоскалярных частиц, предсказываемых в ряде суперсимметричных моделей, в рамках описанного сценария в нейтринных экспериментах на SuperKamiokande и HyperKamiokande.

#### **1.4 Рождение тёмных фотонов в процессе упругого тормозного излучения протона с ненулевым переданным импульсом**

Формализм порталов на сегодняшний день является одним из наиболее часто используемых способов расширения Стандартной модели (СМ), в котором взаимодействия полей СМ с полями тёмного сектора реализуются с помощью новых гипотетических частиц-медиаторов [5]. В нашей работе были изучены свойства медиатора векторного портала, тёмного фотона, массой 0,4-1,8 ГэВ.

Основным каналом рождения тёмных фотонов массой порядка 1 ГэВ является тормозное излучение. В литературе существует несколько способов оценки величины сечения рождения тёмного фотона в процессе упругого тормозного излучения протона [6, 7], не согласующиеся между собой. Кроме того, в ближайшие годы планируются поиски видимых распадов тёмных фотонов в указанном интервале масс в нейтринных экспериментах T2K [8], DUNE [9] и эксперименте с фиксированной мишенью SHiP [10]. Всё это говорит об актуальности изучения величины сечения упругого тормозного излучения протона.

Целью работы является уточнение величины сечения рождения тёмных фотонов в процессе упругого тормозного излучения протона. Для этого в вычислении был явно учтён обмен ненулевым импульсом между протонами. Полученные результаты сравнивались с ответами, ранее полученными в литературе [6, 7, 11]. Кроме того, была полученная предварительная оценка чувствительности эксперимента SHiP к

видимым распадам тёмных фотонов, учитывающая только вклад упругого тормозного излучения.

### **1.5 Перспективы проекта NICA по поиску новой физики: модель с темным фотоном и аксионоподобной частицей**

Nuclotron based Ion Collider fAcility (NICA) — новый ускорительный комплекс, возводимый в ОИЯИ, Дубна. На NICA планируется работа с протонами, ядрами золота, цинка и других ионов с энергиями 4–11 ГэВ на нуклон. На NICA планируется установка двух детекторов: Multi-Purpose Detector (MPD) [12] и Spin Physics Detector (SPD) [13]. Основной целью экспериментов является исследование адронной материи и кварк-глюонной плазмы, однако возможности детекторов также позволяют проводить исследования в области фундаментальной новой физики (НФ), Кинематика столкновений предполагает, что наиболее перспективная область масс для НФ на NICA составляет менее 1 ГэВ. Столкновения тяжёлых заряженных ионов открывают возможности для исследования моделей, в которых гипотетические частицы взаимодействуют с фотонами Стандартной модели (СМ). В данной главе рассматриваются перспективы NICA MPD в поисках гипотетических частиц в моделях с гипотетическими (псевдо)скалярными частицами (ALP) [14] и тёмными фотонами [15].

### **1.6 Поиски астрофизических проявлений аксионов и аксионоподобных частиц**

Аксион – гипотетический псевдоскалярный псевдоголдстоуновский бозон, связанный с нарушением глобальной симметрии Печчеи-Куинн, естественным образом объясняющий сохранение комбинации пространственной и зарядовой четности в сильных взаимодействиях. Подобные бозоны возникают во многих расширениях Стандартной модели физики частиц, требующих наличия спонтанно нарушенной глобальной симметрии; они называются аксионоподобными частицами. Такие частицы характеризуются в первую очередь двумя параметрами – массой и константой взаимодействия с фотонами. Для классического аксиона, связанного с CP-проблемой квантовой хромодинамики, эти два параметра связаны модельно-зависимым, но по порядку величины универсальным, соотношением. В астрофизических данных такие частицы могут проявляться по-разному. Во-первых, они могут являться частицами холодной темной материи, и наблюдательные следствия этого механизма достаточно специфические и потому проверяемые. Во-вторых, наличие взаимодействия с фотонами приводит к аксион-фотонному смешиванию во внешнем магнитном поле, которое может влиять на результаты наблюдательной астрономии. В-третьих, рождающиеся в недрах звезд легкие слабо взаимодействующие частицы влияют на эволюцию звезд, эффективно унося энергию из их центральных областей наравне с нейтрино. В настоящее время разнообразные астрофизические данные начинают указывать

на возможное существование таких частиц, хотя и с большими систематическими неопределенностями. На фоне прогрессирующего сужения экспериментально разрешенной области параметров других частиц – кандидатов на роль темной материи это привело к бурному росту интереса как теоретиков, так и экспериментаторов во всем мире к аксионной тематике.

### **1.7 Резонансная генерация электромагнитных мод в нелинейной электродинамике: квантовый подход**

Нелинейное взаимодействие электромагнитного поля в вакууме, вызванное взаимодействием с виртуальными электронами, является одним из явлений, теоретически предсказанных на заре квантовой электродинамики (КЭД), но до сих пор не обнаруженных экспериментально из-за слабости нелинейного взаимодействия. Одним из подходов к проверке генерации гармоник высокого порядка является изучение этого эффекта для стоячих электромагнитных мод в высокочастотных микроволновых резонаторах, в которых сигнальная мода может быть дополнительно усилена из-за резонансного характера взаимодействия.

Предполагая определенный набор двух мод накачки с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в резонаторе определенного резонансного соотношения сторон, получаем резонансное усиление для моды с частотой  $2\omega_1 - \omega_2$  [16, 17]. На основе этого эффекта было предложено экспериментальное предложение, направленное на поиск нелинейной электродинамики [18], которое находится в стадии разработки в Центре сверхпроводящих квантовых материалов и систем (SQMS) в Национальной ускорительной лаборатории Ферми.

Еще одним интересным вопросом является изучение этого нелинейного процесса для произвольного набора мод полости, что можно сделать аналитически для прямоугольной формы полости. Так, при изучении нелинейных эффектов для одной моды накачки в одномерной полости в рамках эффективной теории поля оказывается, что резонансной генерации третьих гармоник нет [19]. Обобщение метода на случай двух мод накачки (частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) и трехмерной прямоугольной полости дано в [20]. Оказывается, что третья гармоника, а также мода сигнала «плюс» не резонансно усиливаются в полости, единственным резонансным случаем является мода сигнала «минус» с частотой  $2\omega_1 - \omega_2$ . Тем не менее, физическая природа этого эффекта осталась непроясненной, поэтому необходим также анализ с точки зрения чистой квантовой теории.

## 1.8 Ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности кубического типа в квантовой электродинамике из формирования фотонных атмосферных ливней

Лоренц-инвариантность (ЛИ) лежит в основе квантовой теории поля (КТП). Однако возможные отклонения от ЛИ могут проявляться в различных моделях квантовой гравитации (например, гравитация Хоравы-Лившица [21]). Однако, несмотря на естественные механизмы нарушения ЛИ с последующим примыканием к физике высоких энергий с выполнением ЛИ, можно изучать потенциальное отклонение от Стандартной модели с помощью операторов более высоких размерностей. Такой теоретический подход, по сути являющийся эффективной теорией поля, может быть протестирован с помощью высокоточных лабораторных экспериментов и астрофизических наблюдений. В работе изучается первое нетривиальное кубическое по импульсу добавочное слагаемое в дисперсионном соотношении для фотона в КЭД, являющимся следствием эффективной КТП Майерса-Поспелова для бозонов со спином 1:

$$\omega^2 = k^2 \pm \frac{k^3}{E_{\text{LIV}}}. \quad (0.1)$$

Как уже было сказано, такая теория может быть проверена (точнее, постановка ограничений на параметр  $E_{\text{LIV}}$ ) с помощью астрофизических экспериментов. Ограничения, полученные с помощью физики космических лучей являются наиболее сильными на сегодняшний момент для плеяды эффективных теорий поля [22].

## 2 Задача "Построение новых теорий и моделей, предсказывающих существование частиц – кандидатов на роль темной материи Вселенной. Разработка математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля"

### 2.1 Галактическая темная материя, состоящая из стерильных нейтрино, с массами несколько кэВ по данным NuSTAR после 11 лет работы

Растущий объем астрофизических и космологических данных указывает на необходимость наличия дополнительных источников гравитационных потенциалов в галактиках и скоплениях галактик в современной и ранней Вселенной помимо барионного вещества. На сегодняшний момент не барионная компонента материи (темная материя) не имеет удовлетворительного объяснения в рамках Стандартной модели физики элементарных частиц (СМ) и Общей теории относительности (ОТО). В то же самое время существует множество кандидатов на роль частиц темной материи, которые могут быть рассмотрены в рамках СМ и ОТО для объяснения имеющихся феноменов.

Данная задача посвящена рассмотрению стерильных нейтрино с массами в масштабе нескольких кэВ как кандидатов на роль частиц темной материи, которые могут рождаться в ранней Вселенной и распадаться вследствие смешивания с активными нейтрино на активное нейтрино и фотон (энергия фотона при таком распаде составляет половину от массы стерильного нейтрино и находят в диапазоне масс в несколько кэВ).

А именно, мы рассматриваем ожидаемый сигнал от таких распадов и ограничения на параметры стерильных нейтрино, которые можно получить при наблюдении Млечного пути по данным рентгеновского телескопа NuSTAR.

## **2.2 Поиск скалярных медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью**

В первой части нашей работы мы обсуждаем кривые реликтовой плотности темной материи, состоящей из майорановских, дираковских, скалярных и векторных частиц темной, которые связаны с механизмом замораживания через аннигиляцию в пару  $e^+e^-$  посредством электронн-специфического медиатора спина 0 темной материи. Мы также обсуждаем механизм рождения рассматриваемого медиатора в экспериментах с фиксированной мишенью на электронном (позитронном) пучке, таких как NA64 и LDMX. Мы выводим соответствующие экспериментальные чувствительности NA64e и LDMX.

Во второй части работы по данной задаче был изучен потенциал эксперимента NA64 в CERN SPS для поиска процессов Новой физики, включающих редкие процессы после столкновения электронов с энергией 100 ГэВ с ядрами-мишенями. Новый лептонный портал Темного сектора, в котором скалярный бозон может быть рожден в реакции, подобной тормозному излучению с изменением аромата лептона, используется в качестве сигнального процесса. В этой работе было разработано реалистичное Монте-Карло моделирование экспериментальной установки NA64. Были исследованы основные фоновые процессы и рассчитана ожидаемая чувствительность эксперимента. Результаты показывают, что при незначительной оптимизации установки, эксперимент NA64 может исследовать большую часть доступного пространства параметров, совместимого с  $(g - 2)$  аномалией мюонов и предсказаниями реликтовой плотности темной материи в контексте нового лептонного портала темного сектора для статистики в  $10^{11}$  электронов, накопленных на мишени. Этот результат открывает путь к исследованию процессов, связанных с нарушением аромата заряженных лептонов в NA64.

### 2.3 Теоретическое и феноменологическое исследование партонных распределений и глубоконеупругих структурных функций в протонах, нейтронах и ядрах

Надежное определение партонных распределений (ПР) в протоне, нейтроне и ядрах с возрастающей точностью является одной из центральных проблем в современной физике высоких энергий, т.к. ПР определяют ведущие вклады в сечения различных процессов при высоких энергиях. ПР не являются непосредственными наблюдаемыми и общепринятый метод их определения — глобальный КХД-анализ экспериментальных данных при высоких значениях переданного импульса. Нужно отметить, что определение разных ПР (распределения кварков, антикварков, глюонов) в различных кинематических областях бьеркеновской переменной  $x$  имеют разную чувствительность к имеющимся экспериментальным данным. Распределения кварков при больших значениях  $x$  определяются из данных по глубоконеупругому рассеянию лептонов (ГНР) на различных мишенях, а также в процессе Дрелла-Яна (ДЯ) — рождению лептон-антилептонной пары в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях. ДЯ-процесс также позволяет измерить распределения  $u$ - и  $d$ -антикварков. Комбинирование данных на ядрах с различным протон-нейтронным составом позволяет существенно улучшить точность определения  $d/u$  отношения кварковых распределений.

Интерпретация и практическое использование данных на ядрах требует количественного понимания и описания механизмов влияния ядерной среды на свойства нуклонов на кварк-глюонном уровне. В данной работе мы следуем подходу разработанному сотрудником ИЯИ РАН, в котором учитывается ряд эффектов включая поправки от импульсного распределения связанных нуклонов и энергий связи, немассовых поправок, мезонных обменных токов, эффекты взаимодействия с ядерным окружением кварк-глюонной компоненты промежуточных векторных бозонов (фотонов,  $W/Z$ -бозонов). Разработанная модель хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные по ядерному ГНР и ДЯ-процессам и успешно предсказывает результаты ЛНС по рождению  $W^{+-}$  бозонов в столкновениях протонов с ядрами  $^{208}\text{Pb}$ , а также описывает нейтринные сечения на ядрах при высоких энергиях. В этом подходе модификация партонных распределений в связанных нуклонах является следствием аналитического продолжения нуклонных ПР во немассовую область. Соответствующие функции были определены из анализа ГНР сечений на ядрах. Целью настоящей работы является совместное определение протонных и нейтронных ПР из глобального КХД-анализа с включением экспериментальных ГНР данных на ядрах дейтерия, трития и гелия-3.

## 2.4 Теоретическая поддержка нейтринного эксперимента DUNE

Нейтринный эксперимент с длинной базой DUNE направлен на экспериментальное исследование ряда фундаментальных задач современной физики частиц и астрофизики, в частности, проблемы барионной асимметрии ранней вселенной, динамики нейтринных вспышек в сверхновых звездах и нуклеосинтеза, природы темной материи, проблемы распада протона. Эти и другие проблемы планируется исследовать в эксперименте DUNE с использованием ведущей в мире технологии детекторов жидкого аргона (LAr). Международный эксперимент DUNE, проводимый в Фермилабе (США), включает в себя комплекс ближнего детектора (ND) и набора из четырех больших детекторных модулей на удалении 1300 км от Фермилаба в подземном исследовательском центре Сэнфорда (SURF) в Южной Дакоте. Эти детекторы будут регистрировать нейтрино в широком диапазоне энергий, исходящие из нового высокоинтенсивного нейтринного пучка в Фермилабе. Модульный дальний детектор (FD) также будет обнаруживать нейтрино от космических лучей в атмосфере и из астрофизических источников. ND и FD также будут чувствительны к широкому диапазону явлений за пределами стандартной модели.

Ближний детектор ND также позволяет проводить измерения сечений взаимодействия (анти)нейтрино с различными ядерными мишенями. В силу того, что взаимодействие нейтрино с веществом происходит посредством заряженных  $W$ -бозонов (заряженный ток), делает (анти)нейтрино уникальным пробником структуры нуклонов и ядер дополняя информацию извлекаемую из экспериментов с электронами и мюонами. Нейтринные детекторы обычно включают в себя массивную мишень из вещества с высокой плотностью (железо, свинец), чтобы увеличить статистику нейтринных событий. Возможная точность нейтринных экспериментов, тем не менее, ограничивается обычно более низкой статистикой, чем в экспериментах с рассеянием электронов, и трудностями интерпретации нейтринных данных из-за использования мишеней из сложных ядер (систематические неопределенности). Целью настоящей работы является разработка подхода для улучшения точности существующих расчетов нейтринных процессов на ядрах и тем самым уменьшения систематических неопределенностей в интерпретации данных нейтринных экспериментов.

## 2.5 Рост аксионных звезд

В последнее время особенную популярность в литературе приобрели космологические модели со сверхлегкой (аксионоподобной) темной материей. Обоснованным кандидатом на роль такой темной частицы служит аксион КХД, который вдобавок решает сильную CP-проблему. Но спектр кандидатов на легкую темную частицу гораздо шире. К примеру, появление легких бозонов (струнных аксионов) предсказывается во многих моделях теории струн.

Особенность сверхлегкой темной материи — образование мелких космологических структур. Так, в модели с темными аксионами КХД, где симметрия Печчеи-Квин нарушена после инфляции, порядка 50%-70% аксионов оказываются гравитационно связанными внутри аксионных миникластеров с астероидными массами и размерами порядка астрономической единицы. Вычисления показывают, что со временем в центре миникластеров может образоваться бозе-конденсат аксионов, причем, это может произойти за счет универсального гравитационного взаимодействия этих частиц [23]. Данное явление крайне необычно, так как эффекты гравитационного рассеяния частиц обычно пренебрежимо малы. В случае темных аксионов они релевантны, во-первых, из-за малости других констант связи, а во-вторых, из-за больших чисел заполнения и малых скоростей аксионов, которые усиливают гравитационные сечения.

Под действием самогравитации бозе-конденсат аксионов свертывается в компактные шары — Бозе-звезды. Важный вопрос аксионной космологии — могут ли эти звезды вырасти до макроскопических (астероидных) масс за счет продолжающейся конденсации аксионов.

## **2.5 Применение метода эффективного потенциала для стационарных задач в квантовой теории поля**

Классические уравнения движения можно существенно упростить, если интегрировать тяжелые степени свободы. Этот подход в квантовой теории поля получил название «метод эффективного потенциала». На первом этапе поправки были изучены в древесном приближении, а затем был изучен механизм Коулмена-Вайнберга для модели Фридберга-Ли-Сирлина. Полученные результаты были проверены прямым численным расчетом, а также с использованием теории возмущений в двумерном случае.

## **2.7 Фантомное скалярное поле в ОТО, приводящее к существованию кротовой норы с взаимодействующими устьями**

Построены начальные данные в общей теории относительности плюс фантомное скалярное поле, которые описывают два взаимодействующих устья кротовой норы. Полученные начальные данные являются аналогом симметричных по времени начальных данных Мизнера для случая двойной черной дыры. Описана процедура расширения таких начальных данных на случай, когда в теорию добавляется электромагнитное поле.

## **2.8 Конформно инвариантная гравитация и гравитирующие миражи**

Наша Вселенная не существует извечно. Это подтверждается решением парадокса Ольберса («Почему ночью небо темное?»). Поэтому возникает простой вопрос



– откуда взялась вся материя? Рождение частиц вещества – сугубо квантовый процесс. Полное его решение упирается в квантовую теорию гравитации, которая так еще не создана, несмотря на уже столетние героические усилия. Поэтому приходится соединять каким-то образом классическую теорию гравитацию (классическую метрику пространства-времени) и квантовый процесс рождения частиц. Начало этих исследований приходится на семидесятые годы прошлого столетия. Однако, они ограничились, по сути, созданием квантовой теории поля на фоне искривленного пространства-времени без учета обратного влияния на метрику не только тензора энергии-импульса уже рожденных частиц, но и самого этого процесса. Частично этот вопрос был решен введением в гравитационный лагранжиан слагаемых, квадратичных по скаляру кривизны – модель Старобинского.

### **3 Задача "Изучение космологических решений в теории Хорндески"**

В работе был исследован новый подход к перенормировкам в КТП, основанный на дифференциальных уравнениях типа Каллана-Симанчика. Было произведено обобщение этого подхода на класс неперенормируемых теорий с операторами размерности шесть. Данный метод был использован для вычисления двух-, четырех- и шести- точечных вершинных функций, соответствующих аномальных размерностей и бета-функций, а также и поправки к эффективному потенциалу в однопетлевом приближении для конкретной выбранной неперенормируемой теории. В данном подходе к перенормировкам не возникают расходимости ни на одном из этапов вычислений. В работе по данной задаче также была вычислена негауссовость для первичных скалярных возмущений, или, более точно – нелинейный параметр  $f_{NL}$  негауссовости, и найдены новые условия на параметры модели из соответствующих наблюдательных данных Planck и WMAP. Из результатов данного исследования можно сказать, что либо модель находится на грани закрытия, либо же можно провести более аккуратный анализ формы биспектра, уточнив таким образом ограничения на параметры модели, и сделать таким образом уже конечный вывод о жизнеспособности выбранной модели ранней Вселенной.

Кроме того, в работе была доказана запрещающая теорема для несингулярных космологических решений без сверхсветовых скоростей в квадратичной теории Хорндески с кручением. Построено всюду устойчивое отскоковое решение, но со сверхсветовыми гравитонами на некоторой стадии. В кубической теории Хорндески с кручением построено устойчивое и досветовое решение в виде космологического отскока. Таким образом, показано, что в кубическом подклассе нет запрещающей теоремы.

Стоит отметить, что так же были построены возмущения в теории Хорндески над космологическим анизотропным фоном. Показано, что в простейших решениях без динамических скалярных возмущений при добавлении анизотропии появляется

ся дух. В работе был исследован способ разрешения связей в скалярном секторе с помощью уравнений движения в ковариантном виде. Показано, что в сферически симметричном случае он работает только в линейном подклассе теории Хорндески.

В работе была изучена компактификация пятимерной теории Хорндески на окружность, показано, что результат является примером калибровочной теории с векторным галилеоном, а скорости фотона и гравитона совпадают в широком классе лагранжианов. Также продолжено исследование компактификации теории Хорндески, построен скалярный сектор теории и исследованы старшие лагранжианы теории, возникающие только в пятимерии.

#### **4 Задача "Проверка новых моделей с лёгкими гипотетическими частицами на установке NA64"**

##### **4.1 Общий статус эксперимента NA64**

В данном подразделе описываются общие сведения эксперимента NA64.

##### **4.2 Проведение сеансов набора данных на установке NA64**

Для эксперимента NA64 руководством ЦЕРН в 2021 году было выделено две площадки в Северной зоне (NA) ускорителя SPS - для проведения измерений соответственно на электронном (канал H4, установка NA64e) и мюонном (канал M2, установка NA64 $\mu$ ) пучках SPS. На этих площадках на постоянной основе были размещены все детекторы эксперимента NA64. Тесты модернизированных установок NA64e и NA64 $\mu$  в целом были проведены в 2022 году, и затем были начаты первые эксперименты по поиску новых частиц, включая частицы темной материи и медиаторы взаимодействий скрытого сектора как для видимой, так и для невидимой моды их распадов, а также других процессов, в которых могла бы проявиться физика вне Стандартной модели на новом уровне чувствительности.

В 2024 году участники эксперимента NA64 в рамках общей исследовательской программы эксперимента успешно провели восьминедельный сеанс в апреле-июне на электронном пучке H4 ускорителя SPS на установке NA64e и затем семинедельный сеанс в июле-сентябре на мюонном канале M2 ускорителя SPS на установке NA64 $\mu$ .

В ходе сеанса на электронном пучке были выполнены следующие работы: сборка и запуск модифицированной установки NA64e на площадке канала H4; запуск и сертификация электронного пучка с уменьшенным количеством вещества в канале и сравнение его измеренных характеристик с расчетными; изучение и настройка уровня триггера полезных событий; тестирование электроники калориметров и нового детектора синхротронного излучения SRD. Проведена настройка и калибровка детекторов, выполнен набор данных. В результате сеанса на канале H4 ускорителя SPS на установке NA64e в течение мая – июня 2024 г. было набрано около  $5,2 \times 10^{11}$  электронов на мишени. Предварительные результаты анализа данных свидетельствуют

об их хорошем качестве и отсутствии фона, связанного с электророждением адронов в канале.

В ходе сеанса на мюонном пучке на установке NA64 $\mu$  были проведены следующие работы: установка и запуск детекторов на мюонном пучке; увеличение числа трековых камер в спектрометре MS1 и модернизация спектрометра MS2; запуск и сертификация мюонного пучка M2, сравнение его измеренных характеристик с расчетными; изучение уровня триггера полезных событий; оценка уровня герметичности детектора и его чувствительности к сигналу. После наладки и калибровки был проведен набор данных с рабочими триггерами, зарегистрировано около  $1,1 \times 10^{12}$  мюонов на мишени.

### 4.3 Поиск скрытого сектора материи в эксперименте NA64

В эксперименте NA64 $\mu$  был выполнен первый поиск скрытого сектора материи с использованием высокоэнергетического мюонного пучка и метода определения недостающей энергии-импульса. Мюоны из пучка M2 протонного суперсинхротрона ЦЕРН с импульсом 160 ГэВ/с направлялись на активную мишень. Характеристика сигнального события состоит из одиночного рассеянного мюона с импульсом меньше 80 ГэВ/с в конечном состоянии, сопровождающегося отсутствием выделенной энергии в детекторе. Для полного набора данных, соответствующего  $(1,98 \pm 0,02) \times 10^{10}$  мюонов на мишени, в области ожидаемого сигнала не наблюдается событий. Это позволило установить новые ограничения на оставшееся пространство параметров  $(m_{Z'}, g_{Z'})$  – массы и константы связи нового векторного бозона  $Z'(L_\mu - L_\tau)$  с мюоном, которые могли бы объяснить  $(g - 2)_\mu$ -аномалию магнитного момента мюона. Кроме того, исключена часть области параметров модели, объясняющей наблюдаемую плотность реликтовой темной материи.

В эксперименте NA64h на ускорителе SPS в ЦЕРН получены первые результаты проверки концепции поиска скрытого сектора частиц с помощью невидимых распадов псевдоскалярных  $\eta$  и  $\eta'$ -мезонов. Применяемый метод, предложенный сотрудниками ИЯИ РАН, использует зарядово-обменную реакцию при рассеянии пионов с энергией 50 ГэВ на ядрах активной мишени в качестве источника нейтральных мезонов. События реакции  $\eta, \eta' \rightarrow \text{invisible}$  могли бы проявляться в виде нетривиальной характеристики — полного исчезновения энергии входящего пучка в детекторе за счет ее уноса новыми частицами. Однако при анализе  $2,9 \times 10^9$  пионов на мишени никаких свидетельств таких событий обнаружено не было, что позволило установить строгое ограничение на относительную долю такого распада для  $\eta'$ -мезона  $Br(\eta' \rightarrow \text{invisible}) < 2,1 \times 10^{-4}$ , улучшив существующую границу примерно в 3 раза. Также установлено ограничение на  $Br(\eta \rightarrow \text{invisible}) < 1,1 \times 10^{-4}$ , сравнимое с существующим.

## **5 Задача "Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика"**

В настоящее время разработаны новые теории и модели, предсказывающих существование частиц – кандидатов на роль темной материи Вселенной. Все планируемые исследования находятся на переднем крае фундаментальной науки и работы в этих направлениях ведутся по всему миру. Каждый год устанавливаются новые верхние пределы для каждого из возможных кандидатов на темную материю. Нами проводится исследование по поиску темных фотонов в качестве холодной темной материи. Актуальность исследования определяется тем, что имеется множество свидетельств неполноты наших знаний о фундаментальных законах микро- и макромира. Так, стандартная модель (СМ) физики частиц неполна, о чем свидетельствуют ненулевая масса нейтрино и существование темной материи. Новизна наших исследований заключается в том, что мы используем мультикатодный счетчик в качестве регистратора возможного эффекта от темных фотонов. В измерениях используется мультикатодный счетчик с железным катодом и позолоченными нитями из сплава вольфрама с рением. В прошлом и текущем годах наше исследование было сфокусировано, как новая постановка задачи, на поиске суточных вариаций скорости счета, которое может наблюдаться вследствие вращения Земли. Для обнаружения эффекта от темных фотонов мы должны наблюдать избыток в скорости счета одиночных электронов в определенном интервале времен в звездной системе координат. В солнечной системе координат такой эффект наблюдаться не должен. В настоящее время обработаны результаты измерений двух серий, каждая серия из четырех раундов измерений длительностью примерно 50 суток. Получены оригинальные результаты. В качестве доказательной базы результаты измерений должны воспроизводиться в последующих измерениях либо в независимом эксперименте. По результатам работ за 2022 и 2024 годы нами были получены два патента на полезную модель и на метод.

## **6 Задача "Определение параметров осцилляций и иерархии масс нейтрино в эксперименте T2K"**

В 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работы в рамках международного нейтринного эксперимента T2K (Tokai-to-Kamioka), основной целью которого является определение параметров осцилляций (углов смешивания, разности квадратов масс и CP-нарушающей фазы) и иерархии масс нейтрино.

Всего с начала 2010 г. по конец 2024 г. в T2K проведено 14 сеансов с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Новые сеансы по набору статистики проходили в ноябре-декабре 2023 г., феврале 2024 г. и мае-июне 2024 г. (№13), а также в ноябре-декабре 2024 г. (№14), причем в мае 2024 г. в ближнем детекторе ND280 был

полностью установлен обновленный нейтринный детектор из SFGD, двух горизонтальных времяпроекционных камер НТРС и шести панелей ТоF.

Был проведен обновленный анализ данных, набранных в ходе предыдущих сеансов (№№1-11), в котором удалось уменьшить систематические ошибки, связанные с дальним детектором. Получены результаты совместного анализа T2K-SK и T2K-NOvA.

### **7 Задача "Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино)"**

В 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работы в рамках международного эксперимента NA62, основной целью которого является измерение вероятности редкого распада положительно заряженного каона  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . В результате был завершен анализ данных, набранных в 2021–2022гг., и было проведено самое точное измерение вероятности распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ .

В 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работы в совместном с НИЦ КИ–ИФВЭ и ОИЯИ каонном эксперименте ОКА на ускорителе У-70 в г. Протвино: принимали участие в сменах по набору данных и в анализе данных прошлых сеансов. Получены и опубликованы новые результаты для различных мод распада положительных каонов.

### **8 Задача "Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучком мюонных (анти)нейтрино"**

Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые могут появиться в пучках мюонных (анти)нейтрино, в результате  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляций. Это дает возможность определить вероятность таких переходов, а следовательно, и угол смешивания  $\theta_{13}$ , фазу нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, иерархию масс нейтринных состояний и проверить 3-х флейворную модель нейтринных осцилляций. Наблюдение нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, которое само по себе является открытием, явилось бы экспериментальным базисом для фундаментальной идеи лептогенезиса, которая объясняет барионную асимметрию Вселенной. Этот эксперимент также определит с высокой точностью и другие параметры осцилляций, что позволит понять различие между смешиванием кварков и лептонов. Помимо этого, программа эксперимента включает измерение сечений взаимодействия мюонных и электронных нейтрино в ближнем детекторе.

Погрешности в сечениях взаимодействия нейтрино являются основными источниками ошибок при определении параметров осцилляций нейтрино. Из-за широкого диапазона энергий в нейтринных пучках очень сложно измерить дифференциальные и полные сечения отдельных каналов взаимодействия нейтрино с ядрами.

Вклады в сечение различных каналов могут перекрываться друг с другом, что затрудняет выявление и диагностику недостатков ядерных моделей. С другой стороны, многие основные физические процессы в ядре одинаковы при рассеянии электронов и нейтрино и, поэтому, данные по рассеянию электронов собранные с хорошо контролируемой кинематикой и большой статистикой позволяют проверить и улучшить описание ядерных эффектов. Их можно использовать для проверки ядерных моделей взаимодействия нейтрино с ядрами.

Описание программы исследований и детекторов можно найти на сайте <https://novaexperiment.fnal.gov>.

### 9 Задача "Исследование кэВных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс"

Основной задачей научно-исследовательской работы было подготовка и проведение лабораторных измерений с целью поиска стерильных нейтрино с массой в диапазоне от 0 до 10 кэВ.

Определение массовой шкалы абсолютных массовых состояний и число нейтрино являются фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизике. Ненулевая масса для левых активных нейтрино косвенно наблюдалась в экспериментах по осцилляции нейтрино, что допускает существование правых стерильных нейтрино. Диапазон возможных значений массы нейтрино для правых нейтрино в настоящее время ничем не ограничен. Предположение о том, что одного очень легкого состояния нейтрино в дополнение к трем активным состояниям кажется спорным в стандартной космологии, но может быть совместимо с современными космологическими данными. В тоже время, стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько кэВ могут являться естественным кандидатом на роль темной материи.

Нейтринные состояния  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ , и стерильные нейтрино  $\nu_s$  не являются собственными массовыми состояниями, и могут быть представлены в виде когерентных сумм таких состояний. В частности, спектр электронов в бета-распаде можно представить, как  $S(E) = \sum U_i^2 \cdot S(E, m_i^2)$ , где  $S(E, m_i^2)$  является спектром с определенной массой собственного состояния нейтрино. Число стерильных состояний нейтрино неизвестно. Если три первых состояния имеют массу близкую к нулю, то можно отдельно выделить вклад тяжелого нейтрино,  $m_{24}$ , и записать как  $S(E) = (1 - U_e^2) \cdot S(E, 0) + U_{e4}^2 \dot{S}(E, m_{24})$ . Существующие лучшие ограничения на  $U_{e4}^2$  в диапазоне масс 0,1 – 2 кэВ были получены нашей группой в Троицке [24, 25].

В представленном эксперименте мы расширяем энергетический диапазон измерения бета спектра. Задача текущего этапа заключается в поиске стерильных нейтрино с массой в диапазоне до 6 кэВ. В 2024 году проведено два сеанса измерений.

## 10 Задача "Поиск 2К-захвата в $^{124}\text{Xe}$ "

В лаборатории низкофоновых исследований, начиная с 2014 года, идет эксперимент по поиску 2К-захвата в  $^{124}\text{Xe}$ . Для поиска данного процесса используется медный (марка меди М1) пропорциональный счетчик высокого давления (МПС), с рабочим объемом 8,77 л. Внутренняя поверхность счетчика покрыта дополнительным слоем меди марки М01 толщиной 1,5 мм. Счетчик имеет следующие размеры: внутренний диаметр – 137 мм, внешний диаметр – 150 мм, длина чувствительной области – 595 мм. Счетчик окружен низкофоновой защитой, состоящей из 18 см меди, 15 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Установка находится в подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900, расположенной на глубине 4900 м в.э. Детектор заполнен ксеноном до давления +5,8 атм. Данный образец ксенона имеет следующий изотопный состав:  $^{124}\text{Xe} \sim 21\%$ ,  $^{126}\text{Xe} \sim 27,12\%$ ,  $^{128}\text{Xe} \sim 33,4\%$ ,  $^{129}\text{Xe} \sim 18,8\%$ ,  $^{130}\text{Xe} \sim 0,071\%$ ,  $^{131}\text{Xe} \sim 0,057\%$ ,  $^{132}\text{Xe} \sim 0,026\%$ ,  $^{134}\text{Xe} \sim 0,088\%$ ,  $^{136}\text{Xe} \sim 0,0806\%$ . Перед заполнением детектора, газ проходит очистку от электроотрицательных примесей с помощью титанового реактора, прогретого до 800 °С. Сигналы с детектора, оцифровываются осциллографом Ла-н10-12РСІ и записываются на жёсткий диск ПК. Такой способ сохранения информации позволяет в офлайн режиме проводить отбор полезных сигналов по форме импульса. Применение специальных процедур отбора полезных событий, позволяет снизить фон в области интересов ( $63,6 \pm 3,7$  кэВ) до 2000 раз.

## 11 Задача "Поиск безнейтринного двойного бета распада $^{100}\text{Mo}$ в составе международной коллаборации АМоRE"

Поиск безнейтринного двойного-бета распада различных изотопов является одной из основных проблем физики элементарных частиц и астрофизики. Этот процесс возможен в том случае, если у нейтрино существует ненулевая масса покоя, а также если нейтрино является майорановской частицей. На наличие массы у нейтрино указывают результаты экспериментов по изучению осцилляций нейтрино. Однако из параметров осцилляций нейтрино можно определить только разницу масс между различными типами нейтрино, а не абсолютные их значения. Данный процесс предсказан для более чем 35 ядер, а для 14 из них был экспериментально обнаружен двойной двухнейтринный бета-распад. Одно из этих ядер –  $^{100}\text{Mo}$ . Энергия перехода  $Q_{\beta\beta}$  для  $^{100}\text{Mo}$  составляет 3034 кэВ, что значительно больше, чем максимальная энергия гамма-излучения от природной радиоактивности (линия 2614,5 кэВ  $^{208}\text{Tl}$ ). Также достаточно большая природная распространённость (9,7%) позволяет с меньшими затратами наработать большое количество изотопа. С целью поиска безнейтринного двойного бета-распада  $^{100}\text{Mo}$ , в 2010 году, была организована международная коллаборация АМоRE (Advanced Mo-based Rare process Experiment), с центром проведения

эксперимента в Южной Корее. Экспериментальная установка основана на сцинтилляционных кристаллах, используемых в качестве криогенных болометров, расположенных в криостате растворения при температуре  $\sim 10$  мК. Эксперимент AMoRE включает в себя три фазы:

— **AMoRE-pilot** - использовалось 6 СМО-кристаллов, общей массой 1,9 кг. Эксперимент проводился с 2015 по 2018 гг. Место расположения - подземная лаборатория Yang-Yang, Южная Корея.

— **AMoRE-I** - использовалось 18 кристаллов общей массой 6,2 кг: 13 СМО-кристаллов и 5 ЛМО-кристаллов. Эксперимент проводился с 2020 по 2022 гг. Место расположения - подземная лаборатория Yang-Yang, Южная Корея.

— **AMoRE-II** - будет включать несколько этапов. На первом этапе будет установлено 90 ЛМО-кристаллов, с общей массой 24 кг. На втором этапе будет добавлено еще 360 ЛМО-кристаллов, с общей массой 150 кг. Т.о. полная масса изотопа  $^{100}\text{Mo}$  будет составлять  $\sim 90$  кг. Место расположения эксперимента - подземная лаборатория Yemilab, Южная Корея. Эксперимент будет проводиться с 2025 по 2035 гг.

## **12 Задача "Поиск двойного безнейтринного бета распада $^{76}\text{Ge}$ в составе международной коллаборации GERDA и LEGEND"**

Целью международного эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа  $^{76}\text{Ge}$  ( $0\nu\beta\beta$  распада). GERDA оперирует с открытыми германиевыми детекторами высокой чистоты из обогащенного  $^{76}\text{Ge}$  (HPGe), погруженными в жидкий аргон. Эксперимент GERDA был расположен в подземной лаборатории LNGS в Италии. Важный шаг в поиске  $0\nu\beta\beta$  распада сделан в 2017 году в эксперименте GERDA путем достижения наиболее низкого уровня радиоактивного фона в сравнении со всеми конкурирующими проектами. Таким образом, GERDA является первым в мире «безфоновым» экспериментом по поиску данного процесса. Статья, посвященная этому результату, опубликована в журнале Nature в 2017 году. В 2020 году набор данных эксперимента GERDA закончен, с этого времени продолжается обработка данных. Одновременно проводятся работы по созданию нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND. Первым этапом эксперимента является установка с названием LEGEND-200 (около 200 кг Ge детекторов), которая сейчас эксплуатируется в существующей инфраструктуре эксперимента GERDA в лаборатории LNGS в Италии. LEGEND-200 в настоящее время набирает статистику и в середине 2023 г. получен первый результат по фону детектора –  $4,2 \cdot 10^{-4}$ /кэВ·кг·год, представленный на конференции TAUP2023. Это значение является рекордным по сравнению с другими проектируемыми и действующими детекторами по поиску распада и соответствует поставленной задаче достижения чувствительности полномасштабного эксперимента на уровне периода



полураспада  $T_{1/2} \sim 10^{28}$  лет. В коллаборацию GERDA входит более 100 ученых из 17 научных центров шести стран. Ученые из ИЯИ РАН, КИ и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с самого начала участвуют в подготовке и проведении эксперимента GERDA. Коллаборация LEGEND является новой расширенной коллаборацией, в которую дополнительно вошли учёные из ряда стран, в том числе из США. В 2024 году российские учёные участвовали в работе коллаборации GERDA удалённо.

### 13 Задача "Увеличение точности измерения угла смешивания $\theta_{13}$ осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz"

Основной целью работы являлось измерение осцилляционного угла смешивания нейтрино  $\theta_{13}$ . Но также, параллельно проводилось изучение спектра антинейтрино ядерного реактора, и проводилось измерение с высокой точностью сечения взаимодействия антинейтрино с протоном.

В эксперименте Double Chooz была набрана бо́льшая статистика нейтринных событий ближним детектором (201 тысяча нейтринных событий) [26], что дает возможность получить экспериментальный спектр антинейтрино и сравнить его с модельным расчетом.

В ядерном реакторе горит смесь изотопов урана и плутония:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ . В ходе делений этих изотопов образуются осколки деления - более легкие ядра, перенасыщенные нейтронами. При бета-распаде осколков излучаются антинейтрино, имеющие характерное распределение по энергии (спектр антинейтрино). Суммарный спектр антинейтрино от смеси осколков всех делящихся изотопов измеряется в ходе эксперимента по продуктам реакции обратного бета-распада (ОБР), используемой для регистрации антинейтрино



Энергетический порог реакции обратного бета-распада составляет 1,806 МэВ.

В эксперименте Double Chooz измерение спектра антинейтрино велось одновременно двумя детекторами, чтобы увидеть искажение спектра, вызываемое нейтринными осцилляциями в одном из них.

Как известно, существуют три типа активных нейтрино  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ . Они могут переходить из одного типа в другой, что и является проявлением нейтринных осцилляций. В ходе экспериментов с атмосферными и ускорительными нейтрино были определены параметры перехода  $\nu_\mu$  в  $\nu_\tau$ . В экспериментах с реакторными нейтрино на расстояниях, где эффективен переход  $\nu_e$  в  $\nu_\mu$  были найдены параметры этого перехода. Для измерения параметров перехода  $\nu_e$  в  $\nu_\tau$  также использовался ядерный

реактор. Эксперимент Double Chooz и проводил измерение последнего перехода с использованием двух детекторов.

По результатам измерений двумя детекторами Double Chooz получено значение угла смешивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm 0,014$ .

Наиболее надежным методом определения спектра антинейтрино ядерного реактора является прямое измерение с использованием реакции обратного бета-распада (ОБР) на ядерно-свободном протоне. Основной проблемой является перевод измеренного спектра позитронов реакции ОБР в спектр антинейтрино. В ИЯИ РАН была разработана методика, позволяющая осуществлять прямой перевод одного спектра в другой.

В эксперименте Double Chooz ближним детектором была набрана достаточно большая статистика нейтринных событий. Она сравнима со статистикой выполненного ранее Ровенского эксперимента, но отличается меньшим фоном и лучшим энергетическим разрешением. Это позволяет восстановить спектр антинейтрино в более широком энергетическом диапазоне, чем в Ровенском эксперименте.

Практически вся энергия нейтрино передается позитрону, а импульс нейтрону. В первом приближении  $T_e = E_\nu - 1,806 - r_n$ , где  $T_e$  - кинетическая энергия позитрона,  $E_\nu$  - энергия налетающего антинейтрино, 1,806 – порог реакции (0.2) в МэВ, а  $r_n$  – энергия отдачи нейтрона. Но шкала энергии позитрона оказывается нелинейной относительно шкалы энергии нейтрино, что надо учитывать при восстановлении спектра антинейтрино. Кроме того спектр позитронов искажается при регистрации детектором.

В ИЯИ РАН разработан собственный метод восстановления антинейтринного спектра по результатам измерений, Метод ИЯИ РАН основан на Монте-Карло (М-К) моделировании процесса регистрации позитрона в сцинтилляционном детекторе.

В 2024 году проводился расчет четырех спектров антинейтрино от осколков деления тяжелых изотопов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ), которые входят в состав ядерного топлива.

Это значение на одно стандартное отклонение превышает полученное в других аналогичных экспериментах (Daya Bay и RENO). Расхождение может объясняться не учетом в текущем анализе дополнительного излучения антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом. Напомним, что в эксперименте Double Chooz бассейны расположены в направлении ближнего детектора, относительно центров активной зоны ядерных реакторов. Вклад в полные потоки, измеряемые детекторами отличается на 0,5%. В то время как в других экспериментах этот вклад не дает искажения в измеряемый угол смешивания, так как бассейны-отстойники находятся на том же расстоянии, что и активные зоны ядерных реакторов.

Был проведен расчет спектров антинейтрино от осколков, получаемых при делении тяжелыми изотопами. Расчет велся методом суммирования индивидуальных спектров осколков с варьированием формы у ядер с неизвестными схемами распада. При расчете производилось сравнение с экспериментальным спектром. Получено хорошее согласие экспериментальных спектров антинейтрино делящихся изотопов с расчетными и, таким образом, была пополнена действующая база данных по схемам бета-распада для ядер далеких от линии бета-стабильности.

Сечение реакции ОБР, полученное на основе расчетных спектров при составе активной зоны реактора Double Chooz  $\sigma_f = 5,70 \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление, хорошо совпадает с экспериментальным сечением Double Chooz  $\sigma_f = (5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление [26]. Отличие в расчетном и экспериментальном сечениях может объясняться дополнительным вкладом в экспериментальное сечение антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом.

#### **14 Задача "Анализ данных детектора LVD, накопленных за 20 лет работы, по исследованию мюонной компоненты космических лучей и естественной радиоактивности, являющихся основными источниками фона в экспериментах по поиску редких событий, проводимых в подземной лаборатории Гран Сассо (LNGS)"**

Эксперименты по поиску редких событий нуждаются в детальном изучении фонов в низкоэнергетичной области. Для любых подземных экспериментов фоном являются атмосферные мюоны, продукты их взаимодействия и радиоактивность. Гамма-кванты с энергиями до 3 МэВ излучаются в результате радиоактивного распада радона от цепочек распада урана и тория. Радон <sup>222</sup>Rn образуется в грунте [27] и выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе или из воды, насыщающейся радоном (радон хорошо растворяется в воде) на пути через скальную породу до подземного зала. Уменьшение концентрации радона происходит: а) за счёт распада (период полураспада радона равен 3,825 дня), б) за счёт миграции из массива в воздух. Однако же новая генерация газа появляется из цепочки распадов урана. Поэтому среднее содержание радона в грунте всегда постоянно и определяется концентрацией урана (радия) в этом массиве. Миграция радона в горном массиве и его выделение с поверхности определяются макроскопическим коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость и трещиноватость. Поскольку количество микротрещин увеличивается при деформациях земной коры во время землетрясений или в результате гравитационных приливов от Солнца и Луны, то должна усиливаться и эманация радона. В работе [28] было впервые доказано наличие вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности под землей,

связанных с солнечными и, в большей степени, с лунными периодами. Целью этого этапа исследований является проведение частотно-временного анализа методом преобразования Фурье временного ряда скорости счета гамма-кантов для нахождения периодов гармоник, связанных с гравитационными приливами от движения Солнца и Луны – это солнечно-суточные, лунно-суточные, лунные периоды и годовой период [29]. А также важной частью работы было разделение источников радиоактивного фона с помощью Монте-Карло моделирования.

#### **15 Задача "Анализ экспериментальных данных первого этапа эксперимента NEWSdm с использованием результатов расчетов для корректного выделения событий взаимодействия темной материи и фоновых событий"**

В настоящее время существует большое количество косвенных экспериментальных указаний на существование темной материи [30], [31], [32]. Эксперимент NEWSdm [33] основан на фиксации направлений траекторий ядер отдачи, образовавшихся в результате упругого взаимодействия ядер мишени с частицами темной материи из галактического гало, что отличает NEWSdm от стандартных низкофоновых экспериментов по поиску частиц темной материи, основанных на анализе годовых модуляций количества зарегистрированных событий. Прототип детектора NEWSdm находится в зале F Лаборатории Гран Сассо (LNGS, Италия).

#### **16 Задача "Изучение физических условий в газе в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности, создаваемых гало темной материи и первичными черными дырами, и расчет поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см нейтрального водорода"**

В последние десятилетия точность наблюдений в космологии существенно возросла и продолжает дальше увеличиваться. Можно ожидать, что для количественного описания всего массива наблюдательных данных потребуются учет очень слабых эффектов, которыми ранее пренебрегали. В рамках данной темы рассмотрен один из таких эффектов, связанный с поглощением в линии нейтрального водорода 21 см на звуковых волнах в космологическую эпоху Темных веков. Эпохой Темных веков условно называют интервал времени между рекомбинацией водорода и повторной ионизацией Вселенной. До появления первых звезд физика процессов не была осложнена хаотическими факторами (нагрев, ионизация, ударные волны и т.п.), и на этом спокойном фоне удобно исследовать различные слабые процессы в ранней Вселенной, в том числе, возможно фундаментального характера. Нетривиальность эпохи Темных веков следует также из наблюдений космического телескопа им. Дж. Уэбба. Он обнаружил, что в конце эпохи Темных веков больших галактик имеется значительно больше, чем ожидалось. Также загадкой остается наличие квазаров на больших

красных смещениях  $z > 7$ . Весьма вероятно, что для объяснения наличия сверхмассивных черных дыр в столь ранние времена требуются затравки в виде массивных первичных черных дыр. В современной Вселенной сверхмассивные черные дыры, возникшие за счет первичных черных дыр, также могут проявлять себя в спокойных и активных галактиках, например, в блазарах [34].

Помимо наблюдения первых галактик в ИК-диапазоне, перспективным инструментом для изучения состояния газа в эпоху Темных веков служит поглощение в линии 21 см [35], соответствующей переходам между уровнями сверхтонкого расщепления в атомах нейтрального водорода. Появление первых звезд и их УФ-излучение за счет эффекта Ваутхейзена-Филда влияет на спиновую температуру газа и, посредством этого, влияет на поглощение в линии 21 см. Таким образом, наблюдения в радиодиапазоне линии поглощения могут давать важную информацию о первых звездах и галактиках. Интересно отметить, что наблюдения радиотелескопов системы EDGES показали наличие поглощения в линии 21 см. на красном смещении порядка 17 [36], но при этом поглощение оказалось значительно сильнее, чем ожидается.

Если в газе имеются неоднородности плотности, то с ними будут связаны peculiar скорости движения газа и некоторое дополнительное поглощение (по отношению к поглощению в однородном газе). Поглощения такого типа соответствует известному в астрофизике эффекту Соболева. Захват барионного газа возможен в гало из темной материи, которые имеют массу, превышающую массу Джинса,  $\sim 10^5 M_{\odot}$ . Если масса гало меньше этой массы, то такой объект не способен захватывать барионы. Газ разбегается от гало в виде звуковых волн, которые затухают и, как чаще всего считается, не представляют интереса для космологии. Целью работы в рамках данной темы является выяснение вопроса о том, какова количественно величина поглощения в линии 21 см на таких волнах. Заранее можно ожидать, что поглощение слабое, однако численное значение данного эффекта ранее получено не было. Если даже поглощение в звуковых волнах очень слабо, то по мере возрастания точности космологических наблюдений подобные малые эффекты в будущем, возможно, станут доступны для изучения.

## 17 Задача "Эксперимент JUNO"

В настоящее время нейтринная физика добилась впечатляющих успехов. С высокой точностью определены параметры осцилляций нейтрино – с рекордной точностью в экспериментах на реакторных нейтрино Daya Bay, RENO и Double Chooz измерен третий угол смешивания  $\theta_{13}$ , в экспериментах с длинной базой ведутся измерения CP-нарушающей фазы  $\delta$  матрицы смешивания нейтрино. Одной из основных задач современной нейтринной физики является определение иерархии масс нейтрино. Именно на решение этой задачи нацелен международный крупномасштаб-

ный эксперимент JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory), создающийся близ города Цзяньмынь в провинции Гуандун на юго-востоке Китая. Эксперимент расположен на расстоянии  $\sim 53$  км от реакторных комплексов Тайншань (2 реактора мощностью 4,6 ГВт каждая) и Янцзян (шесть реакторов мощностью 2,9 ГВт каждая), расположенных на побережье Южно-Китайского моря. Общая мощность реакторов —  $\sim 26,6$  ГВт.

Эксперимент JUNO — международный комплексный многозадачный эксперимент в нейтринной физике и астрофизике частиц. Среди основных задач эксперимента не только определение иерархии масс нейтрино, но и прецизионные измерения параметров осцилляций нейтрино, прецизионные измерения потоков солнечных нейтрино, регистрация нейтринных сигналов от взрывов сверхновых звезд, исследования диффузного потока нейтрино от взрывов сверхновых звезд, накопившихся за всю историю Вселенной, исследования потоков геонейтрино, поиск распада протона на новом уровне чувствительности и т.д.

Разработанный в рамках эксперимента JUNO ближний детектор ТАО, расположенный в непосредственной близости (30 м) от одного из реакторов комплекса Тайншань, позволит не только вести измерения параметров осцилляций нейтрино с точностью лучше 1%, но и даст возможность исследования нарушения CP-четности. Детектор ТАО — это 2,8 тонны жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкил бензола с добавкой гадолиния.

### **18 Задача "Поиск стерильных нейтрино в области масс 0,1-10кэВ в бета-распаде трития"**

В текущем году продолжались работы по разработке предложений для эксперимента по поиску тяжелых стерильных нейтрино с массой несколько кэВ.

Стандартная модель физики не является полной — к примеру, существование темной материи и наличие массы у нейтрино выходят за ее пределы и не объясняются ею. Самая простая возможность объяснить оба этих факта — добавить стерильные (или правые) нейтрино в Стандартную модель. В этом случае масса нейтрино возникает, так же как у всех остальных частиц Стандартной модели, в результате взаимодействия их "правых" компонент с полем Хиггса. Теория не предсказывает величину массы стерильных нейтрино и их поиск необходимо вести в широком диапазоне масс. Если масса стерильных нейтрино около 1 кэВ, то тогда стерильные нейтрино могут составлять основу темной материи. При этом в области масс несколько кэВ время жизни стерильных нейтрино приближается к возрасту Вселенной и чувствительность метода резко падает. Поэтому в этой области масс имеет смысл искать сигнал стерильных нейтрино как примесь к спектру бета-распада, возникающую за счет смешивания активных и стерильных нейтрино. Установки КАТРИН [37] и «Тро-

ицк ню-масс имеют беззаконные источники газообразного трития активностью 30 ГБк (установка КАТРИН) или 0,3 ГБк у «Троицк ню-масс».

Скорость счета в счетном, спектрометрическом режиме ограничена примерно  $10^5$  э/с. на один канал регистрации. Регистрация более высокой скорости счета решается применением многопиксельных детекторов, но тем не менее, на практике приходится снижать интенсивность источника с соответствующей потерей чувствительности.

Не имеет ограничений по скорости счета альтернативный подход, состоящий в измерении среднего тока, создаваемого частицами в детекторе, как было предложено В.М.Лобашевым в 60-х годах прошлого века.

С 2023 г. в Лаборатории исследования редких процессов (ЛИРП) ИЯИ РАН проводятся работы по разработке аналогичного подхода для регистрации электронов бета-распадов трития с помощью детектора на основе цилиндра Фарадея.

# 1 Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц. Разработка необходимого математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля и теорий за рамками стандартной модели

## 1.1 Численное моделирование эволюции системы доменных стенок в расширяющейся Вселенной и оценка спектра образуемых ими гравитационных волн

Изучается эволюция системы космических доменных стенок в модели одного скалярного поля с простейшим потенциалом с двумя вырожденными минимумами. В расширяющейся Вселенной амплитуда скалярного поля постепенно падает, и в некоторый момент времени происходит фазовый переход: поле оказывается заключённым в одной из двух ям, спонтанно нарушается зеркальная симметрия. Как результат, в пространстве образуются области разного вакуума, и между такими областями натягиваются нетривиальные полевые конфигурации – доменные стенки. В ходе дальнейшего расширения стенки деформируются и сталкиваются, стремясь уменьшить свою площадь и излучая скалярные частицы и гравитационные волны. В результате система выходит на скейлинговый режим, когда в хаббловском объёме ("видимая" часть Вселенной) имеется одна бесконечная доменная стенка и много маленьких замкнутых, которые постепенно "испаряются".

Эволюция, образующихся в такой модели доменных стенок, была численно заимитирована с применением находящегося в открытом доступе компьютерного кода CosmoLattice [38, 39]. Численные исследования системы доменных стенок и образующихся гравитационных волн проводились и ранее, однако имеющиеся в литературе результаты, см. например работы [40, 41, 42, 43], по ряду пунктов весьма противоречивы. Нам же в работе [44] удалось получить чёткие предсказания, свободные от типичных для численных исследований решёточных артефактов. Особый интерес имеют предсказания для спектра гравитационных волн, поскольку наклон спектра в инфракрасной области весьма близок тому, что представил в своей работе эксперимент NANOGrav [45].

В нашей работе [44] подробно рассмотрен процесс выхода системы доменных стенок на скейлинговое решение для двух типов начальных условий для неоднородностей скалярного поля: вакуумные и термальные флуктуации. Исследован спектр образующихся в результате доменных стенок и его эволюция до и после выхода на скейлинговый режим. Типичные конфигурации скалярного поля с преобладанием больших бесконечных стенок над малыми замкнутыми, представлены на рисунке 1.1. Особое внимание уделено изучению паразитных эффектов, возникающих при чис-



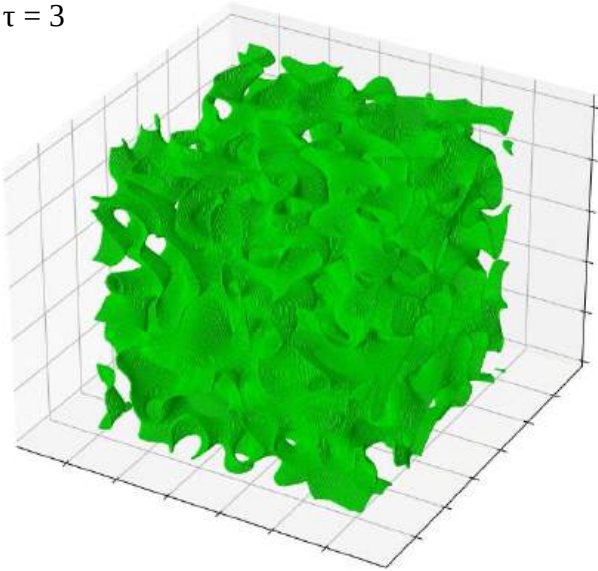
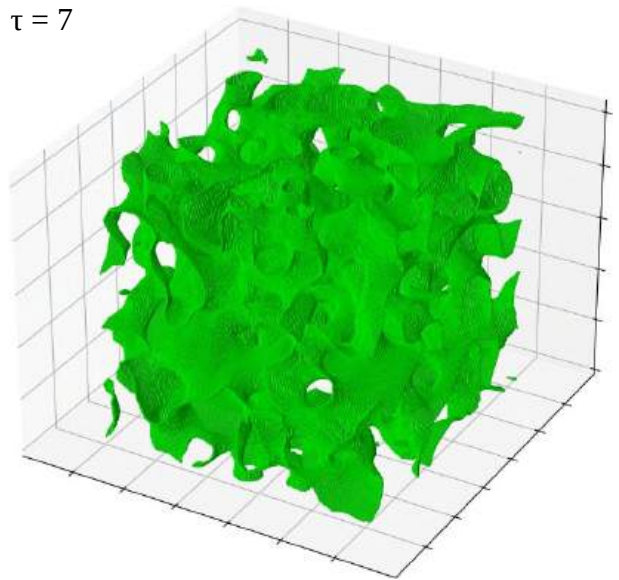
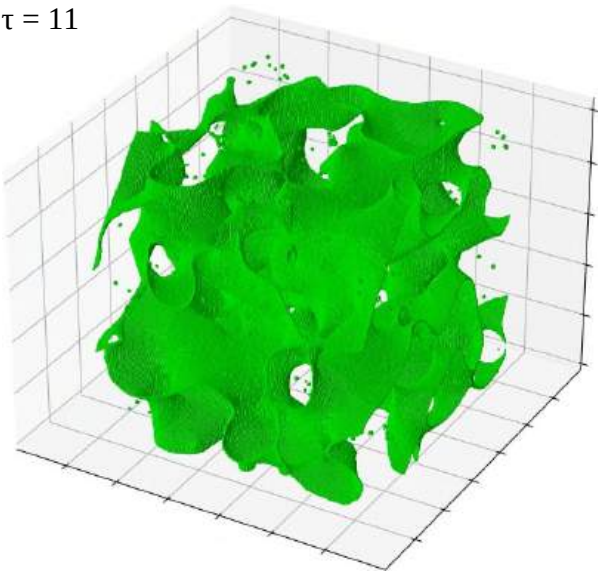
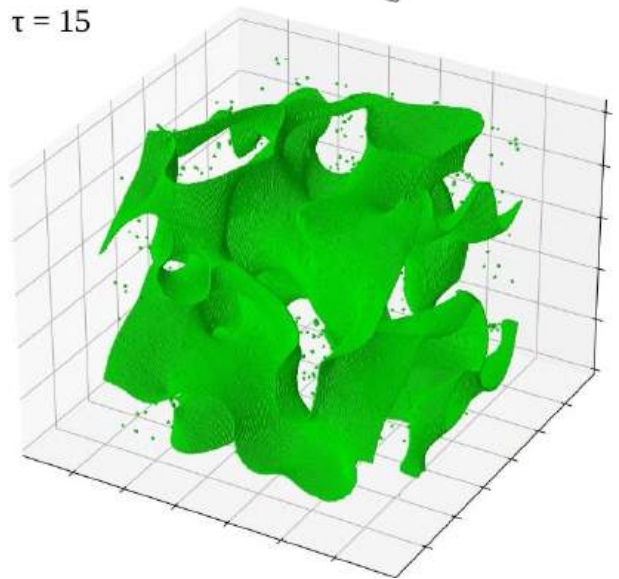
$\tau = 3$  $\tau = 7$  $\tau = 11$  $\tau = 15$ 

Рисунок 1.1 — Эволюция конфигурации доменных стенок

ленных расчётах из-за конечности пространственной решётки, граничных условий, конечной величины шага решётки, конечной толщины доменной стенки, конечного размера, растущего со временем космологического горизонта. В результате были получены оценки на продолжительность временной эволюции, соотношению на размер стенки, размер шага решётки и размер решётки, оптимальные для точных расчётов.

Поскольку единственная наблюдаемая, доступная (в перспективе) для изучения в поздней Вселенной, это образующиеся гравитационные волны, были численно получены спектры этих волн и определены зависимости их характеристик от модельных параметров и деталей космологической эволюции. Примеры получившихся спектров гравитационных волн и временной эволюции полной плотности энергии гравитационных волн представлены на рисунке 1.2. Для получения таких картинок проводились отдельные симуляции с параметрами решётки, позволяющими наиболее

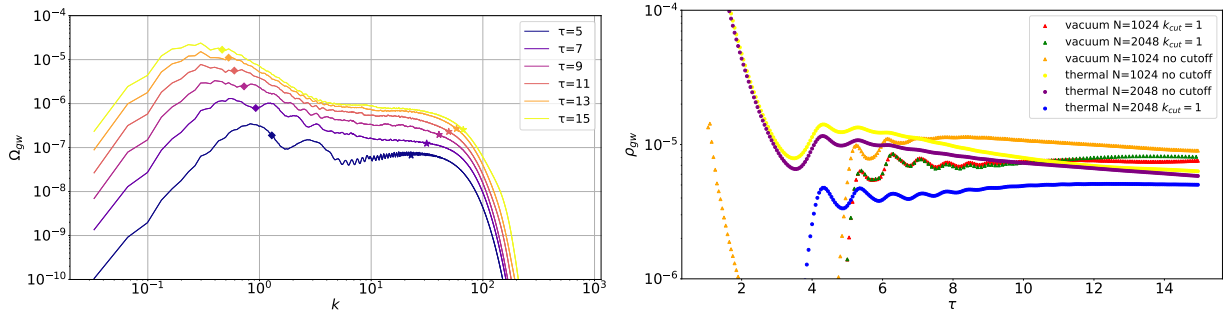


Рисунок 1.2 — Спектр и плотность энергии гравитационных волн

точно вычислить инфракрасную, центральную и ультрафиолетовую части, а затем результаты складывали. Инфракрасный хвост спектра хорошо приближается степенным законом с показателем 2.7, что на уровне лучше 2 стандартных отклонений согласуется с результатом эксперимента NANOGrav. Это несколько меньший показатель, чем ожидалось из простых теоретических оценок. Его уменьшение обусловлено конечностью временной эволюции, что весьма реалистично, так как конфигурация космических доменных стенок должна пропасть, чтобы не доминировать в расширяющейся Вселенной.

Отметим, что как видно из полученного спектра гравитационных волн 1.2, доменные стенки являются постоянно работающим источником. Вклад ранних эпох не так существен, как вклад поздних. Это означает, что заметное влияние на окончательную форму спектра, причём в области максимальной амплитуды, может оказать динамика стенок в момент их исчезновения. Таким образом предсказываемый спектр на самом деле зависит от механизма уничтожения доменных стенок, а значит, его изучение позволяет исследовать физику этого явления. Два популярных механизма уничтожения доменных стенок: введение в теорию взаимодействия, явно нарушающего зеркальную симметрию, и восстановление зеркальной симметрии в ходе расширения Вселенной (обратный фазовый переход). Отметим, что в последнем случае скалярные частицы поля, образующего доменные стенки, в поздней Вселенной будут стабильны, а значит могут претендовать на роль частиц тёмной материи [46, 47]. Предсказываемый при этом из аналитических оценок спектр образующихся гравитационных волн оказывается ещё ближе к наблюдаемому, см. [48]. Численную эволюцию доменных стенок в моделях с реалистичным механизмом их уничтожения, а также образующиеся при этом гравитационные волны, мы планируем исследовать в ходе дальнейшей работы.

## 1.2 Перспективы экспериментального исследования физики элементарных частиц на проектируемой Супер-Чарм-Тау-Фабрике

Любой экспериментальный проект нацелен в первую очередь на выполнение одной или нескольких основных задач. Исходя из этого, выбираются его основные технические характеристики, формируются требования к приборам, которые необходимо использовать. Не является исключением и проект Супер-Чарм-Тау-Фабрики, активно рассматриваемый сегодня для реализации на нескольких площадках в Российской Федерации и Китайской Народной Республике. Однако, после формирования основных очертаний проект начинает "обрастать" деталями – как в плане технического оснащения, так и в плане физических задач, решение которых возможно при его успешной реализации с намеченными характеристиками. Сопоставление одних и других показывает реальные технические и физические рамки проекта, и иногда заставляет сдвигать и первоначальные ориентиры.

Основная цель СЧТФ – прецизионное исследование тау-лептона и адронных резонансов (в основном с участием очарованного кварка,  $c$ -кварка) – в области масс между порогом образования  $J/\psi$  (чарм-античарм,  $\bar{c}c$ -система) и порогом образования существенно более тяжелых красивых мезонов (с примесью красивого кварка,  $b$ -кварка). Конкурентами в этой области являются давно и успешно работающий эксперимент LHCb на базе коллайдера LHC и постепенно набирающий обороты проект Belle-II ( $b$ -фабрика) на базе коллайдера KEK. Естественно встает вопрос о необходимости реализации нового проекта – СЧТФ с учётом результатов и, особенно, перспектив конкурентов. Ответ интересен не только тому кругу специалистов, который непосредственно вовлечён в работу над проектом, но и многим другим, чья деятельность пересекается с обсуждаемой областью.

Для широкого обсуждения вопроса о реалистичности и конкурентноспособности проекта СЧТФ было решено написать обзор в журнал Успехи Физических Наук. Авторский коллектив весьма широк как по специализации – техники, ускорительщики, экспериментаторы, феноменологи, теоретики, так и по ведомственной принадлежности. Представитель Института ядерных исследований, участвовавший в написании обзора, в первую очередь отвечал за физическую программу установки в части поиска процессов за рамками СМ, в частности поиска экспериментальных проявлений моделей новой физики, предсказывающей существование новых гипотетических частиц в доступной для прямого исследования области масс. Был проведён поиск по литературе оригинальных работ, посвящённых исследованию чувствительности СЧТФ к параметрам различных моделей такого рода, из которых выбрано несколько для наглядной иллюстрации широты и реалистичности перспектив.

### 1.3 Долгоживущие сголдстино в нейтринных телескопах

Суперсимметричные расширения Стандартной модели являются интересной возможностью новой физики. В реалистичном сценарии суперсимметрия, если она существует в природе, должна быть спонтанно нарушена. Как следствие этого нарушения должен существовать голдстоуновский фермион, который в супергравитационных обобщениях становится продольной компонентой гравитино (суперпартнера гравитона), и его суперпартнеры. В простейшем сценарии суперпартнерами являются скалярная и псевдоскалярная частицы - сголдстино. Константы взаимодействия этих частиц определяются соотношением параметров, мягко нарушающих суперсимметрию, связанных с массами суперпартнеров частиц Стандартной модели, и масштаба нарушения суперсимметрии. В сценариях с низким масштабом нарушения суперсимметрии сголдстино могут быть достаточно легкими, с массой порядка нескольких ГэВ. В данном исследовании проведен расчет скорости образования скалярных и псевдоскалярных сголдстино с массой 100 – 400 МэВ в распадах мезонов, образующихся при распространении широких атмосферных ливней, для чего использовался программный пакет MCEq. В феноменологически интересной области пространства параметров основной вклад в образование скалярных  $S$  и псевдоскалярных сголдстино  $P$  дают распады каонов вида  $K \rightarrow \pi S(P)$ ,  $K \rightarrow \pi\pi P$ , а также  $K \rightarrow l\nu P$ . Для данного был проведен расчет спектров, образующихся в результате этих распадов сголдстино. Результаты моделирования были использованы для нахождения области в пространстве параметров модели, к которой будет чувствителен нейтринный эксперимент на детекторе SuperKamiokande (и его обновленной версии, HyperKamiokande). Для рассматриваемого диапазона масс доминирующим каналом распада сголдстино в значительном количестве сценариев являются распады на 2 фотона. Для нахождения пределов на параметры модели из такого поиска использовались данные SuperKamiokande по изучению осцилляций атмосферных нейтрино [49]. При этом фоном к изучаемому сигналу консервативно выбирались зарегистрированные этим события электронных нейтрино и антинейтрино, отнесенные к категории Multi-GeV и Multi-Ring, которые могут мимикрировать сигнал от фотонов. Расчет показал, что наибольшая чувствительность к данному сигналу достигается в области  $\sigma\tau \sim 1$  км, где  $\tau$  – время жизни сголдстино. Эти результаты также использовались для оценки чувствительности нового эксперимента HyperKamiokande. Показано, что HyperKamiokande за 10 лет работы в рамках описанного сценария образования сголдстино в распадах мезонов в широких атмосферных ливнях с последующим распадом на два фотона может протестировать область пространства модели, разрешенную другими поисками, в частности, поисками редких распадов каонов и поисками на экспериментах с фиксированной мишенью.

## 1.4 Рождение тёмных фотонов в процессе упругого тормозного излучения протона с ненулевым переданным импульсом

Для уточнения сечения упругого тормозного излучения протона  $pp \rightarrow pp\gamma'$  были проанализированы известные подходы, изложенные в работах [6, 7, 11]. Их основным сходством стало приближение тождественного равенства нулю 4-импульса, переданного протону мишени [6] или малости его квадрата [11]. В нашей работе упругое рассеяние протонов описывается с помощью обмена гипотетической векторной частицей с 4-импульсом  $q$ . Новизна проведенных вычислений состоит в рассмотрении  $q$ , отличного от нуля по модулю и имеющего ненулевые поперечные компоненты 3-импульса по отношению к направлению импульса исходного протонного пучка.

Для упругого тормозного излучения были рассмотрены диаграммы с испусканием тёмного фотона в начальном и конечном состоянии и стандартными методами аналитически найдено дифференциальное сечение. Используя данные по упругому протонному рассеянию, численно было найдено полное сечение упругого тормозного излучения в зависимости от массы тёмного фотона в диапазоне 0,4-1,8 ГэВ (см. рисунок 1.3 а). Вычисления были проведены для значений энергий, характерных для протонных пучков ускорителей J-PARC, У-70, Fermilab и CERN SPS.

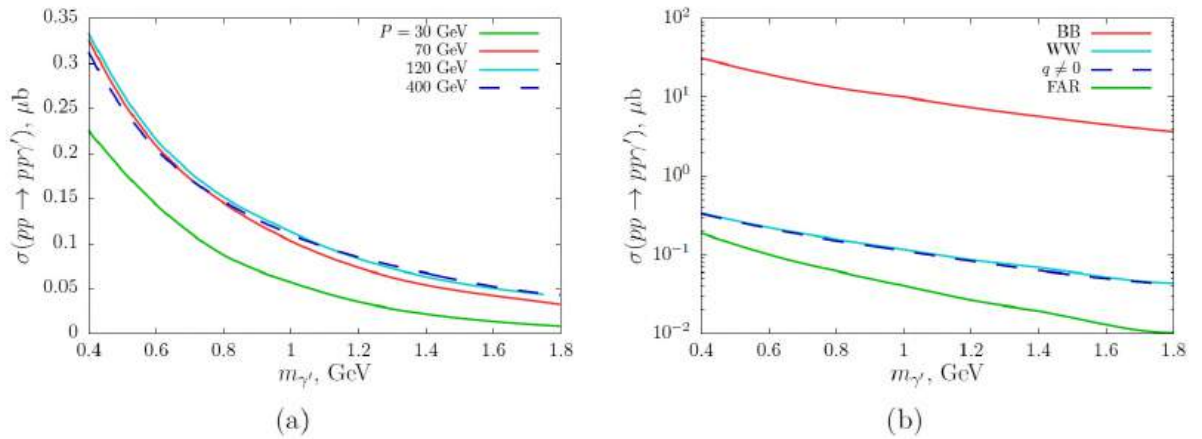


Рисунок 1.3 — Зависимость полного сечения упругого тормозного излучения протона от массы тёмного фотона а) для различных значений импульса протонного пучка, б) в сравнении с результатами других авторов

Кроме того, для тёмного фотона массой 1 ГэВ было проведено сравнение полученного результата с другими ответами, известными в литературе (см. рисунок 1.3 б). Также на уровне 95% CL были получены предварительные контуры в пространстве параметров модели, к которым будет чувствителен детектор будущего эксперимента SHiP при поисках видимых распадов тёмных фотонов.

## 1.5 Перспективы проекта NICA по поиску новой физики: модель с темным фотоном и аксионоподобной частицей

Малая константа связи НФ со СМ делает возможным длительное время жизни гипотетических частиц. В связи с этим, как тёмный фотон, так и ALP могут преодолевать макроскопические расстояния в детекторе перед распадом. В данной работе предлагается использовать этот факт и искать события со смещённой вершиной. Заметное расстояние между точкой столкновения пучков и точкой распада гипотетической частицы позволяет свести фоновый сигнал к незначительному уровню. В недавнем отчёте по MPD была предложена модернизация внутренней трековой системы (ITS). После установки эта система позволит определять положение вторичной вершины с точностью до 10 мкм. Положение точки столкновения определяется с точностью около 100 мкм.

Источником темных фотонов на NICA были выбраны распады адронов. Наиболее перспективными оказались пи и эта мезоны. В моделях с ALP адроны также могут распадаться в ALP. Также учитывался вклад в рождение ALP в процессе рассеяния вторичных фотонов, которые возникают при движении заряженных ионов с большим прицельным параметром (ультрапериферические столкновения). Для оценки количества таких ALP был применён метод, описанный в [50], и проведены вычисления для столкновений  $Vi-Vi$ . В данной работе, в моделях с тёмным фотоном рассматривались только его распады в электроны, так как текущая конфигурация MPD не предполагает наличие мюонного детектора, а адронные моды распада неразличимы на фоне большого числа пионов. В моделях с ALP в качестве сигнала рассматривался только распад в фотоны. Другие распады в частицы СМ учитывались при расчёте полной ширины гипотетической частицы и суммировались в ширину стандартной модели. Результаты работы показывают, что после модернизации детектора MPD и установки внутреннего трекера появится возможность определять вторичные вершины с достаточной точностью для использования их в качестве сигнатуры при поиске НФ. Эти исследования помогут найти новые частицы или исключить параметры моделей, которые до сих пор остаются допустимыми, а также проверить результаты других экспериментов. Включив метод полускрытого сектора в наш анализ, мы расширили спектр проверяемых моделей. Результаты показали хорошие перспективы NICA в тестировании моделей с лёгким скаляром и вектором.

## 1.6 Поиски астрофизических проявлений аксионов и аксионоподобных частиц

Гамма-всплеск GRB 221009A был самым ярким из когда-либо зарегистрированных на Земле. На ранней стадии послесвечения фотоны с исключительной энергией выше 10 ТэВ наблюдались на установке LHAASO, а один фотоноподобный ливень с энергией выше 200 ТэВ был обнаружен установкой Ковер-2 на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Гамма-лучи очень высоких энергий не могут дойти до нас от далеких гамма-всплесков из-за рождения пар на космическом фоновом излучении. Обсуждался ряд решений этой проблемы с помощью физики частиц. Одно из самых популярных предполагает смешивание фотонов с аксионоподобными частицами. Является ли такой сценарий жизнеспособным, в решающей степени зависит от магнитных полей вдоль луча зрения, которые плохо известны. В работе [51] мы использовали результаты недавних наблюдений космического телескопа Хаббл за родительской галактикой GRB 221009A в сочетании с измерениями магнитного поля и моделированием для других галактик, чтобы построить игрушечную модель магнитного поля родительской галактики и оценить скорость преобразования фотонов в аксионы в ней. Благодаря, в частности, исключительной ориентации родительской галактики, плоскость которой совпадает с лучом зрения, сильное смешивание оказывается естественным для энергетических диапазонов LHAASO и Ковра-2 для широкого диапазона масс аксионоподобной частицы  $m_a < 10^{-5}$  эВ и постоянной аксион-фотонного взаимодействия  $g_{a\gamma} > 10^{-11}$  ГэВ<sup>-1</sup>.

На протяжении двадцати лет остаются необъясненными аномальные корреляции космических лучей экстремально высокой, более  $10^{19}$  эВ, энергии с космологически удаленными лацертидами, обнаруженные в 2004 году в данных эксперимента HiRes. Они требуют существования нейтральных частиц такой энергии, которые могут пролететь сотни мегапарсек, не поглощаясь и не распадаясь. Один из вариантов объяснения связан с аксионоподобными частицами. В 2024 году нами была начата работа по проверке и уточнению этих гипотез с помощью новых наблюдательных данных. В качестве первого шага мы проанализировали новые наблюдения лацертид с помощью современных астрономических инструментов и построили изотропный каталог блазаров, отобранных по их оптическому излучению, покрывающий все небо [52]. Мы определили критерии изотропии, приложив особые усилия для охвата области плоскости Галактики, и составили изотропную выборку блазаров с оптическими звездными величинами  $G < 18^m$ , скорректированными на галактическое поглощение. Источники были взяты из выборок, отобранных по радиоизлучению парсекового масштаба или по потоку высокоэнергетического гамма-излучения, которые, как известно, эффективно отбирают блазароподобные объекты. Построен каталог из 651

оптически ярких блазаров, равномерно распределенных по небу, вместе с их радио-, оптическими, рентгеновскими и гамма- потоками, а также изотропная выборка из 336 подтвержденных лацертид. Этот каталог может быть использован в будущих статистических исследованиях энергичных нейтрино, космических лучей и гамма-излучения. Он публично доступен в Страсбургской базе астрономических данных.

Мы провели и первое исследование с помощью этого каталога [53], связанное с одним из предсказаний аксионного объяснения корреляций космических лучей с лацертидами. Ранее было обнаружено, что распределение на небе лацертид, связанных с космическими лучами, отклоняется от изотропии, что может дать ключ к интерпретации наблюдаемой аномалии. Однако в предыдущих исследованиях использовалась выборка лацертид, которая сама по себе была анизотропной, что требовало дополнительных методов учета этой анизотропии и усложняло интерпретацию. Здесь мы используем нашу изотропную полную выборку лацертид и те же данные HiRes, чтобы подтвердить наличие корреляций и усилить аргументы в пользу локальной крупномасштабной структурной модели в распределении коррелированных событий на небе. Дальнейшие проверки аномалии ожидают новых точных данных по космическому излучению.

Некоторая доля диффузного фона гамма-излучения во Вселенной может быть связана с высокоэнергетическими нейтрино, рождение которых в астрофизических источниках сопровождается рождением фотонов, которые затем участвуют в электромагнитных каскадах. Влияние гипотетических аксионоподобных частиц на эту компоненту исследовано нами [54] с использованием транспортных уравнений. Исследованы изменения этого спектра за счет аксион- фотонной конверсии в межгалактическом магнитном поле для различных параметров частиц и режимов смешивания в источниках. Результаты показывают значительное влияние конверсии на поток фотонов даже в случае обратной константы аксион-фотонной связи  $M$ , равной  $10^{11.5}$  ГэВ, и некоторые остаточные эффекты в случае  $M = 10^{12}$  ГэВ. Такой сценарий демонстрирует еще один аспект многоканального подхода, связывающего данные нейтринных и гамма-телескопов, и в определенной степени снимает некоторое несогласие между ними, существование которого обычно интерпретируется как признак ограниченной прозрачности популяции источников нейтрино.

Аксионоподобные частицы, образующиеся в звездных недрах, могут служить дополнительным механизмом потери энергии, потенциально влияя на звездную эволюцию. Известные методы поиска таких эффектов включают измерение свойств красных гигантов и звезд горизонтальной последовательности в шаровых скоплениях. Мы использовали [55] опубликованные каталоги звезд, отобранных в качестве членов семи скоплений на основе параллаксов и собственных движений, измеренных



космическим телескопом Gaia (Data Release 3). Используя ранее полученные теоретические соотношения и новые данные, мы находим верхний предел на константу взаимодействия аксионоподобных частиц с электронами,  $g_{ae} < 2,3 \cdot 10^{-14}$  (95% CL), и указание ( $3,5\sigma$ ) на ненулевое взаимодействие их с фотонами,  $g_{a\gamma} = 6,5_{-1,2}^{+1,0} \cdot 10^{-11}$  ГэВ<sup>-1</sup>.

### 1.7 Резонансная генерация электромагнитных мод в нелинейной электродинамике: квантовый подход

В статье изучается резонансная генерация гармоник высшего порядка в замкнутой полости в электродинамике Эйлера-Гейзенберга с точки зрения чистой квантовой теории поля. Мы рассматриваем квантовые состояния электромагнитного поля в прямоугольной полости с проводящими граничными условиями и вычисляем сечение слияния трех квантов мод полости в один (процесс  $3 \rightarrow 1$ ), а также рассеяния двух квантов мод полости (процесс  $2 \rightarrow 2$ ). Мы показываем, что амплитуда процесса слияния обращается в нуль для полости с произвольным соотношением сторон, и даем объяснение, основанное на разложении плоских волн для мод полости. Напротив, амплитуда рассеяния не равна нулю для определенного соотношения сторон полости. Это  $2 \rightarrow 2$  рассеяние является важнейшим элементарным процессом для генерации кванта гармоники высшего порядка с частотой  $2\omega_1 - \omega_2$  при взаимодействии двух когерентных состояний мод полости с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Для этого процесса мы вычисляем среднее число квантов в конечном состоянии в модели с диссипацией, что подтверждает предыдущий результат резонансной генерации гармоник высшего порядка в эффективном подходе теории поля [20].

### 1.8 Ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности кубического типа в квантовой электродинамике из формирования фотонных атмосферных ливней

В работе было получено новое сечение для процесса Бете-Хайтлера для кубического дисперсионного соотношения модификации фотонного сектора КЭД, проанализированы потенциальные эффекты, связанные с иной кинематикой распространения фотонов с нарушением ЛИ: временные задержки в распространении сигнала, вакуумное двойное лучепреломление, распад фотона (связанный с наличием эффективной массы фотона). Для анализа наземных экспериментов мы также получили ограничение на наблюдаемый спектр, исходя из взаимодействия астрофизических высокоэнергетических фотонов с космическим микроволновым фоном и внегалактическим фоном. С помощью  $\chi^2$ -теста было получено ограничение на параметр массы нарушения ЛИ, а именно для Крабовидной туманности, J2226+6057, J1908+0621 на основе данных обсерватории LHAASO с 95% доверительным интервалом.

## 2 Построение новых теорий и моделей, предсказывающих существование частиц – кандидатов на роль темной материи Вселенной. Разработка математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля

### 2.1 Галактическая темная материя, состоящая из стерильных нейтрино, с массами несколько кэВ по данным NuSTAR после 11 лет работы

Мы проводим вычисление сигнальных потоков от распадов стерильных нейтрино, которые могут быть получены по данным телескопа NuSTAR, полученных за 11 лет наблюдений для различных профилей темной материи в нашей Галактике. Для оценки сигнального потока нам необходимо знать распределение плотности темной материи в нашей Галактике. Эта величина не фиксирована и не измеряется напрямую, поэтому существуют значительные неопределенности в оценках распределения темной материи. Мы проводим наш анализ на широком диапазоне профилей плотности темной материи. Мы фиксируем плотность темной материи на малых расстояниях от центра галактики как  $\rho_{DM}(r < 1\text{кпк}) = \rho_{DM}(r = 1\text{кпк})$ . Это не оказывает заметного влияния на наш анализ, поскольку мы рассматриваем только те направления, где галактическая широта больше трех градусов.

Мы используем данные, собранные NuSTAR по всему небу, для поиска возможных следов радиационного распада стерильного нейтрино на активное нейтрино и фотон, предполагая, что стерильные нейтрино составляют весь компонент темной материи нашей Галактики. Анализ рентгеновских спектров мы выполняем с помощью пакета XSPEC.

После вычисления ожидаемого сигнального потока мы анализируем рентгеновские спектры на предмет наличия ожидаемого сигнала. Подобно другим недавним исследованиям, мы не находим убедительных доказательств связи монокроматической линии с распадом стерильных нейтрино с массами 6 - 40 кэВ. Работа [56] находится на рецензии в журнале Phys. Rev. Lett.

### 2.2 Поиск скалярных медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью

В данной работе мы изучили урощенные сценарии ТМ с массами до 1 ГэВ, которые включают в себя электронн-специфичные скалярные медиаторы. Мы оценили перспективы поиска такой материи в экспериментах с фиксированной мишенью, таких как NA64e и LDMX. В частности, мы вывели новые ограничения на константу связи скалярного медиатора для канала аннигиляции  $e^+e^-$  в мишени и

показали, что эти ограничения дополняют чувствительность от широко используемого сигнала тормозного излучения,  $eN \rightarrow eN\phi$ , за которым следует невидимый распад,  $\phi \rightarrow \text{ТМ} + \text{ТМ}$ . В частности, было показано, что аннигиляционный канал NA64e и LDMX может улучшить чувствительность на фактор  $\mathcal{O}(1)$  для определенного диапазона легкой массы ТМ. Мы изучили различные механизмы рождения ТМ для соответствующих экспериментов и показали, что режим резонансной аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \text{DM} + \text{DM}$  может быть перспективным механизмом рождения медиатора спина-0, которые дают улучшенные ограничения для майорановского, дираковского и векторного типа ТМ. Мы показали, что NA64 исключает характерное пространство параметров майорановской, дираковской и векторной ТМ для определенного набора констант связи темной материи и медиатора. Работа опубликована в журнале [57].

Во второй части нашей работы мы исследовали возможности экспериментов с фиксированной мишенью, таких как NA64, для поиска процессов, включающих переходы электронов в мюоны. В частности, в этом исследовании мы сосредоточились на использовании электронного пучка 100 ГэВ в H4 для поиска нового скалярного бозона  $\phi$ , изменяющего аромат лептона, в реакции, подобной тормозному излучению,  $eN \rightarrow \mu N\phi$ . Мы рассчитали дифференциальные и полные сечения на древесном уровне бех приближений, и с использованием приближения Вайцзекера-Вильямса. Соответствующие формулы были имплементированы в реалистичное Монте-Карло моделирование с использованием пакета DMG4 на основе GEANT4, а также экспериментальной установки NA64. Также были идентифицированы и изучены два основных потенциальных источника фона: рождение димюонов в ECAL и остаточный распад адронов пролетающих сквозь установку. Мы показали, что наиболее опасный фон возникает из оставшихся мюонов от распада адронов. Его можно было бы еще больше уменьшить путем усовершенствований детектора SRD. В этой работе мы продемонстрировали, что добавление спектрометра за последним модулем HCAL позволит подавить фон на требуемом уровне в  $10^{-11}$ . Экспериментальная прогнозируемая чувствительность, основанная на моделировании, показывает, что при статистике в  $10^{11}$  электронов NA64 может исследовать пространство параметров, которое мотивировано одновременным решением аномалии мюона ( $g-2$ ) и темной материей. Работа опубликована в журнале [58].

### 2.3 Теоретическое и феноменологическое исследование партонных распределений и глубоконеупругих структурных функций в протонах, нейтронах и ядрах

Интерпретация прецизионных измерений в физике высоких энергий с участием ядер требуют учета воздействия ядерной среды на партонном уровне. Известен ряд механизмов влияющих на ПР связанных нуклонов. Например, в области больших значений переменной  $x$  основные поправки обусловлены импульсным распределением и энергией связи нуклонов в ядрах. Наряду с этими, кинематическими, эффектами следует учитывать динамическую модификацию внутренней структуры связанных нуклонов. В работах такая модификация обусловлена немассовыми поправками к ПР, т.е. зависимостью от виртуальности связанного нуклона. Дополнительные поправки, связанные с мезонными обменными токами и эффектом ядерного экранирования, актуальны в области малых значений  $x$ . Модель сочетающая все эти эффекты была успешно использована для количественного описания наблюдаемых ядерных зависимостей сечений ГНР и ДЯ процессов для широкого диапазона ядерных мишеней от дейтрона до свинца. В этом подходе немассовые эффекты в связанных нуклонах описываются дополнительными структурными функциями протона и нейтрона. Эти функции определяются из анализа данных. Данная величина была определена из анализа данных по отношению сечений тяжелых и легких ядер. Наряду с партонными распределениями мы определяем немассовые функции протона и нейтрона. Выбор ядер обусловлен как результатами новых экспериментов, так и тем что вычисления наблюдаемых сечений для легких ядер имеют существенно меньшие теоретические неопределенности, связанные с ядерной структурой, по сравнению с аналогичными расчетами для тяжелых ядер. В работе [59] изучается нейтрон-протонная асимметрия во немассовых эффектах структурных функций и соответствующие корреляции с феноменологией высших твистов в глобальном КХД анализе. Показано, что предсказания, основанные на описанном выше подходе, отлично согласуются с новыми измерениями ядерного EMC эффекта в трех-частичных ядрах в эксперименте MARATHON [60].

Недавно коллаборация SeaQuest опубликовала данные ДЯ-эксперимента по рождению димюонной пары на водородной и дейтронной мишенях. Эти данные получены в кинематической области, которая потенциально чувствительна к распределениям  $u$ - и  $d$ -антикварков в водороде и дейтерии в области больших значений  $x$ . В работе [61] исследуются влияния экспериментальных данных SeaQuest на распределения  $u$ - и  $d$ -антикварков в протоне в рамках подхода, основанном на глобальном КХД-анализе в порядках NLO и NNLO по константе сильного взаимодействия. В результате анализа [61] найдено, что данные SeaQuest позволяют уменьшить неопреде-

ленности в определении распределений  $u$ - и  $d$ -антикварков и улучшить ограничения на  $u$ - $d$  асимметрию в кварковом море протона при больших  $x$ .

## 2.4 Теоретическая поддержка нейтринного эксперимента DUNE

Нейтринный эксперимент с длинной базой DUNE направлен на экспериментальное исследование ряда фундаментальных задач современной физики частиц и астрофизики, в частности, проблемы барионной асимметрии ранней вселенной, динамики нейтринных вспышек в сверхновых звездах и нуклеосинтеза, природы темной материи, проблемы распада протона. Эти и другие проблемы планируется исследовать в эксперименте DUNE с использованием ведущей в мире технологии детекторов жидкого аргона (LAr). Международный эксперимент DUNE, проводимый в Фермилабе (США), включает в себя комплекс ближнего детектора (ND) и набора из четырех больших детекторных модулей на удалении 1300 км от Фермилаба в подземном исследовательском центре Сэнфорда (SURF) в Южной Дакоте. Эти детекторы будут регистрировать нейтрино в широком диапазоне энергий, исходящие из нового высокоинтенсивного нейтринного пучка в Фермилабе. Модульный дальний детектор (FD) также будет обнаруживать нейтрино от космических лучей в атмосфере и из астрофизических источников. ND и FD также будут чувствительны к широкому диапазону явлений за пределами стандартной модели.

## 2.5 Рост аксионных звезд

В данной задаче исследовался процесс роста аксионных звезд внутри миникластеров за счет процессов бозе-конденсации.

Исследование проводилось с помощью прямой численной симуляции аксионного поля внутри ящика, качественно напоминающего компактный миникластер, а также с помощью решения кинетического уравнения. Оба подхода дали схожие результаты.

Численные эксперименты показали, что процесс конденсации аксионов внутри ящика происходит самоподобным способом. А именно, кинетическая эволюция сводится к перескакиванию функции распределения аксионов и их импульсов, а форма функции распределения не зависит от времени. Причем, самоподобный анзац проходит через уравнения Ландау (т. е. через кинетическое уравнение, описывающее гравитационные взаимодействия), надо лишь учесть возможное несохранение числа частиц и энергии в «бане», состоящей только из диффузных аксионов, за счет продолжающейся конденсации.

Данное наблюдение позволило нам решить задачу о росте бозе-звезд внутри аксионных миникластеров аналитически. Действительно, самоподобная эволю-

ция функции распределения полностью задается двумя функциями времени, которые связаны друг с другом посредством уравнения Ландау. Потребовав сохранения полной энергии и полного числа частиц во всем миникластере, включающем диффузные аксионы и бозе-конденсат, мы получили алгебраическое уравнение, описывающее рост массы конденсата. Решение этого уравнения воспроизвело закон роста массы, полученный в симуляциях.

Важно, что рост Бозе-звезд, предсказанный нашей формулой, оказался гораздо более интенсивным, чем предполагалось ранее в литературе. А именно, основываясь на фитах численных результатов, предыдущие авторы зачастую полагали, что рост Бозе-звезд останавливается после достижения некоторой массы «кор-гало». Такое упрощение, конечно же, противоречило термодинамической интуиции, говорящей о том, что кинетическая эволюция не должна остановиться до достижения термодинамического равновесия (в котором практически все аксионы сконденсированы). Наша формула действительно предсказывает резкое замедление роста конденсата после массы «кор-гало», но также предсказывает последующий медленный рост Бозе-звезд. Благодаря этому экстраполяция наших результатов на случай реалистичных аксионных звезд в нашей Вселенной сильно отличается от результатов эвристических подходов. Мы предсказываем, что существенная доля аксионных миникластеров может сконденсироваться, образовав Бозе-звезды, которые в модели с темными аксионами КХД должны иметь астероидные массы и размеры около 100 км. Результаты работы опубликованы в статье [62].

## 2.6 Применение метода эффективного потенциала для стационарных задач в квантовой теории поля

Существование солитонов может быть обеспечено двумя механизмами: топологическим и нетопологическим. Топологический механизм основан на нетривиальной структуре вакуума и на том факте, что существуют решения с сохраняющимся ненулевым топологическим зарядом [63]. В нетопологическом случае наличие ненарушенной, непрерывной внутренней симметрии в теории обеспечивает сохраняющийся заряд  $Q$ . Набор специальных условий для потенциала комплексного скалярного поля приводит к существованию нетопологических солитонов, называемых  $Q$ -шарами.  $Q$ -шары были подробно изучены в многочисленных предыдущих работах и обзорах [64, 65].

Методы ЭТ могут быть использованы при условии наличия иерархии параметров теории. В частности, можно отынтегрировать тяжелое вещественное поле в модели ФЛС, чтобы получить ЭТ с  $Q$ -шарами [66]. Полученный эффективный

потенциал представляет собой гладкую кусочно-заданную функцию. Интегральные характеристики Q-шаров в ЭТ воспроизводят характеристики модели ФЛС.

В рамках квантовой теории поля модель ФЛС требует более детального изучения. Во-первых, ее следует рассматривать как теорию, заданную на некотором масштабе энергий. В пределе слабой связи этот масштаб задается массами линейных возбуждений полей, а соответствующие квантовые поправки малы. С другой стороны, Q-шары могут быть очень большими, вплоть до значений нётеровского заряда  $Q \gtrsim 10^{14}$  [67, 68]. Масса солитона задает другой масштаб, и соответствующие квантовые эффекты могут кардинально изменить свойства классических решений. Во-вторых, в двухполевой модели ФЛС может быть некоторая иерархия масс, что может позволить сгенерировать эффективный потенциал Коулмена-Вайнберга [69] в приближении одной петли. В-третьих, квантовая модель ФЛС должна быть УФ-полной; ее следует пополнить, посчитав квантовые поправки, связанные с контрчленами в потенциале комплексного поля.

## 2.7 Фантомное скалярное поле в ОТО, приводящее к существованию кротовой норы с взаимодействующими устьями

Исследование было посвящено решению задачи на начальные данные в ОТО плюс фантомное скалярное поле. Решение на начальные данные — это решение уравнений гамильтоновой и импульсной связи ОТО совместно со связями на поля материи, на начальной гиперповерхности Коши. В случае симметричной по времени начальной гиперповерхности (т. е. когда тензор внешней кривизны равен нулю), уравнения связей в исследуемой модели можно свести к единственному уравнению Лапласа. Геометрия начальной гиперповерхности описывается конформно-плоской метрикой, а решение уравнения Лапласа (т. н. «метрический потенциал») определяет соответствующий конформный фактор.

Хорошо известно, что существуют симметричные по времени вакуумные начальные данные для двух черных дыр, описывающие гиперповерхность Коши с топологией ручки (т. е. прямое произведение 2-мерной сферы на окружность минус точка). Это так называемая кротовая нора Мизнера [70]. Такая кротовая нора очевидно не проходима, т. к. вакуумные уравнения Эйнштейна не нарушают энергетические условия.

Оказывается, что решение аналогичное кротовой норе Мизнера существует, если добавить фантомное скалярное поле. Соответствующее решение уравнения Лапласа является комплексным 1-параметрическим расширением метрического потенциала Мизнера. Конформный фактор в метрике определяется как квадрат модуля метрического потенциала. Начальное значение скалярного поля также определяется

через метрический потенциал и является многозначной функцией (фактически это функция  $\arctan/\operatorname{arccot}$ ). Очевидно, что многозначность - это следствие многосвязности геометрии. Однако, так как скалярное поле свободное, физические величины не зависят от этой многозначности.

В случае если в модель добавить электромагнитное поле, то, применив подход описанный в [71], можно построить соответствующее решение начальных данных, используя упомянутое выше расширенное решение Мизнера в качестве «затравочного».

## 2.8 Конформно инвариантная гравитация и гравитирующие миражи

Содержательная часть работы по данной задаче начинается с построения действия для идеальной жидкости в эйлеровых переменных, модифицированного заменой условия сохранения числа частиц законом их рождения. Показывается, что функция, описывающая темп рождения (число частиц, рождаемых в единице объема в единицу времени), не может быть произвольной. Именно, если умножить ее на корень квадратный из детерминанта метрического тензора, то мы получим инвариант локального конформного преобразования. Хорошо известны две комбинации с таким свойством - это квадрат тензора Вейля (геометрическая часть) и, так называемое, конформное скалярное поле, где есть даламбертиан скалярного поля, которое и является в нашей модели источником рождения частиц, взаимодействия скалярного поля со скаляром кривизны пространства-времени, а также член, пропорциональный четвертой степени скалярного поля, предположительно описывающий квинтэссенцию (темную энергию). Мы обнаружили, что можно еще добавить слагаемые, зависящие от плотности числа уже рожденных частиц, которые являются квантами того же скалярного поля, но не виртуальные, а на массовой оболочке. К большому удивлению, оказалось, что эти слагаемые, не будучи вовсе материей, которую можно потрогать, вносят вклад в тензор энергии-импульса и потому влияют на кривизну пространства-времени. Мы назвали их «гравитирующими миражами». Важно отметить, что наша модель позволяет учесть обратное влияние на метрику пространства-времени не только вклад от уже рожденных частиц, что вполне ожидаемо, хотя и не принципиально важно, но и влияние самого процесса рождения, т.е. чисто квантового явления, описываемого феноменологически на классическом языке. В приложении к космологии это приводит к опровержению широко известного утверждения, что в однородных и изотропных космологических моделях рождение частиц невозможно. У нас – возможно! Важно подчеркнуть, что такое однородное и изотропное рождение частиц естественным образом гораздо более интенсивное, чем



рождение из квантовых флуктуаций , из которых потом произошла вся видимая глобальная структура Вселенной. Именно это обстоятельство позволяет утверждать, что неуловимая темная метрия появится в виде гравитирующих миражей. Работа опубликована в журнале [72].

### 3 Изучение космологических решений в теории Хорндески

В работе [73] был исследован новый подход к перенормировкам в КТП, основанный на дифференциальных уравнениях типа Каллана-Симанчика. Было произведено обобщение этого подхода на класс неперенормируемых теорий с операторами размерности шесть. Данный метод был использован для вычисления двух-, четырех- и шести- точечных вершинных функций соответствующих аномальных размерностей и бета-функций, а также и поправки к эффективному потенциалу в однопетлевом приближении для конкретной выбранной неперенормируемой теории. В данном подходе к перенормировкам не возникают расходимости ни на одном из этапов вычислений.

В работе [74] в модели сжимающейся Вселенной с сильной гравитацией в прошлом, построенной в [75], была вычислена негауссовость для первичных скалярных возмущений, или, более точно – нелинейный параметр  $f_{NL}$  негауссовости, и найдены новые условия на параметры модели из соответствующих наблюдательных данных [76] и [77]. Из результатов работы [74] можно сказать, что либо модель находится на грани закрытия, либо же можно провести более аккуратный анализ формы биспектра, уточнив таким образом ограничения на параметры модели, и сделать таким образом уже конечный вывод о жизнеспособности выбранной модели ранней Вселенной.

В работе [78] была доказана запрещающая теорема для несингулярных космологических решений без сверхсветовых скоростей в квадратичной теории Хорндески с кручением. Построено всюду устойчивое отскоковое решение, но со сверхсветовыми гравитонами на некоторой стадии. В работе [79] уже в кубической теории Хорндески с кручением построено устойчивое и досветовое решение в виде космологического отскока. Таким образом, показано, что в кубическом подклассе нет запрещающей теоремы.

В работе [80] построены возмущения в теории Хорндески над космологическим анизотропным фоном. Показано, что в простейших решениях без динамических скалярных возмущений при добавлении анизотропии появляется дух. В работе [81] исследован способ разрешения связей в скалярном секторе с помощью уравнений движения в ковариантном виде. Показано, что в сферически симметричном случае он работает только в линейном подклассе теории Хорндески.

В работе [82] построена компактификация пятимерной теории Хорндески на окружность, показано, что результат является примером калибровочной теории с векторным галилеоном, а скорости фотона и гравитона совпадают в широком классе лагранжианов. В работе [83] продолжено исследование компактификации теории

Хорндески, построен скалярный сектор теории и исследованы старшие лагранжианы теории, возникающие только в пятимерии.

## 4 Проверка новых моделей с лёгкими гипотетическими частицами на установке NA64

### 4.1 Общий статус эксперимента NA64

Установка NA64 является одной из первых в ЦЕРНе по экспериментальному поиску и фундаментальным исследованиям кандидатов на темную материю из скрытого сектора материи. После первых лет успешной работы по созданию установки и проведению первых сеансов на канале H4 SPS, в научный комитет SPSC CERN было подано предложение продлить набор статистики на канале H4 и начать набор статистики на мюонном канале M2, которое было рассмотрено и одобрено как следующий этап развития программы исследований на установке NA64 в ЦЕРНе. В эксперименте NA64 принимают участие российские институты ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, НИЦ КИ ИФВЭ, ОИЯИ, ТПУ, ФИАН, а также Университет Лондонского колледжа (Великобритания), Университет Бонна Германия), Университет Гутенберга (Германия), Университет Патраса (Греция), Институт физики частиц (Испания), Национальный институт ядерной физики (Италия), Университет Генуи (Италия), Университет Йорка (Канада), Технический университет Федерико (Чили), Университет Андреса Белло (Чили), Университет Ла Серена (Чили), Институт САФИР Миллениум (Чили), Институт физики частиц и астрофизики (Швейцария) и ЦЕРН. Участники эксперимента NA64 предложили ЦЕРН программу исследований по новой физике на период 2024-25 гг. Эти исследования и их мотивация были обсуждены в комитете SPSC CERN. Программа исследований была рекомендована и одобрена комитетами SPSC и Research Board CERN на своих заседаниях с последующим ежеквартальным контролем со стороны официальных рецензентов проекта в ЦЕРН. Ожидаемая чувствительность установки NA64 в 2025 г. составит величину примерно вдвое выше, чем ныне достигнутая. Дальнейшие планы следующего этапа эксперимента в 2025 г. и далее после долгосрочной остановки ускорителя LS3 включают также подготовку и проведение измерений по поиску невидимых распадов фотонов скрытого сектора на пару частиц темной материи; видимых распадов фотонов скрытого сектора на пары  $e^+e^-$  с последующей их регистрацией в детекторе NA64; аксионоподобных и скалярных частиц и ряд других процессов.

### 4.2 Проведение сеансов набора данных на установке NA64

Руководство ЦЕРН в 2021 году выделило для эксперимента NA64 две площадки в Северной зоне (NA) ускорителя SPS. Одна площадка была выделена для проведения измерений на электронном пучке (канал H4, установка NA64e), а другая - под измерения и поиски на мюонном пучке (канал M2, установка NA64 $\mu$ ). На этих

пучках, начиная с 2022 г., были успешно проведены тесты отдельных детекторов и модернизированных установок NA64e и NA64 $\mu$  в целом и затем начаты первые измерения по поиску новых частиц, включая частицы темной материи и медиаторы взаимодействий скрытого сектора как для видимой, так и для невидимой моды их распадов, а также других процессов, в которых могла бы проявиться физика вне Стандартной модели на новом уровне чувствительности.

#### 4.2.1 Установка NA64e и результаты сеанса на канале H4

В 2024 году был проведен восьминедельный сеанс набора данных на установке NA64e на электронном пучке канала H4 ускорителя SPS CERN. Схема установки, которая в основном была такой же, как и в сеансе набора 2023 года, показана на рисунке 4.1. В течение восьминедельного сеанса на электронном пучке канала H4 были выполнены следующие работы:

- сборка и запуск модифицированной установки NA64e на площадке канала H4;
- запуск и сертификация электронного пучка и сравнение его измеренных характеристик с расчетными;
- изучение и настройка уровня триггера полезных событий;
- тестирование электроники калориметров и нового детектора SRD;
- тестирование новых модулей электроники считывания и сбора данных;
- настройка и калибровка детекторов, набор данных.

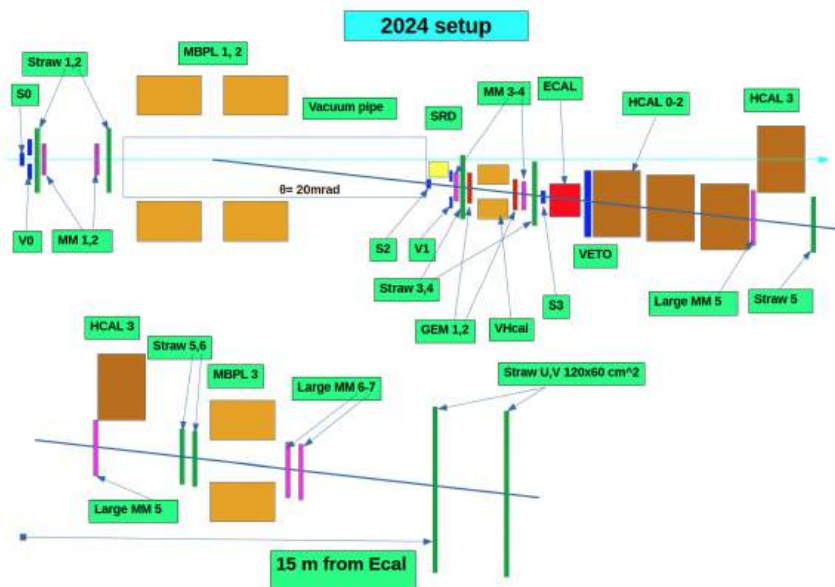


Рисунок 4.1 — Схема установки NA64e в зоне канала H4 во время сеанса 2024 года

Активной мишенью установки NA64e является электромагнитный калориметр (ECAL). Калориметр представляет собой матрицу размером  $6 \times 6$  независимых счет-

чиков, каждый из которых состоит из 150 чередующихся пластин свинца толщиной 1,5 мм и пластикового сцинтиллятора толщиной 1,5 мм и имеет полную длину около  $40 X_0$  (радиационных длин). Детектор также разделен на предливневую часть длиной  $4 X_0$  и основную часть, поглотитель, толщиной  $36 X_0$ . На установке NA64е можно выделить два типа фона для событий с недостающей энергией. Первый из них связан с генерацией первичным пучком одной или нескольких проникающих частиц в электромагнитном калориметре. Для подавления вклада таких частиц за электромагнитным калориметром установлен массивный адронный калориметр (HCAL). Между калориметрами ECAL и HCAL размещается высокоэффективный детектор из пластического сцинтиллятора (VETO) для идентификации событий с такими проникающими заряженными частицами. Другой источник фона аналогичного происхождения связан с электророждением адронов на веществе самого канала. Для подавления этого фона перед мишенью был установлен новый адронный вето-калориметр VHCAL. Второй тип фоновых событий связан с наличием остаточных (порядка 1%) примесей адронов в первичном пучке. Чтобы подавить этот фон, до электромагнитного калориметра установлена система мечения электронов пучка на основе регистрации их синхротронного излучения (SRD) [84]. Установка NA64е также включает в себя магнитный спектрометр для измерения импульса частиц. Он состоит из двух последовательных дипольных магнитов и набора трековых детекторов – типа «micromegas» (MM), «straw tubes» (ST) и газовых электронных умножителей (GEM). Кроме того, имеется набор счетчиков на основе пластикового сцинтиллятора для регистрации пучка. Во время работы установки большинство первичных электронов порождают в калориметре ECAL электромагнитный ливень, вся энергия которого регистрируется установкой. Для снижения скорости счёта рожденных событий, записываемых на диск, используется триггер – совпадение сигналов от сцинтилляционных счетчиков (SC) и калориметра ECAL на запись событий с энерговыделением в электромагнитном калориметре, не превышающим установленный порог.

Расширение научной программы NA64 за счет включения в нее впервые представленных в техническом докладе [85] измерений на позитронном пучке при более низких энергиях требует модернизации существующего детектора синхротронного излучения SRD. Моделирование методом Монте-Карло показывает, что из-за зависимости энергии синхротронного излучения от четвертой степени энергии падающих электронов нынешняя конструкция детектора приводит к значительному снижению эффективности их детектирования при энергиях пучка ниже 70 ГэВ. Предварительные исследования показали, что полностью однородный детектор, изготовленный из кристаллов LYSO, может достичь эффективности регистрации примерно 85% даже при энергии пучка около 40 ГэВ - самого низкого значения, которое рассматривалось

для программы измерений. Для подтверждения результатов предварительных исследований был разработан прототип детектора LYSO SRD, который был протестирован в 2024 году во время сеанса на позитронном пучке с энергией 70 ГэВ. Детектор состоит из шести независимых модулей, каждый из которых собран в виде матрицы  $8 \times 12$  из кристаллов LYSO размером  $4 \times 4 \times 45$  мм<sup>3</sup>. Для каждого модуля сцинтилляционный свет от кристаллов считывается с помощью фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R7600U, соединенного с ними акриловым световодом. Для увеличения светосбора каждый кристалл по отдельности обернут в тонкую светоотражающую пленку. Каждая матрица была помещена в алюминиевый кожух для обеспечения светоизоляции (рисунок 4.2, слева). Аналоговые сигналы от ФЭУ были подключены к суммирующей плате. Шесть модулей были установлены на пучке H4 вместо текущего детектора SRD, как показано на рисунке 4.2 справа. В ходе испытаний также была проверена эффективность включения сигнала детектора LYSO в систему запуска. Соответствующая эффективность, оцененная в режиме онлайн по частоте измеренных событий, составила более 92% для интенсивности пучка до  $7 \times 10^6$  частиц/сброс при пороговом значении энергии примерно 1,5 МэВ.

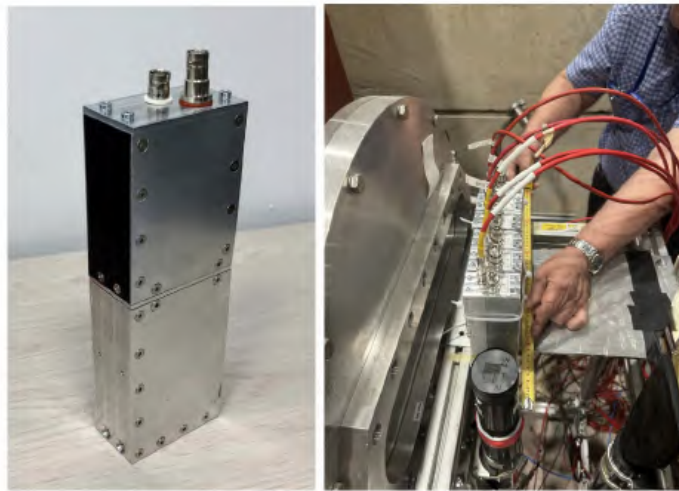


Рисунок 4.2 — Модуль LYSO (слева) и шесть модулей на пучке H4 (справа)

Чтобы улучшить характеристики электромагнитного калориметра с точки зрения уменьшения накопления вторичных частиц и улучшения разрешения ECAL, был разработан новый цифровой преобразователь Waveboard (WB) для считывания сигналов с ФЭУ. Для интеграции устройства в основную систему сбора и обработки данных было разработано новое специализированное микропрограммное обеспечение с использованием протокола UCF (Unified Communication Framework) и введены в эксплуатацию соответствующие блоки Waveboard (рисунок 4.3). Тесты, проведенные в сеансе, продемонстрировали очень хорошие характеристики новой платы сбора

данных Waveboard. В рамках подготовки к сеансам на электронном пучке в следующем году планируется заменить все платы MSADC для детекторов на базе ФЭУ на новые устройства Waveboard.

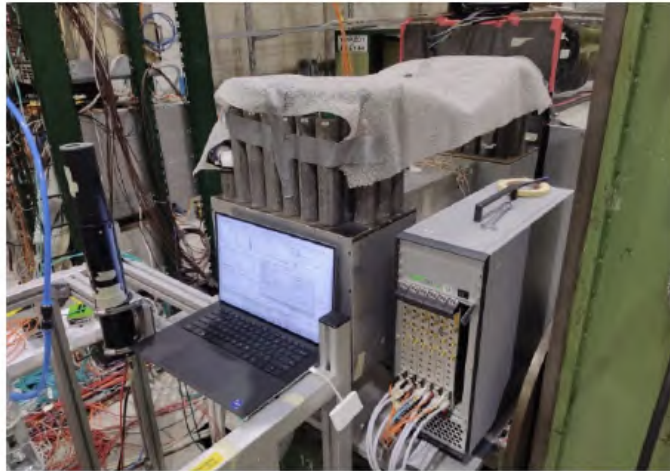


Рисунок 4.3 — Пять блоков Waveboard, установленных в крейте мини-VME

В результате проведенного на канале Н4 в течение мая – июня 2024 г. сеанса было набрано около  $5,2 \times 10^{11}$  электронов на мишени (рисунок 4.4). Предварительные результаты анализа данных свидетельствуют об их хорошем качестве и отсутствии фона. Это позволяет планировать последующие новые поиски с набором существенно большего объема данных, превышающего  $10^{12}$  электронов на мишени, с целью проникнуть глубже в неисследованную область параметров моделей легкой темной материи.

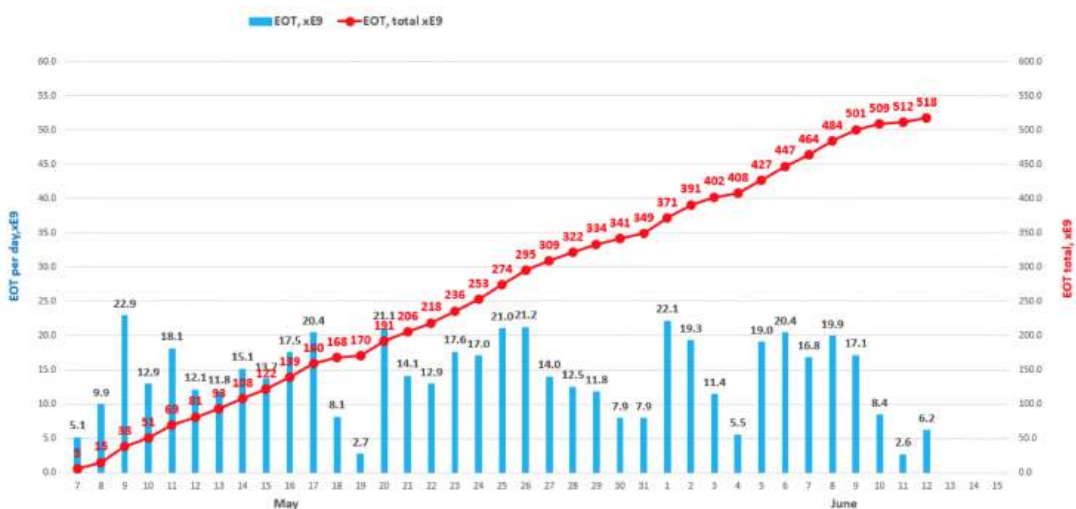


Рисунок 4.4 — Набор данных на установке NA64e в ходе сеанса 2024 года



#### 4.2.2 Установка NA64 $\mu$ и набор данных в сеансе на канале M2

В июле-сентябре 2024 года участники эксперимента NA64 в рамках общей исследовательской программы эксперимента успешно провели семинедельный сеанс на мюонном канале M2 ускорителя SPS на установке NA64 $\mu$ . Проведение эксперимента на мюонном пучке было поддержано комитетом SPSC. Целью эксперимента являлось тестирование а) оставшейся области параметров для объяснения магнитной аномалии мюона  $(g - 2)_\mu$  в терминах бозона  $Z'(L_\mu - L_\tau)$  и б) перспективной области параметров легкой темной материи. С суммарной статистикой порядка  $3 \times 10^{11}$  М $\mu$ T (мюонов на мишени) установка NA64 $\mu$  чувствительна к темным фотонам в области больших масс, недостижимых для установки NA64e, таким образом дополняя её возможности. Схема установки NA64 $\mu$ , собранной в июле 2024 г. в зоне мюонного канала M2 ускорителя SPS CERN (показана на рисунке 4.5), в основном повторяет установку, работавшую на канале M2 в 2023 году. Основные изменения заключались в добавлении двух трековых камер (восемь вместо шести) в спектрометрах MS1 и MS2, а также трех детекторов “micromegas” и пяти камер “straw-tubes”, двух размером  $20 \times 20$  см<sup>2</sup> и трех – размером  $120 \times 60$  см<sup>2</sup>. Новые детекторы были смонтированы в ходе сеанса, проведена их настройка и калибровка.

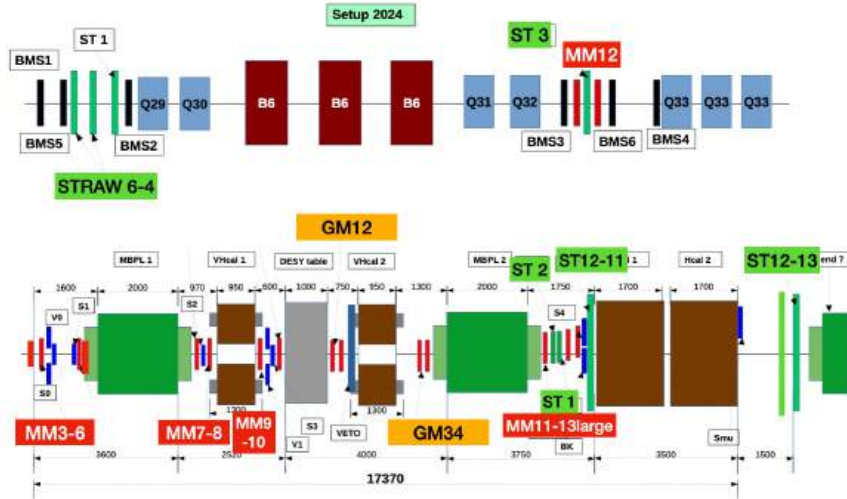


Рисунок 4.5 — Схема установки NA64 $\mu$  для сеанса 2024 года

На установке NA64 $\mu$  в ходе сеанса на пучке M2 были проведены следующие работы:

- установка и запуск детекторов на мюонном пучке;

- увеличение числа трековых камер в спектрометре MS1 и модернизация спектрометра MS2;
- запуск и сертификация мюонного пучка M2, сравнение его измеренных характеристик с расчетными;
- изучение уровня триггера полезных событий;
- оценка уровня герметичности детектора и его чувствительности к сигналу.
- наладка и калибровка, набор данных.

После наладки и калибровки был проведен набор данных с рабочими триггерами, зарегистрировано около  $1,1 \times 10^{12}$  мюонов на мишени с целью продолжить исследование области параметров  $Z'$ , объясняющей  $(g-2)_\mu$ -аномалию (показана на рисунке 4.6 как область, ограниченная двумя кривыми зеленого цвета). Планируемая чувствительность эксперимента также показана на рисунке 4.6 (пунктирные кривые серого цвета).

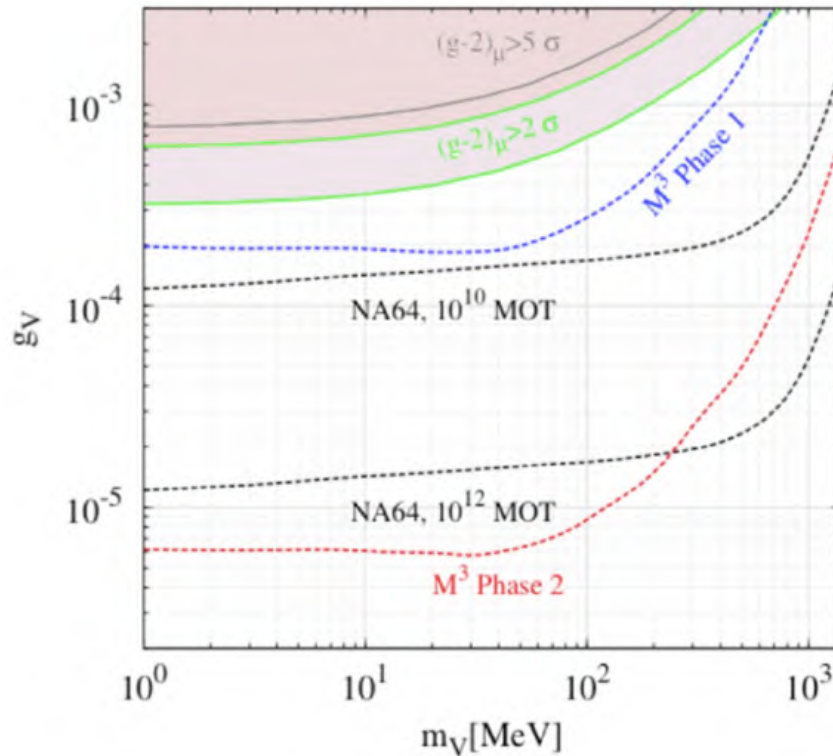


Рисунок 4.6 — Область параметров  $Z'$ , объясняющая  $(g-2)_\mu$ -аномалию, и планируемая чувствительность эксперимента NA64 $\mu$

### 4.3 Поиск скрытого сектора материи в эксперименте NA64

В эксперименте NA64 $\mu$ , в котором используется новый метод определения недостающей энергии-импульса для поиска калибровочных бозонов с энергией ни-

же гигаэлектронвольта, связанных с мюонами [86], был предпринят поиск скрытого сектора. Скрытый сектор (СС) является многообещающей парадигмой для решения открытых вопросов Стандартной модели (СМ), таких как происхождение темной материи (ТМ) [87]. Если предположить, что ТМ состоит из самых легких стабильных частиц СС, то возникающее в результате слабое взаимодействие между двумя секторами может быть совместимо с космологическими наблюдениями и, таким образом, позволило бы решить проблему ТМ [88], [89], [90], [76]. Модели СС стали чрезвычайно плодотворной областью исследований благодаря множеству различных методов, охватывающих очень большое пространство параметров возможных кандидатов на ТМ [91], [5], [92], [93]. Исходя из широкого спектра СС, многие сценарии предполагают новые слабые взаимодействия с мюонами через скалярные, псевдоскалярные, векторные или тензорные частицы [94, 95, 96, 97, 98, 99]. Новый слабозаимодействующий медиатор,  $X$ , может быть получен в реакции тормозного излучения мюонов с энергией 160 ГэВ/с на ядерной мишени  $N$  с последующим его распадом на невидимые частицы:  $\mu N \rightarrow \mu N X; X \rightarrow invisible$  (см. рисунок 4.7).

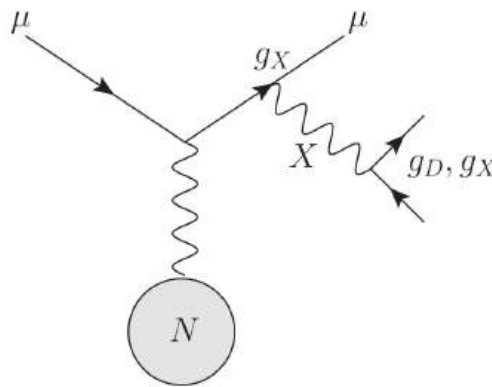


Рисунок 4.7 — Рождение  $X$ -бозона с его последующим распадом в невидимой моде

В эксперименте  $NA64\mu$  был выполнен первый поиск скрытого сектора материи с использованием высокоэнергетического мюонного пучка и метода определения недостающей энергии-импульса. Мюоны из пучка M2 суперпротонного синхротрона ЦЕРН с импульсом 160 ГэВ/с направлялись на активную мишень. Характеристика сигнального события состоит из одиночного рассеянного мюона с импульсом меньше 80 ГэВ/с в конечном состоянии, сопровождающегося отсутствием выделенной энергии в детекторе. Для полного набора данных, соответствующего  $(1,98 \pm 0,02) \times 10^{10}$  мюонов на мишени, в области ожидаемого сигнала не наблюдается событий. Это позволило установить новые ограничения на оставшееся пространство параметров  $(m_{Z'}, g_{Z'})$  – массы и константы связи нового векторного бозона  $Z'(L_\mu - L_\tau)$  с мюоном, которые могли бы объяснить  $(g - 2)_\mu$ -аномалию магнитного момента мюона (рису-

нок 4.8). Кроме того, исключена часть области параметров модели, объясняющей наблюдаемую плотность реликтовой темной материи.

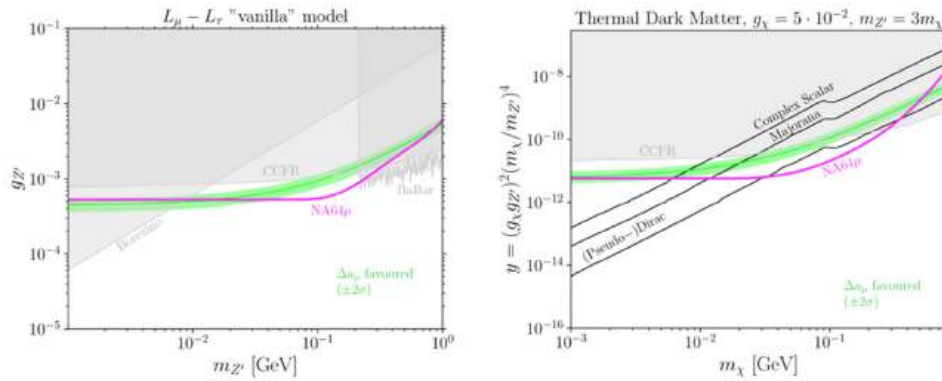


Рисунок 4.8 — Пределы для константы связи  $g_{Z'}$  на д.у. 90% в зависимости от массы  $Z'$ ,  $m_{Z'}$ , для «ванильной» модели  $L_\mu - L_\tau$  (также показана полоса  $\pm 2\sigma$  для вклада  $Z'$  в расхождение  $(g - 2)_\mu$ ) (слева) и пределы исключения на д.у. 90%, полученные в эксперименте NA64 $\mu$  в пространстве параметров  $(m_\chi, y)$  для тепловой темной материи в модели  $U(1)(L_\mu - L_\tau)$  с  $m_{Z'} = 3m_\chi$  и связью  $g_\chi = 5 \times 10^{-2}$  для  $2 \times 10^{10}$  мюонов на мишени.

Распады нейтральных псевдоскалярных мезонов ( $M^0$ ), таких как  $\pi^0, \eta, \eta', K_S^0, K_L^0$ , предоставляют уникальную возможность исследовать новую физику за пределами Стандартной модели [100]. Наблюдение распада  $M^0 \rightarrow invisible$  недвусмысленно свидетельствовало бы о появлении новой физики.

В эксперименте NA64h на ускорителе SPS в ЦЕРНе были получены первые результаты проверки концепции поиска скрытого сектора частиц с помощью невидимых распадов псевдоскалярных  $\eta$  и  $\eta'$ -мезонов. Применяемый метод, предложенный сотрудниками ИЯИ РАН [101], использует зарядово-обменную реакцию при рассеянии пионов с энергией 50 ГэВ на ядрах активной мишени в качестве источника нейтральных мезонов  $\pi^0 + A(Z) \rightarrow \eta^{(\prime)} + n + A(Z - 1); \eta^{(\prime)} \rightarrow invisible$  (рисунок 4.9).

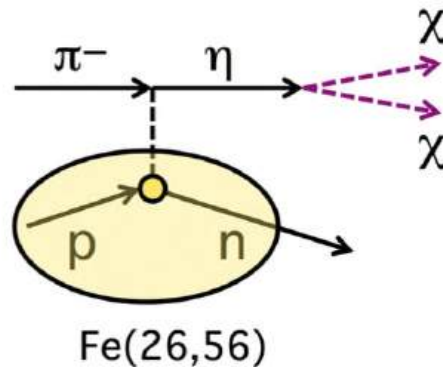


Рисунок 4.9 — Рождение  $\eta^{(\prime)}$  в зарядово-обменной реакции при рассеянии пионов на ядрах активной мишени

События реакции  $\eta^{(\prime)} \rightarrow \text{invisible}$  могли бы проявляться в виде необычной характеристики — полного исчезновения энергии входящего пучка в детекторе за счет ее уноса новыми частицами. Однако при анализе  $2,9 \times 10^9$  пионов на мишени никаких свидетельств таких событий обнаружено не было, что позволило установить строгое ограничение на относительную долю такого распада для  $\eta'$ -мезона  $Br(\eta' \rightarrow \text{invisible}) < 2,1 \times 10^{-4}$ , улучшив существующую границу примерно в 3 раза. Также установлено ограничение на  $Br(\eta \rightarrow \text{invisible}) < 1,1 \times 10^{-4}$ , сравнимое с существующим.

Полученные результаты по поиску скрытого сектора материи опубликованы в журнале *Physical Review Letters* (статьи [102] и [103]). Результаты эксперимента NA64 уникальны и обозначают передовой рубеж современной науки на мировом уровне.

## 5 Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика

### 5.1 Описание методики

Данная работа имеет целью поиск наблюдательных эффектов от скрытых фотонов в качестве холодной темной материи. Скрытый фотон, то есть Спин-1 бозон, обладающий массой, своего рода двойник обычного фотона, был предложен еще в 1980-х гг. [104], [105], [106] как расширение электродинамики. Привлекательность этой идеи заключается в том, что в силу предполагаемого кинетического смешивания скрытый фотон может превращаться в обычный фотон с энергией, равной массе скрытого фотона. Константа  $\chi$  кинетического смешивания, определяющая вероятность этого процесса, наряду с новым постулируемым полем  $A'$  и массой скрытого фотона  $m_{\gamma'}$  входит в соответствующий Лагранжиан:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}A'_\mu A'^\mu \quad (5.1)$$

где  $F_{\mu\nu}$  и  $F'_{\mu\nu}$  – соответствующие тензоры напряженности поля,  $A_\mu$  и  $A'_\mu$  – поля фотона и скрытого фотона.

Возможной природе скрытого фотона посвящено много теоретических изысканий. В работах [107] и [108] получены решения для скрытых фотонов в виде трубок с электрическим и/или магнитным полем, удовлетворяющим уравнению Прока. Таким образом, современная теория предлагает нам несколько модификаций скрытых фотонов с различными конфигурациями полей. В настоящее время в ряде экспериментов, где мишенью являются валентные электроны атомов, получены верхние пределы на константу кинетического смешивания [109], [110], [111]. Мы разработали детектор, где мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла. Ввиду того что мы пока не имеем надежной теории скрытого фотона, физика процессов с участием скрытых фотонов на этих мишенях может существенно отличаться. Поэтому эти эксперименты в настоящее время являются взаимно дополняющими. Подробное описание методики было приведено нами в [112], здесь мы остановимся на основных моментах. В качестве детектора темных фотонов мы предлагаем использовать пропорциональный счетчик с достаточно большой поверхностью катода с высоким коэффициентом газового усиления. С помощью такого счетчика мы можем измерять скорость счета одиночных электронов при конверсии темных фотонов на поверхности катода, сопровождающейся эмиссией электрона. Мощность, поглощаемая катодом мультикатодного счетчика, в этом случае может быть описана выражением (здесь было принято  $c = 1$ )

$$P = 2\alpha^2\chi^2\rho_{CDM}A_{cath} \quad (5.2)$$

где  $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle$  – среднее по всей поверхности катода значение  $\cos^2 \theta$ ,  $\theta$  – угол между вектором электрического поля темных фотонов и нормалью к поверхности катода,  $\rho_{CDM}$  – плотность энергии темной материи, которая здесь была принята равной  $(0,55 \pm 0,12)$  ГэВ/см<sup>3</sup> [9],  $A_{cath}$  – площадь поверхности катода. Как видно из этого выражения, мощность максимальна, когда вектор электрического поля скрытого фотона перпендикулярен поверхности катода, и равна нулю, когда вектор лежит вдоль оси цилиндрического катода. Часть этой мощности выделяется в виде одиночных электронов, эмитируемых с поверхности катода, при этом скорость эмиссии одиночных электронов находится из выражения

$$P = m_{\gamma'} \cdot R_{MCC} / \eta \quad (5.3)$$

где  $R_{MCC}$  – скорость эмиссии одиночных электронов,  $\eta$  – выход одиночных электронов на один фотон, который здесь принят равным выходу для реального фотона с энергией, равной массе скрытого фотона. Объединяя (5.2) и (5.3), получим выражение для чувствительности этого метода:

$$\chi_{sens} = 2,1 \cdot 10^{-12} \left( \frac{R_{MCC}}{\eta \cdot 1Hz} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{m_{\gamma'}}{1eV} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{0,55 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{CDM}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1m^2}{A_{MCC}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right) \quad (5.4)$$

Здесь предполагается, что вся плотность энергии темной материи обязана темным фотонам, а величина в числителе в последних скобках соответствует изотропному случаю для вектора электрического поля темных фотонов. На рисунке 5.1 представлены кривые выхода фотоэлектронов на один фотон по результатам работы [113], откуда видно, что этот метод обладает наивысшей чувствительностью в области примерно от 10 до 50 эВ. Этому диапазону массы скрытого фотона соответствует плотность темных фотонов от 10 до 50 миллионов в одном куб. см, если темная материя состоит только из темных фотонов. Для сравнения: плотность реликтовых нейтрино не превышает 150 в одном куб. см. и плотность реликтовых фотонов составляет примерно 500 в одном куб. см. На рисунке также видно, что наиболее перспективным материалом для катода счетчика является алюминий, поскольку для него наблюдается высокий выход фотоэлектронов.

На рисунке 5.2 приведена упрощенная схема детектора, который для защиты от окружающего гамма-излучения помещен в стальной бокс с толщиной стенки 300 мм.

Для защиты от тепловых нейтронов внутри стальной защиты поместили слой борированного полиэтилена. При такой защите основным каналом фона детектора

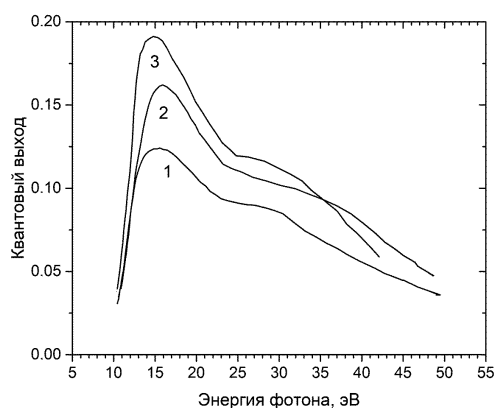


Рисунок 5.1 — Выход фотоэлектронов в зависимости от энергии фотона для разных металлов: сплав Cu (1), Zn (2) и Al + 4%Mg (3)

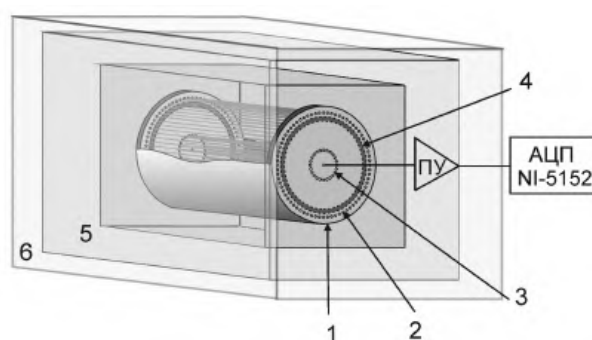


Рисунок 5.2 — Упрощенная схема мультикатодного счетчика: 1 — первый катод, 2 — второй катод, 3 — катод центрального счетчика, 4 — охранный электрод, 5 — защита из борированного полиэтилена, 6 — стальная защита

являются треки ионизирующих частиц на краях счетчика, которые имитируют одиночные электроны. Для вычитания этого фона нами была разработана специальная конструкция счетчика с тремя катодами — мультикатодный счетчик. Первый, наружный, катод из металла является мишенью для темных фотонов. Одиночные электроны эмитируются с внутренней поверхности этого катода в результате конверсии темных фотонов. На расстоянии 8 мм от первого катода оборудован второй катод из нихромовых нитей толщиной 50 мкм с расстоянием между нитями 5 мм. На этот катод подается поочередно потенциал выше (конфигурация 1) или ниже (конфигурация 2) потенциала на первом катоде. В первом случае электроны, эмитируемые с поверхности первого катода, свободно дрейфуют в направлении анода в центре счетчика, изготовленного из позолоченной нити из сплава вольфрам–рений толщиной 25 мкм. Во втором случае запирающий потенциал на втором катоде не позволяет электронам дрейфовать в направлении анода, отталкивая их к первому катоду. Для обеспечения высокого ( $>10^5$ ) коэффициента газового усиления вблизи анода на расстоянии 20 мм размещен третий катод также из нихромовых нитей тол-



щиной 50 мкм. В первом случае (конфигурация 1) счетчик регистрирует суммарный эффект от одиночных электронов, эмитируемых с поверхности первого катода, и фон, обусловленный треками ионизирующих частиц на торцах счетчика. Во втором случае счетчик регистрирует только фон. Для измерения скорости счета одиночных электронов нужно из первой скорости счета вычесть вторую скорость счета. В эксперименте последовательно раз за разом проводятся измерения в первой и во второй конфигурациях, а затем находится разность скоростей счета по совокупности всех проведенных измерений. Обработка данных проводится в режиме офлайн, за сутки собирается более 1 ТБ информации. Записываются в память не только значение сигнала в каждый данный момент времени, но и сами времена, что, группируя данные по соответствующим интервалам времени, позволяет получать кривые суточных вариаций скоростей счета. Для измерения эффективности счета одиночных электронов счетчик калибровался источником ультрафиолетового излучения – лампой с парами ртути. Схема облучения катода счетчика УФ-фотонами изображена на рисунке 5.3. Как видно из рисунка, катод облучался через окно в торце счетчика. Такая геометрия была выбрана, чтобы не делать отверстия в самом катоде и тем самым не привносить неоднородность в поверхность катода. Внутренняя поверхность катода была отполирована, чтобы обеспечить зеркальность.

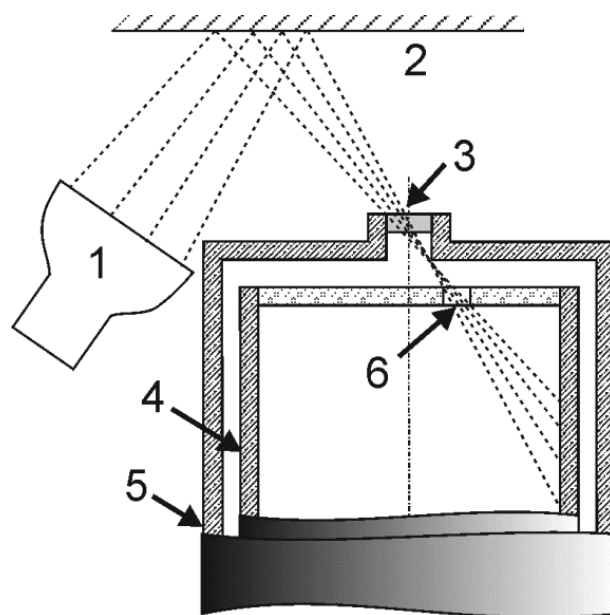


Рисунок 5.3 — Схема облучения катода счетчика ультрафиолетовым излучением при калибровке: 1 — источник УФ-излучения, 2 — алюминиевая фольга, 3 — кварцевое окно, 4 — катод, 5 — корпус детектора, 6 — калибровочное отверстие

На рисунке 5.4 показаны два импульса: один — от мюона, пролетевшего через счетчик, и второй — от одиночного электрона.

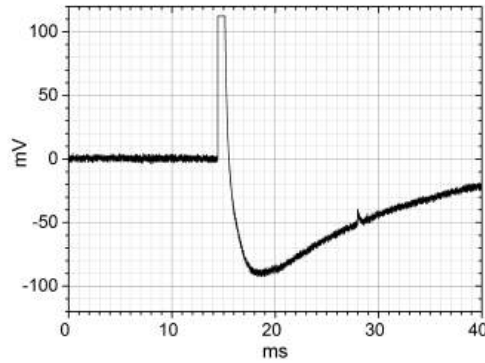


Рисунок 5.4 — Импульсы большой амплитуды от мюона (слева) и малой амплитуды от одиночного электрона (справа)

Из рисунка видно, что для надежного выделения полезных импульсов от одиночных электронов на фоне импульсов от мюонов амплитуда находится путем аппроксимации по форме импульса на восстановленной нулевой линии от импульсов большой амплитуды. Для этого необходимо в режиме реального времени постоянно отслеживать поведение нулевой линии, что приводит к большому (терабайты) объему накапливаемых данных. Измерения проводились в помещении на первом этаже в г. Троицк, Москва. Средний темп счета мюонов составил примерно 10 импульсов в секунду. После фронта каждого такого импульса устанавливалась мертвая зона протяженностью 10 мс. Таким образом, среднее мертвое время счета составляло величину 10%, не критичную для данных измерений.

На рисунке 5.5 приведен амплитудный спектр импульсов от одиночных электронов. Этот спектр хорошо согласуется с распределением Полюа, которое описывается выражением

$$P(A) = C \left( \frac{A}{\bar{A}} \right)^\theta e^{-\left(1+\theta\right) \frac{A}{\bar{A}}} \quad (5.5)$$

где  $C$  — нормировочная константа,  $A$  — амплитуда импульса,  $\bar{A}$  — средняя амплитуда импульса,  $\theta$  — параметр Полюа. При пороге 3 мВ для амплитуд импульсов менее 50 мВ эффективность счета одиночных электронов составляет примерно 60%.

На рисунке 5.6 показано, как изменение потенциала на втором катоде влияет на скорость счета одиночных электронов при калибровке счетчика. Из рисунка видно, что запирающий потенциал 30 В относительно потенциала на первом катоде надежно блокирует счет одиночных электронов в конфигурации 2.

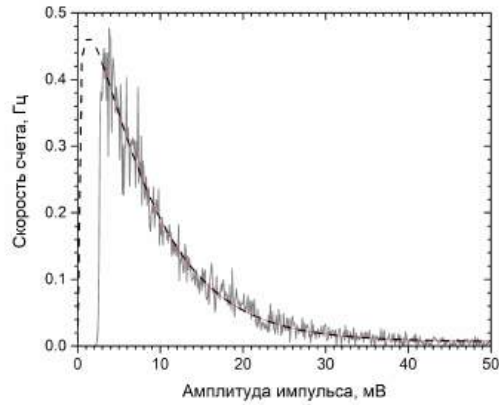


Рисунок 5.5 — Амплитудный спектр одиночных электронов и его аппроксимация по распределению Пуассона

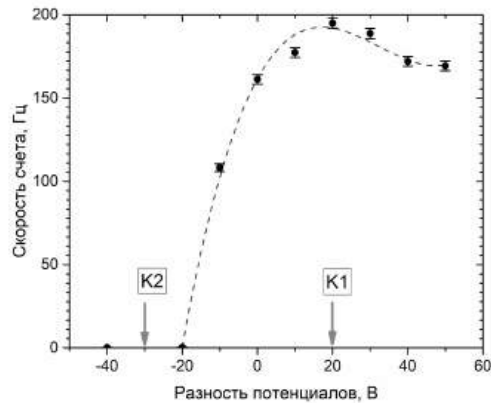


Рисунок 5.6 — Зависимость скорости счета одиночных электронов при калибровке от разности потенциалов между первым и вторым катодами. К1 и К2 — разности потенциалов для конфигураций 1 и 2

## 5.2 Результаты измерений

На рисунке 5.7 приведены экспериментальные данные, полученные после обработки в офлайн результатов измерений, за период более 100 сут. Измерения проводились на счетчике с алюминиевым катодом со смесью  $Ne + CH_4(10\%)$  при давлении 0,1 МПа. Всего было проведено 200 измерений, каждое в интервале 12 ч. Величина  $r_{MCC}$ , которую можно отнести к эффекту от скрытых фотонов, здесь находилась путем усреднения по всем точкам разности скоростей счета в конфигурации 1 и конфигурации 2. Величина  $R_{MCC}$  для подстановки в выражение (5.4) находилась как  $R_{MCC} = r_{MCC}/\varepsilon$ , где  $\varepsilon = 0,6$  — эффективность счета одиночных электронов при пороге регистрации 3 мВ с амплитудой импульса менее 50 мВ. Подставляя эту величину в выражение (5.5) мы получили верхний предел для константы кинетического смешивания  $<10^{-11}$  для массы темных фотонов в интервале от 9 до 40 эВ. Этот

результат был опубликован в [114] и включен в компиляцию данных по свойствам элементарных частиц (PDG) в [115].

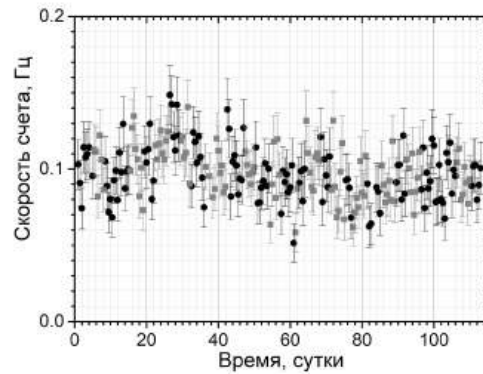


Рисунок 5.7 — Скорости счета, полученные по результатам измерений серии с 200 точками, каждая в интервале 12 ч, темные кружки — конфигурация 1, светлые квадратики — конфигурация 2

На рисунке 5.8 приведены результаты, полученные в последующих измерениях с большей статистикой: по 871 точкам каждое в интервале 12 ч ночь и день. Верхний предел на константу кинетического смешивания удалось существенно улучшить по результатам этих измерений:  $< 3 \times 10^{-12}$ , как это представлено на рисунке 5.9 [100].

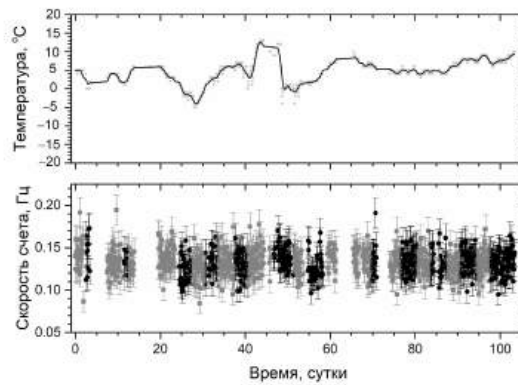


Рисунок 5.8 — Результаты измерений по 871 точкам. Вверху — температура счетчика, внизу — скорости счета (каждая точка соответствует измерению в интервале 12 ч), темные кружки — конфигурация 1, светлые квадратики — конфигурация 2

На рисунке 5.10 приведены верхние пределы на константу кинетического смешивания, полученные в разных экспериментах. Видно, что достигнут существенный прогресс при переходе от смеси  $\text{Ar} - \text{CH}_4$  (10%) к смеси  $\text{Ne} - \text{CH}_4$  (10%). Считаем важным подчеркнуть еще раз, что в нашем эксперименте мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла, в то время как в других

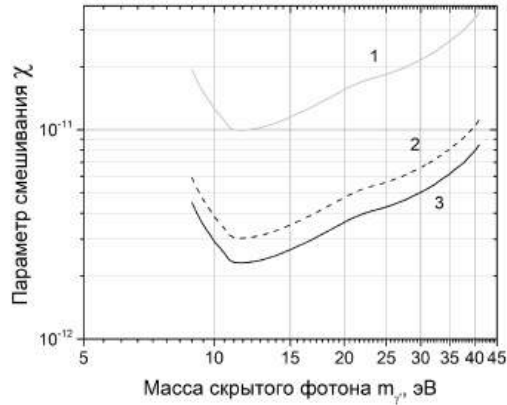


Рисунок 5.9 — Верхние пределы на константу кинетического смешивания, полученные по трем сериям измерений. 1 — счетчик со смесью Ar – CH<sub>4</sub> (10%), 2 — счетчик со смесью Ne + CH<sub>4</sub> (10%) по 200 точкам измерений, 3 — то же, но по 871 точкам измерений

экспериментах мишенью являются валентные электроны. Поскольку сегодня мы не располагаем надежной теорией скрытых фотонов, результаты измерений могут существенно зависеть от деталей, связанных с типом мишени. Поэтому в настоящее время эти эксперименты дополняют друг друга.

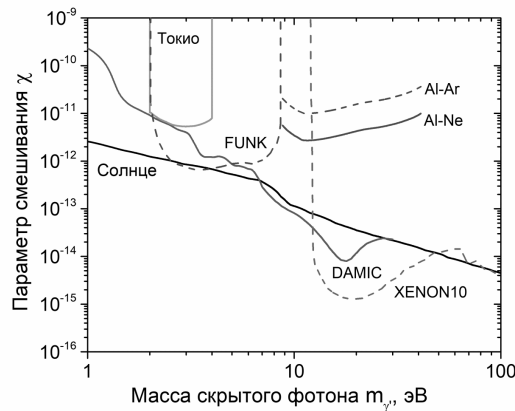


Рисунок 5.10 — Верхние пределы на константу кинетического смешивания, полученные в различных экспериментах

### 5.3 Поиск суточных вариаций скорости счета

Результаты измерений, выполненные по настоящее время, показывают, что предлагаемый нами метод работает и вполне может быть использован для поиска темных фотонов. Замечательной особенностью мультикатодного счетчика является его способность выделять направление поляризации скрытых фотонов. Как видно из выражения (5.2), если вектор электрического поля направлен вдоль оси счетчика,

ожидаемый эффект равен нулю. Если вектор направлен перпендикулярно оси счетчика, ожидаемый эффект максимален. Таким образом, если вектор электрического поля темных фотонов имеет выделенное направление в звездной системе координат, то при вращении Земли мы должны наблюдать вариации с периодом одни сутки. Поскольку темный фотон имеет массу, он представляет собой продольную моду электромагнитных колебаний в отличие от обычного безмассового фотона, который есть поперечная мода колебаний. В случае если скрытые фотоны взаимодействуют друг с другом, это может приводить к поляризации излучения, то есть к выделенному направлению вектора электрического поля. Для звездных суток период суточных вариаций составляет 23 ч 56 мин 4 с, для солнечных — 24 ч. Кривая вариаций зависит от географической широты, где расположен детектор, и от его ориентации: вертикальный, горизонтальный Восток–Запад, Север–Юг, как это показано путем расчетов в [116], [117]. Здесь важным моментом является то, что кривая суточных вариаций должна обладать симметрией относительно момента времени 12:00 звездных суток, если за 00:00 принимаем момент, когда вектор электрического поля лежит в плоскости меридиана, на котором расположен детектор. Это позволяет отбрасывать ложные любые вариации, не удовлетворяющие этому требованию. Если симметрия наблюдается только в солнечной системе координат, это является указанием на то, что темные фотоны имеют выделенное направление электрического поля в солнечной системе координат. Примечательно то, что, если реальное угловое распределение отличается от ожидаемого распределения согласно выражению (5.2), кривая суточных вариаций все равно должна обладать симметрией. Реальный вид этой кривой может быть полезной для уточнения деталей механизма конверсии темного фотона в фотоэлектроны, наблюдаемые в эксперименте. Открытие суточных вариаций в этом эксперименте стало бы доказательством, что наблюдаемый эффект действительно обязан темным фотонам [116], [117], [118]. Это является уникальной особенностью данного метода. Результат, полученный нами [119], включен в мировую компиляцию данных по свойствам элементарных частиц (Particle Data Group) [100].

В прошлом году нами были обработаны результаты измерений первой серии из четырех ранов измерений, каждый ран длительностью примерно 50 суток. В этом году были получены и обработаны данные второй серии, также из четырех ранов измерений длительностью примерно 50 суток. В каждой серии измеренные скорости счета одиночных электронов группировались в пределах каждого из 2-х часовых интервалов, соответственно, в звездной и солнечной системах координат. Для каждого временного интервала находились средние величины скоростей счета и далее строились временные распределения. На рисунке 5.11 представлены данные первой серии для звездной системы координат, на рисунке 5.12 соответственно для солнечной си-

стемы. На рисунке 5.13 представлены данные второй серии для звездной системы координат, на рисунке 5.14 соответственно для солнечной системы.

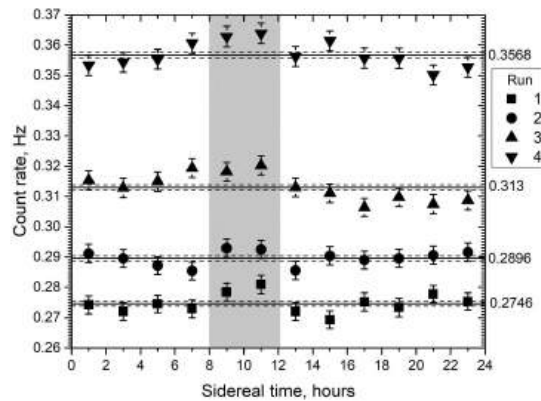


Рисунок 5.11 — Суточные вариации скорости счета одиночных электронах в четырех ранах первой серии измерений в звездной системе координат

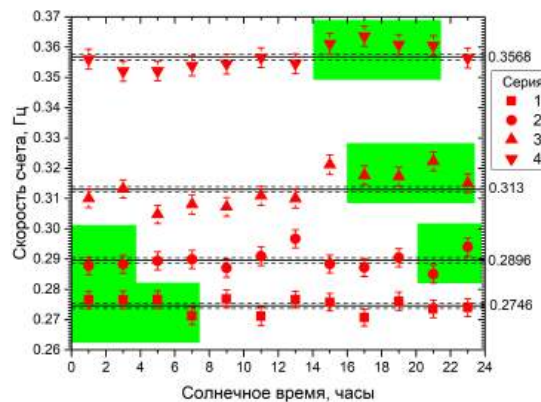


Рисунок 5.12 — Суточные вариации скорости счета одиночных электронов в четырех ранах первой серии измерений в солнечной системе координат. Зеленым цветом для каждой серии измерений обозначены временные зоны, которые дали вклад соответственно для каждой серии во временной интервал с 8–00 до 12–00 звездных суток, представленный на рисунке 5.11

Как видно из рисунка 5.11 во всех четырех ранах первой серии наблюдается систематическое превышение над средним в интервале с 8–00 до 12–00 звездных суток, в то время как в солнечной системе координат мы ничего подобного не наблюдали. Вероятность того, что это превышение над средним является результатом чисто статистической флуктуации находится из выражения

$$p = 12 \prod_{i=1}^{2n} (0,5 \operatorname{erfc}(\frac{x_i}{\sqrt{2}})), \quad (5.6)$$

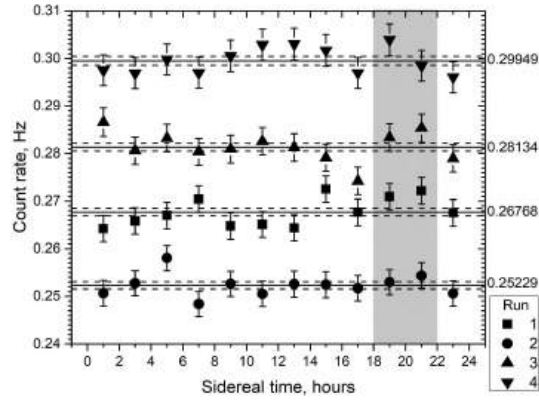


Рисунок 5.13 — Суточные вариации скорости счета одиночных электронах в четырех ранах второй серии измерений в звездной системе координат

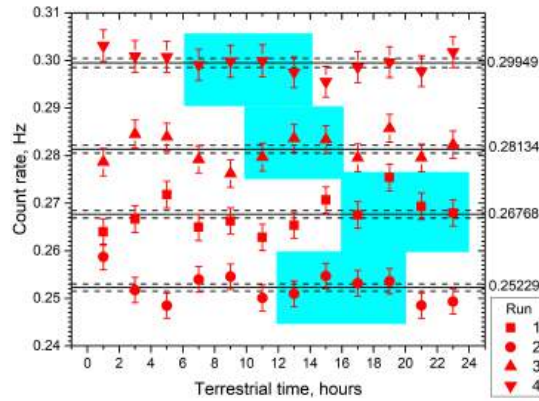


Рисунок 5.14 — Суточные вариации скорости счета одиночных электронов в четырех ранах второй серии измерений в солнечной системе координат. Голубым цветом для каждой серии измерений обозначены временные зоны, которые дали вклад соответственно для каждой серии во временной интервал с 18–00 до 22–00 звездных суток, представленный на рисунке 5.13

где  $n$  – количество серий,  $x_i$  – отклонение от среднего в единицах стандартного отклонения в каждом из интервалов с 8–00 до 10–00 и с 10–00 до 12–00 в каждой из четырех серий измерений. Из этого выражения получаем, что для первой серии измерений вероятность  $p = 7,6 \times 10^{-10}$ , что соответствует достоверности более  $6 \sigma$ . Для второй серии измерений  $p = 9,1 \times 10^{-6}$ , что соответствует достоверности более  $4 \sigma$ . Наблюдаемое превышение над средним в звездной системе координат и его отсутствие в солнечной системе координат может рассматриваться как аргумент в пользу того, что мы наблюдаем эффект от скрытых фотонов. Для получения доказательной базы необходимо получить подтверждение, что этот эффект воспроизводится в последующих измерениях либо в независимом эксперименте. С этой целью в теку-



щем году мы подготовили к работе второй мультикатодный счетчик с алюминиевым катодом и подключили его к измерениям. Одновременное наблюдение эффекта в обоих счетчика значительно усилит аргументацию в пользу существования темных фотонов.

## 6 Определение параметров осцилляций и иерархии масс нейтрино в эксперименте T2K

### 6.1 Работы по обновлению установки международного нейтринного эксперимента T2K и набору данных в 2024 году

В 2024 г. сотрудниками ИЯИ РАН были продолжены работы в рамках международного нейтринного осцилляционного эксперимента T2K (Tokai-to-Kamioka), основной целью которого является определение параметров осцилляций (углов смешивания, разности квадратов масс и CP-нарушающей фазы) и иерархии масс нейтрино [120].

В этом эксперименте, который начал набор статистики в 2010 г. и по плану будет работать до 2027 г., потоки нейтрино или антинейтрино формируются в специальном канале Японского исследовательского протонного ускорительного комплекса (J-PARC) в г. Токай, Япония, и регистрируются с помощью системы ближних детекторов ND280 на расстоянии 280 м от графитовой мишени (*до осцилляций*), а также с помощью дальнего детектора Супер-Камиоканде (SK), расположенного в 295 км к западу от Токая (*после осцилляций*).

Для уменьшения систематических погрешностей измеряемых параметров осцилляций нейтрино в 2022-2024 гг. в ближнем детекторе ND280 была проведена масштабная модернизация, в ходе которой  $\pi^0$ -детектор был заменен на новую систему, состоящую из активной мишени SFGD (2 миллиона сцинтилляционных кубиков с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон), двух время-проекционных камер НТПС (снизу и сверху относительно SFGD) для регистрации треков заряженных частиц, вылетающих из SFGD, а также времяпролетных панелей ТоF, окружающих SFGD+2НТПС со всех шести сторон и служащих для подавления фоновых событий. В мае 2024 г. были протестированы на поверхности и установлены в ND280 недостающие элементы: (верхняя) камера НТПС, две панели (боковая и верхняя) ТоF, а также модули электроники (см. рисунок 6.1).

Всего с начала 2010 г. по конец 2024 г. в T2K проведено 14 сеансов с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино (с небольшой примесью электронных нейтрино). Последние сеансы по набору статистики проходили в ноябре-декабре 2023 г., феврале и мае-июне 2024 г. (сеанс №13), а также в ноябре-декабре 2024 г. (№14 - будет продолжен в 2025 г.). С 23.01.2010 г. по 28.06.2024 г. набрано  $\sim 4,35 \times 10^{21}$  РОТ (протонов на мишени): 62,06 % в нейтринной моде и 37,94% в антинейтринной. Ожидается, что в ноябре-декабре 2024 г. (в сеансе №14) добавится объем данных, соответствующих  $\sim 2 \div 3 \times 10^{20}$  РОТ (примерно поровну в каждой моде).



Рисунок 6.1 — Обновленный ближний детектор ND280 после установки активного нейтринного детектора SFGD, двух горизонтальных времяпроекционных камер НТРС, пяти панелей времяпролетного детектора ТоF, а также калибровочных систем, электроники и кабелей в магните ND280 (перед установкой шестой панели ТоF и закрытием всей системы)

В июне 2024 г. (сеанс №13) на главном кольце (MR) ускорителя J-PARC впервые достигнута мощность пучка  $\sim 800$  кВт (в стабильном режиме), что позволило значительно увеличить интенсивность протонов на мишени и, соответственно, поток нейтрино в ближнем и дальнем детекторах (в декабре 2023 г. был поставлен предыдущий рекорд по мощности пучка - 750 кВт.). Кроме того, с декабря 2023 г. импульсный ток в трех электромагнитах нейтринного канала (horns) поддерживается на уровне 320 кА, что позволяет сильнее сфокусировать пучки мезонов из мишени, в результате распадов которых образуются нейтрино. Таким образом, в сеансах №№13-14 эксперимент набирал данные в условиях высокой интенсивности потока нейтрино в единицу времени, а также более высокой пространственной плотности пучка, что, в свою очередь, повышает вероятность наблюдения взаимодействий нейтрино в ближнем и дальнем детекторах.

Важно отметить, что во время набора данных в мае-июне 2024 г. впервые работала вся обновленная детекторная система ND280, включая SFGD, НТРС и ТоF, так что это было и тестом всего модернизированного детектора, а также системы набора данных. Одно из реальных событий, в котором нейтрино провзаимодейство-

вало в SFGD, и многочисленные треки разошлись по другим смежным детекторам, показано на рисунке 6.2.

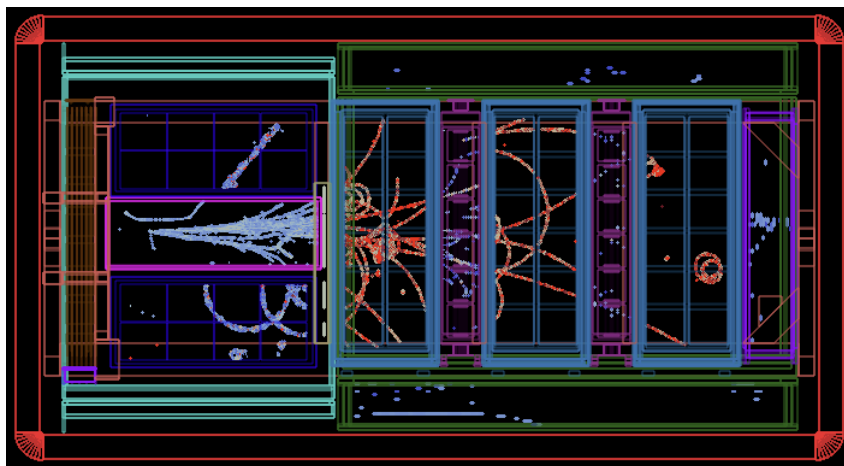


Рисунок 6.2 — Событие нейтринного взаимодействия в обновленном ближнем детекторе ND280, полученное с помощью онлайн монитора в ходе сеанса №13 в июне 2024 г.

После монтажа обновленной системы ND280 на пучке T2K сотрудники ИЯИ РАН принимали непосредственное участие в работе с детектором SFGD на всех последующих этапах: в разработке, отладке и использовании программного обеспечения для распаковки, мониторинга данных SFGD, для калибровки детектора с помощью LED и космических лучей [121], а также в общих и экспертных сменах ND280 и анализе полученных данных.

## 6.2 Анализ данных и получение осцилляционных параметров нейтрино в эксперименте T2K в 2024 году

В 2024 г. в эксперименте T2K была проведена обработка экспериментальных данных, набранных в сеансах с 1-го по 11-й, на основе обновленного анализа, в котором значительно улучшены систематические погрешности дальнего детектора SK, в частности, систематические ошибки для событий  $CC1\pi$  с одним черенковским кольцом электронного типа (1Re) и дополнительным черенковским кольцом (задержанным по времени относительно первого) из распада заряженного пиона уменьшены с 14,3% до 6,3%. В сеансе №11 концентрация солей гадолиния в воде дальнего детектора SK была увеличена до 0,03%, что повышает эффективность захвата нейтронов при регистрации электронных антинейтрино до 75% и тем самым улучшает чувствительность SK к антинейтринным событиям.

Обновленный анализ данных из сеансов №№1-11 показывает стабильность полученных значений осцилляционных параметров: по-прежнему наиболее вероятное значение фазы  $\delta_{CP}$  соответствует максимально нарушающей величине ( $-\pi/2$ ), а CP-

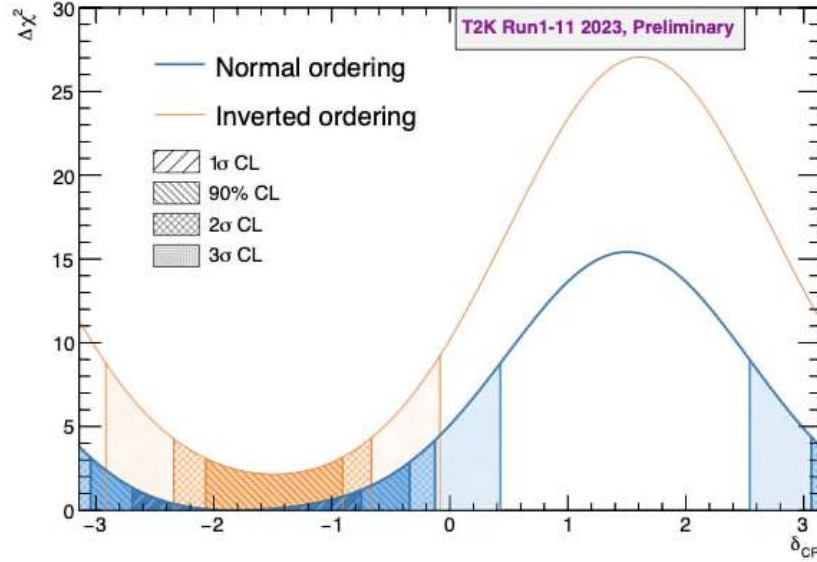


Рисунок 6.3 — Доверительные интервалы величины  $\delta_{CP}$ , полученной в результате анализа данных сеансов 1 ÷ 11 (голубая линия для нормальной, а оранжевая - для обратной иерархии масс)

сохранение ( $\delta_{CP} = 0, \pm\pi$ ) исключается на уровне достоверности 90% (рисунок 6.3). Также результаты анализа дают небольшое предпочтение нормальной иерархии масс ( $\Delta m_{32}^2 > 0$ ) и верхнему октанту угла смешивания  $\theta_{23}$  ( $\sin^2 \theta_{23} > 0,5$ ) [122].

Помимо анализа собственно данных Т2К, на протяжении нескольких лет проводится работа по получению осцилляционных параметров при совместном анализе данных Т2К и других работающих нейтринных экспериментов: SK [123] и NOvA [124].

Эксперимент SK, одноименный детектор которого служит *дальним детектором* ускорительного эксперимента Т2К, нацелен на регистрацию атмосферных и солнечных нейтрино, нейтрино от взрывов Сверхновых звезд (а также на поиск протонных распадов). В SK регистрируются атмосферные нейтрино, прошедшие различный путь от  $\sim 15$  км ("сверху") до  $\sim 13$  тысяч км ("снизу") с энергиями в диапазоне от  $\sim$ МэВ до  $\sim$ ТэВ, в то время как пролетная база в Т2К фиксирована (295 км), а энергия нейтрино находится в более узких рамках (сотни МэВ ÷ несколько ГэВ с пиком около 0,6 ГэВ). Взаимодополняемость этих двух экспериментов заключается в том, что Т2К имеет лучшую чувствительность к величине  $\sin^2 2\theta_{23}$  и к разности квадратов масс нейтрино  $|\Delta m_{32}^2|$ , а SK более чувствителен к величине  $\sin^2 \theta_{23}$  (то есть к октанту угла  $\theta_{23}$ ) и к иерархии масс (то есть к знаку величины  $\Delta m_{32}^2$ ).

В 2024 г. опубликованы результаты первого совместного анализа данных экспериментов Т2К и SK (Т2К-SK анализ) [125], основанного на общей модели нейтринных взаимодействий и детекторной модели. Совместный

анализ показал: а) исключение CP-сохранения по инварианту Ярлског ( $J = \sin \theta_{13} \cos 2\theta_{13} \sin \theta_{12} \cos \theta_{12} \sin \theta_{23} \cos \theta_{23} \sin \delta_{CP}$ ) [126] имеет значимость между  $1,9\sigma$  и  $2,0\sigma$  (что лучше ограничения только из анализа T2K); б) легкое предпочтение *нормальной* иерархии масс ( $\Delta m_{32}^2 > 0$ ); в) нет предпочтения для октанта угла  $\theta_{23}$ .

Представляется перспективным совместный анализ двух ускорительных экспериментов – T2K и NOvA [127], – которые являются взаимодополняемыми в том смысле, что имеют разную пролетную базу (295 км и 810 км, соответственно), различные диапазоны нейтринных энергий (пиковые значения  $\sim 0,6$  ГэВ в T2K и  $\sim 2,0$  ГэВ в NOvA), разные типы ближних/дальних детекторов, различные систематические ошибки. Результаты измерения  $\delta_{CP}$  обоих экспериментов показывают близкие значения ( $-\pi/2$  или  $3/2\pi$ ). За счет большей пролетной базы NOvA имеет лучшую чувствительность к эффекту вещества при осцилляциях электронных нейтрино, а T2K – к вакуумным параметрам осцилляций, так что совместный анализ T2K-NOvA может дать более точную картину процессов нейтринных осцилляций. Обе группы готовят совместную публикацию.

## 7 Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино)

### 7.1 Эксперимент NA62

В течение 2024 года в рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) был завершен анализ данных, набранных в сеансах 2021–2022 гг., по измерению вероятности распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Был найден 31 кандидат в искомый сигнальный распад, а ожидаемое общее количество фоновых событий равно  $N_{bkg} = 11,0^{+2,1}_{-1,9}$ . Вклад различных процессов в фоновые события показан в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Вклад различных процессов в фоновые события

Процесс	Число событий
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 (\gamma)$	$0,83 \pm 0,05$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$0,76 \pm 0,04$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$	$0,07 \pm 0,01$
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu (\gamma)$	$1,70 \pm 0,47$
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	$0,87 \pm 0,19$
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	$0,83 \pm 0,43$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$0,11 \pm 0,03$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$	$0,89^{+0,34}_{-0,28}$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \ell \nu$	$< 0,001$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$	$0,01 \pm 0,01$
Распады до основного распадного объема	$7,4^{+2,1}_{-1,8}$
Всего	$11,0^{+2,1}_{-1,9}$

Распределение новых найденных кандидатов в двух сигнальных областях показано на рисунке 7.1.

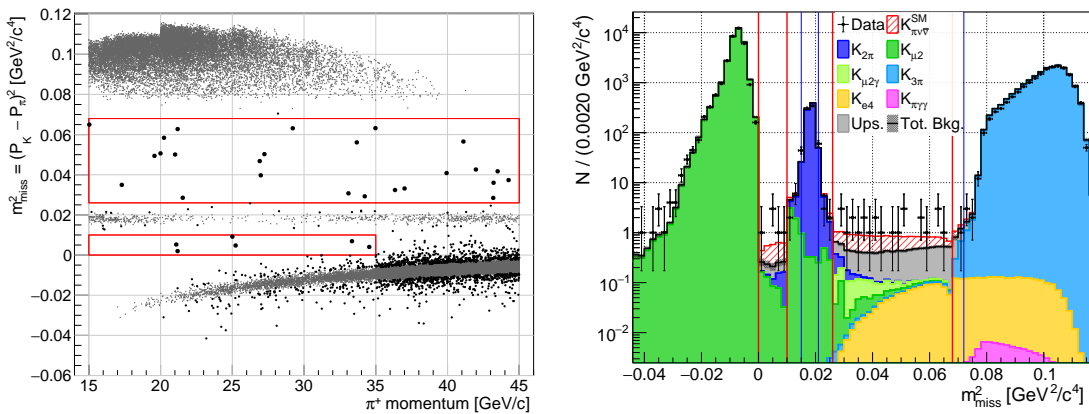


Рисунок 7.1 – Распределение  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  кандидатов в двух сигнальных областях, выделенных красными прямоугольниками (слева). Справа показано одномерное распределение вместе с Монте-Карло моделированием (для моделирования  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  сигнала использовалась вероятность распада, предсказанная Стандартной моделью)

После объединения нового результата с результатами обработки данных 2016–2018 гг. [128] был найден 51 кандидат в искомый распад при ожидаемом числе фоновых событий  $N_{bkg}^{2016-2022} = 18_{-2}^{+3}$ . Измеренная вероятность распада равняется

$$\mathcal{B}_{16-22}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (13,0_{-2,9}^{+3,3}) \times 10^{-11} = (13,0_{(-2,7)}^{(+3,0)} \text{stat} [_{(-1,2)}^{+1,3}] \text{syst}). \quad (7.1)$$

и отклоняется от предсказания Стандартной модели на  $1,5 - 1,7\sigma$ , в зависимости от того, какое предсказание использовать [129, 130] как показано на рисунке 7.2.

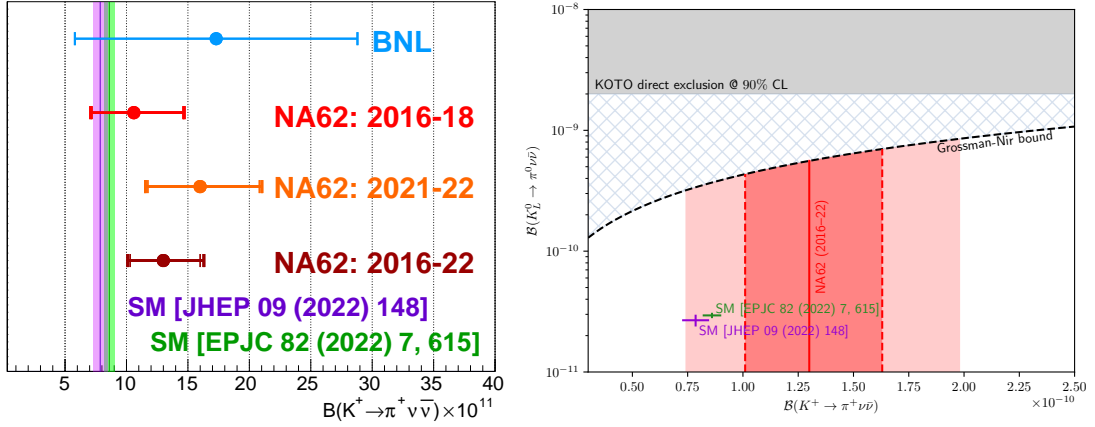


Рисунок 7.2 — Результаты предыдущих измерений вероятности распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  (слева) и отклонение нового измерения от предсказания Стандартной модели (справа) вместе с областями  $\pm 1\sigma$  (красная область) и  $\pm 2\sigma$  (светло-красная область)

Таким образом, проведенное измерение вероятности распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  является самым точным в мире. Впервые в мире показано существование искомого распада с уровнем достоверности больше  $5\sigma$ , что является первым наблюдением этого распада. Наблюдается тренд в сторону отклонения центральной измеренной величины вероятности распада от предсказания Стандартной модели. Данный результат был представлен коллаборацией на открытом семинаре в ЦЕРНе 24 сентября 2024 г. [131], статья готовится к публикации ([132]).

В течение 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН принимали участие в наборе данных эксперимента NA62. Описанный выше результат также был получен при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН.

## 7.2 Эксперимент ОКА (Протвино)

В 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работу в эксперименте ОКА (сотрудничество НИЦ КИ-ИФВЭ-ИЯИ-ОИЯИ): принимали непосредственное участие в сменах по набору данных на пучке положительных каонов ускорителя У-70 (г.



Протвино Московской области) и в анализе данных, набранных в предыдущие годы, в результате чего в 2024 г. были получены следующие результаты.

1. Получен новый предел на вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0e^+\nu < 5,4 \times 10^{-8}$  (90% CL), который в 65 раз превосходит существующий до настоящего времени предел [133].

2. Был зарегистрирован редкий каонный распад  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0\gamma$ . Вероятность этого распада составила величину  $(4,1 \pm 0,9(stat) \pm 0,4(syst)) \times 10^{-6}$ . Вероятность распада и энергетический спектр гамма квантов находятся в хорошем согласии с предсказанием киральной пертурбативной теории ChPT [134].

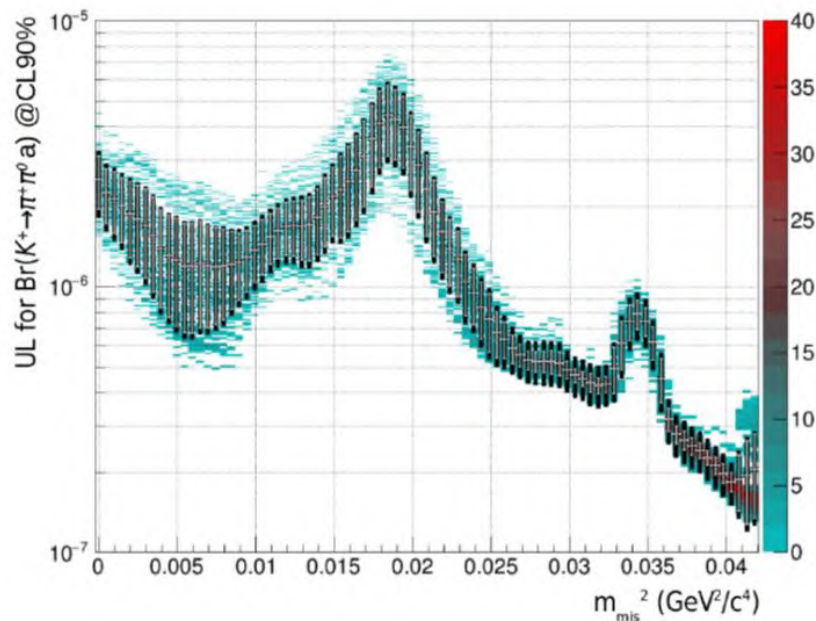


Рисунок 7.3 — Верхний предел (доверительный интервал 90%) на вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0a$ . Вертикальные линии показывают систематические ошибки, соответствующие 1 стандартному отклонению

3. Получен новый результат по поиску аксионоподобной частицы в распадах положительных каонов ( $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0a$ ). Аксион - гипотетическая нейтральная псевдоскалярная элементарная частица, постулированная для решения проблемы сохранения комбинированной CP-симметрии в квантовой хромодинамике. Аксион может рождаться в распаде положительного каона на два пиона и аксион. В эксперименте ОКА было проанализировано более 3-х миллиардов распадов положительных каонов. В результате не было обнаружено ни одного события с аксионом в конечном состоянии. Был получен верхний предел на вероятность такого распада от  $2,5 \times 10^{-6}$  до  $2 \times 10^{-7}$  в зависимости от массы аксиона в интервале от 0 до 200 МэВ (рисунок 7.3) [135], что более чем на порядок лучше наиболее сильного до настоящего времени предела, полученного в этом распаде в эксперименте E787 в БНЛ.

## 8 Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучком мюонных (анти)нейтрино

### 8.1 Байесовский подход для измерения параметров нейтринных осцилляций

Был проведен повторный анализ данных со статистикой  $13,6 \times 10^{20}$  POT для нейтринной моды и  $12,5 \times 10^{20}$  для антинейтринной моды пучка NuMI, используя байесовский подход [136]. Данные эксперимента NOvA, представленные на рисунке 8.1 по-прежнему соответствуют максимальному смешиванию для  $\sin^2 \theta_{23}$  и областям  $\sin^2 \theta_{23} - \Delta m_{32}^2$  и  $\delta_{CP} - \sin^2 \theta_{23}$ , которые были получены в предыдущем анализе с использованием частотного статистического метода. Использование байесовского подхода позволило провести анализ, рассматривая величину  $\sin^2 2\theta_{13}$  как свободный параметр, т.е. не используя ограничения на этот параметр, которые были получены в экспериментах с реакторными антинейтрино. Кроме того, получены новые результаты для  $\sin^2 2\theta_{23}$  и инварианта Ярлског  $J$ ; результаты байесовского анализа обеспечивают параметризационно-независимое измерение фазы нарушения CP-инвариантности и указывают на то, что данные NOvA с  $J \approx 0$  отдают предпочтение слабому нарушению CP-инвариантности, которое становится более выраженным при обратной иерархии масс. В эксперименте NOvA измеряется вероятность осцилляций

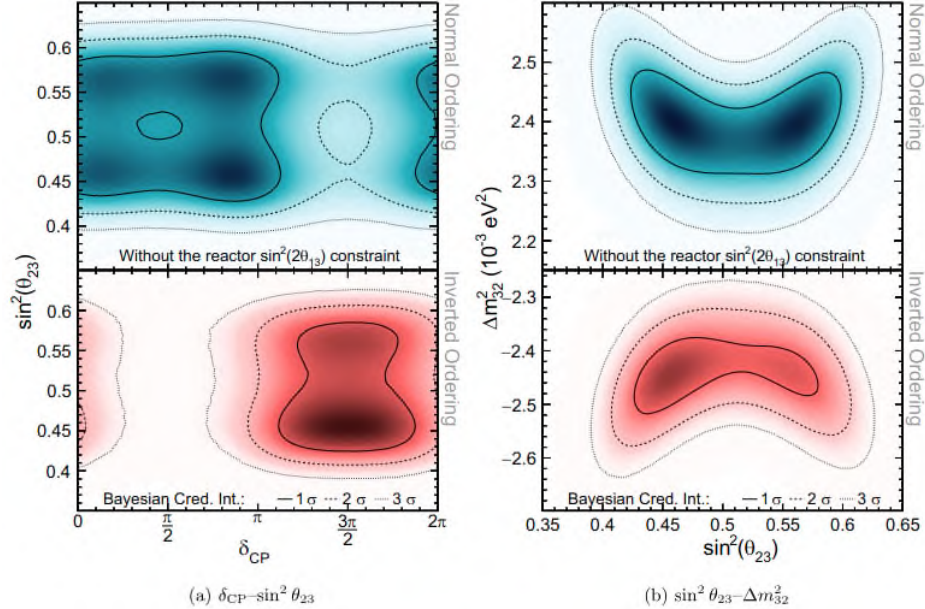


Рисунок 8.1 — Апостериорная плотность вероятности (заштрихованная) с 1, 2 и 3  $\sigma$  доверительными интервалами для  $\delta_{CP} - \sin^2 \theta_{23}$  (слева) и  $\sin^2 \theta_{23} - \Delta m_{32}^2$  (справа), полученная для нормальной (вверху синий) и обратной (внизу красный) иерархий масс нейтрино. Контуры получены с априорной однородностью в  $\sin^2 2\theta_{13}$

нейтрино, т.е. свертка углов смешивания, фазы  $\delta_{CP}$  и иерархии масс нейтрино. Уда-

ление внешнего ограничения на угол  $\theta_{13}$  уменьшает чувствительность к параметрам осцилляций, тем не менее, выводы вытекающие из байесовского анализа не меняют предыдущих результатов. Значение  $0,071 < \sin^2 \theta_{13} < 0,107$ , измеренное в этом эксперименте, согласуется с результатами реакторных экспериментов с электронными антинейтрино и детекторами на расстоянии несколько километров.

## 8.2 Поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, нарушающих CP-инвариантность

Был проведен анализ данных эксперимента NOvA в рамках 3-х флейворной парадигмы, включая нестандартное взаимодействие нейтрино, которые могут влиять на вероятность их осцилляций [137]. Данные  $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e(\bar{\nu}_e)$  осцилляционных каналов использовались для измерения параметров нестандартного взаимодействия нейтрино  $\varepsilon_{e\mu}$  и  $\varepsilon_{e\tau}$  [138, 139, 140]. Как показано на рисунке 8.2, включение этих параметров по отдельности, лишь незначительно улучшает соответствие с данными. Получены следующие ограничения на амплитуды нестандартного взаимодействия нейтрино  $|\varepsilon_{e\mu}| < 0,3$   $|\varepsilon_{e\tau}| < 0,4$ , хотя наблюдаются разрешенные области и для больших значений  $|\varepsilon_{e\tau}|$  из-за вырождения между параметрами при  $|\varepsilon_{e\tau}| \approx 1,8$ . Другим

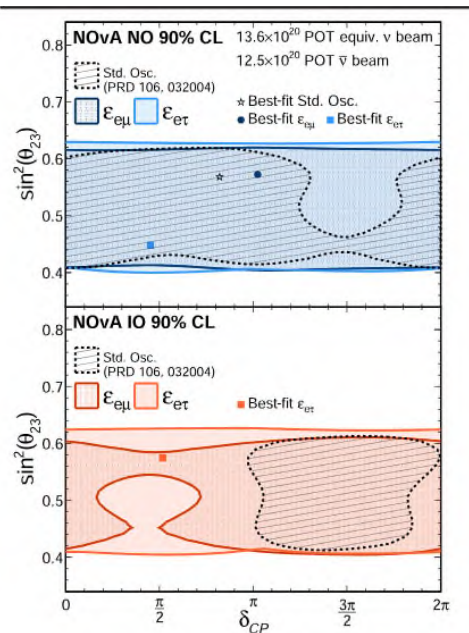


Рисунок 8.2 — Области разрешенных на 90% доверительном уровне значений  $\sin^2 \theta_{23}$  как функция фазы  $\delta_{CP}$ , для нормальной (вверху) и обратной иерархий (внизу) масс нейтрино. Представлены результаты для случаев, когда секторы нестандартного взаимодействия нейтрино  $\varepsilon_{e\mu}$  (темные сплошные синяя и оранжевые линии) и  $\varepsilon_{e\tau}$  (светлые сплошные синяя и оранжевая линии) включены поодиночке в фит данных. Эти области показаны в сравнении с последними стандартными осцилляционными результатами этого эксперимента (пунктирная заштрихованная темная область)

важным следствием наличия нестандартного взаимодействия нейтрино является их влияние на измерение фазы нарушения CP-инвариантности. Это указывает на необходимость будущих экспериментов по преодолению этого вырождения для дальнейшего исследования потенциально новой физики в нейтринном секторе.

### 8.3 Приведенные сечения квази-упругого рассеяния электронов и нейтрино на ядрах

Приведенные сечения полуэксклюзивного квази-упругого рассеяния электронов и нейтрино на ядрах углерода, кислорода и аргона были вычислены в рамках релятивистской модели искаженных волн в импульсном приближении [141]. Показано, что эти сечения как функции фермиевского импульса нуклона в ядре хорошо описывают данные по рассеянию электронов на эти ядрах. Результаты представлены на рисунке 8.3. Разницу между сечениями рассеяния электронов и нейтрино не превышающую 10% можно объяснить кулоновским искажением волновой функции налетающего электрона в поле ядра мишени и она уменьшается с ростом энергии налетающего лептона. Разница в несколько процентов между сечениями нейтрино и антинейтрино обусловлена различием во взаимодействии протонов и нейтронов в конечном состоянии с остаточным ядром. Приведенные сечения слабо зависят от энергии взаимодействия. Подход, представленный в этой работе позволяет применять новые ограничения на ядерные модели для рассеяния нейтрино, которые получены из прямого сравнения результатов расчета с прецизионными данными по приведенным сечениям рассеяния электронов на ядрах. Этот метод можно применять для

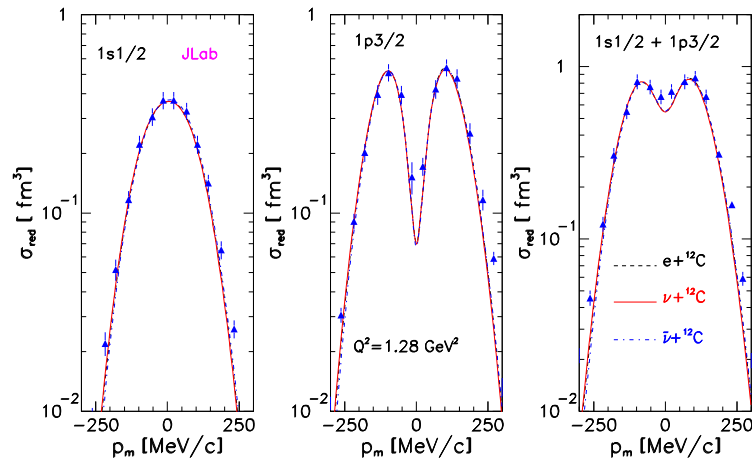


Рисунок 8.3 — Сравнение результатов расчета приведенных сечений квази-упругого рассеяния электронов и (анти)нейтрино на ядрах углерода как функций фермиевского импульса связанных в ядре нуклонов. Представлены данные JLab [142] для рассеяния электронов с энергией  $E = 2,445$  ГэВ. Показаны вычисленные приведенные сечения для рассеяния электронов (пунктирная линия), нейтрино (сплошная линия) и антинейтрино (штрих-пунктирная линия)

проверки спектральных функций и моделей взаимодействия нуклонов в конечном состоянии с остаточным ядром, которые используются в генераторах нейтринных событий.

## 9 Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс

### 9.1 Экспериментальная установка

Установка «Троицк ню-масс» состоит из двух основных частей: безоконного источника трития и электростатического спектрометра с магнитной адиабатической коллимацией, рисунок 9.1.

Электростатический спектрометр работает по принципу интегрального спектрометра. Поданный на электрод отрицательный потенциал замедляет электроны, отсекая часть спектра. Потенциальный барьер могут преодолеть только электроны с энергией выше потенциала спектрометра. После прохождения барьера электроны снова ускоряются до первоначальной энергии и регистрируются детектором. Изменяя потенциал, сканируются интегральные части спектра. В вакуумной части спектрометра установлен 7-ми пиксельный кремниевый детектор (размер пикселя 2 мм). Детектор и его предварительный усилитель имеют уникальные свойства и были изготовлены специально для нас институтом физики им. Макс Планка в Мюнхене совместно с кремниевой лабораторией Фирмы Siemens, Мюнхен. Детектор и часть электроники были предоставлены в рамках международного сотрудничества между ИЯИ РАН и коллаборации KATRIN (Карлсруэ, Германия), а также подпроекта TRISTAN (Мюнхен, Германия).

Каждый пиксель представляет собой кремниевый дрейфовый детектор, характерной особенностью которого является крайне малая ёмкость регистрирующего анода – порядка 100 фемто-Фарад. Это обеспечивает сильное шумоподавление, которое обратно пропорционально корню из величины ёмкости. Усиление сигнала происходит зарядочувствительным предусилителем, где сигнал интегрируется на ёмкости в 20 фемто-Фарад. Это примерно в 100 раз меньше, чем в обычных усилителях такого типа, что обеспечивает увеличение сигнала в вольтах примерно на такую же величину. Усилитель формирует медленно растущий сигнал за счёт темнового тока детектора и работает в режиме периодического сброса. Считывающая электроника работает в режиме непрерывной оцифровки, которая требует оптимизации временного окна с целью минимизировать шум и улучшить энергетическое разрешение. Считывающая электроника работает в режиме непрерывной оцифровки, которая требует оптимизации временного окна с целью минимизировать шум и улучшить энергетическое разрешение. АЦП с частотой дискретизации 125 МГц оцифровывает сигналы. Блок АЦП позволяет использовать быстрый цифровой фильтр обработки аналоговых импульсов для выработки сигнала считывания, что существенно подавляет шумы детектора и электроники.

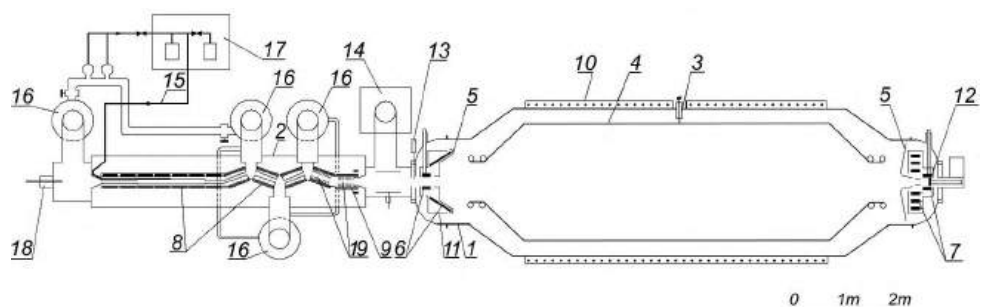


Рисунок 9.1 — Основные элементы установки, тритиевый источник расположен слева, спектрометр - справа: 8 – безоконный тритиевый источник, 15 – система замкнутой циркуляции трития, 10 – электростатический спектрометр, 12 – регистрирующий детектор

В состав установки также входит высоко-вольтная система с точностью выставления напряжения лучше 0,2 В в диапазоне до 30 кВ. Для задания высокого напряжения используется источник FuG-35000 с аналоговым управлением через калибратор Fluke 5502E, рисунок 9.2. Измерение и контроль напряжения осуществляется через высокоточный резисторный делитель. Такой вариант обеспечивает максимальную точность и стабильность.

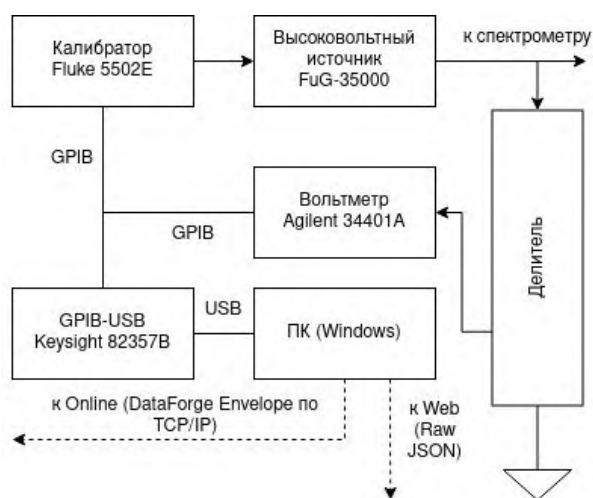


Рисунок 9.2 — Схема организации высоко-вольтной системы установки

Для охлаждения сверхпроводящих магнитов жидким гелием установка оснащена двумя криогенными системами TCF-50, рисунок 9.3 и TCF-20 фирмы LINDE, а также системой получения жидкого азота производительностью 10 л в час. Криогенная система позволяет заполнить жидким гелием около 20 сверхпроводящих соленоидов, которые обеспечивают работу тритиевого источника и спектрометра.



Рисунок 9.3 — Фотография части криогенной системы установки с гелиевым ожижителем LINDE-50

## 9.2 Первичная обработка экспериментальных данных

Как уже отмечалось во введении, в 2024 г. было проведено 2 сеанса полноценных измерений спектра электронов от распадов трития. Максимальная конечная энергия таких электронов около 18575 электронвольт. Сканирование интегрального спектра проводилось пошаговым изменением потенциала спектрометра в диапазоне 11 - 18,6 кВ с шагом 50-100 вольт. На рисунке 9.4 приводится измеренный спектр в одном из наборов в зависимости от напряжения на спектрометре.

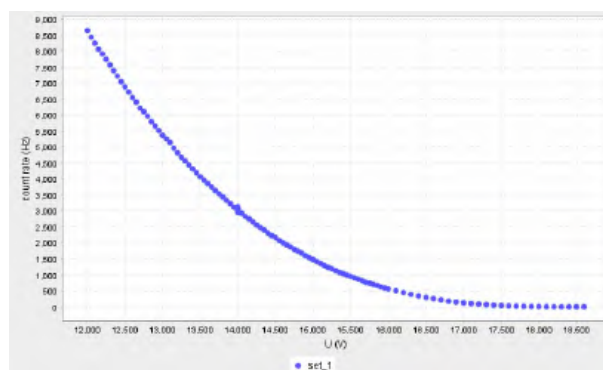


Рисунок 9.4 — Пример одного из набора данных интегрального спектра электронов. По вертикальной оси скорость счёта детектора в конце спектрометра. По горизонтали - потенциал спектрометра



При обработке первичных данных необходимо провести ряд поправок. В первую очередь, это толщина источника, то есть, количество газа и вероятность рассеяния электронов на рабочем газе. Для этого дополнительно выполняются измерения с электронной пушкой, расположенной в конце источника. Далее, из толщины источника определяются вероятности одного, двух и так далее кратности рассеяния. Обычно, вероятность рассеяния не превышает 5%-10%. На это делается поправка.

Важным элементом анализа является поправка на функцию пропускания спектрометра. При измерении в широком интервале спектра каждый электрон с определённой энергией, внутри спектрометра имеет первичную энергию за вычетом потенциала спектрометра,  $\Delta E$ . Функция пропускания, практически, плоская и составляет 100% для интервала  $\Delta E$  ниже 6 кэВ. При более высокой разности функция пропускания начинает падать. Детально её поведение также измеряется с электронной пушкой. Значение этой функции сворачивается с теоретическим  $\beta$ -спектром.

Далее вводится поправка на мёртвое время электроники и на долю случайных наложений. Мёртвое время электроники составляет примерно 200 нсек. Случайные двойные наложения чётко выделяются в аналоговом спектре амплитуд в виде отдельной области выше одиночных срабатываний. Поскольку это амплитуда от двух электронов, число таких событий удваивается и прибавляется к скорости счёта одинарных событий.

Магнитные поля в источнике образуют магнитную ловушку для электронов с большими азимутальными углами относительно оси соленоидов, эффект треппинга. Это связано с тем, что поле на краях источника в три раза больше поля в основной части. В результате многократного рассеяния электроны из ловушки могут попасть в область малых углов и затем пройти в спектрометр. Вклад таких электронов учитывается по стандартной процедуре, описанной в работе [143].

### 9.3 Учёт рассеяния на задней стенке тритиевого источника

Безоконный газовый источник трития, безусловно, имеет огромные преимущества за счёт отсутствия подложки или материала окна. Однако, в силу конфигурации магнитных полей, существует конечная вероятность для электронов, выходя в направлении, противоположном спектрометру, рассеяться на вакуумной трубе назад под очень большими углами. Если энергия таких электронов будет больше потенциала в спектрометре, то они достигнут регистрирующего детектора. Этот эффект “задней стенки” может исказить спектр первичных электронов. Были проведены расчёты места и вероятности рассеяния электронов на задней стенке с учётом конфигурации магнитных и электростатических полей установки, рисунок 9.5. Часть расчётов собственно вероятности рассеяния проводилась в пакете программ GEANT. Окон-

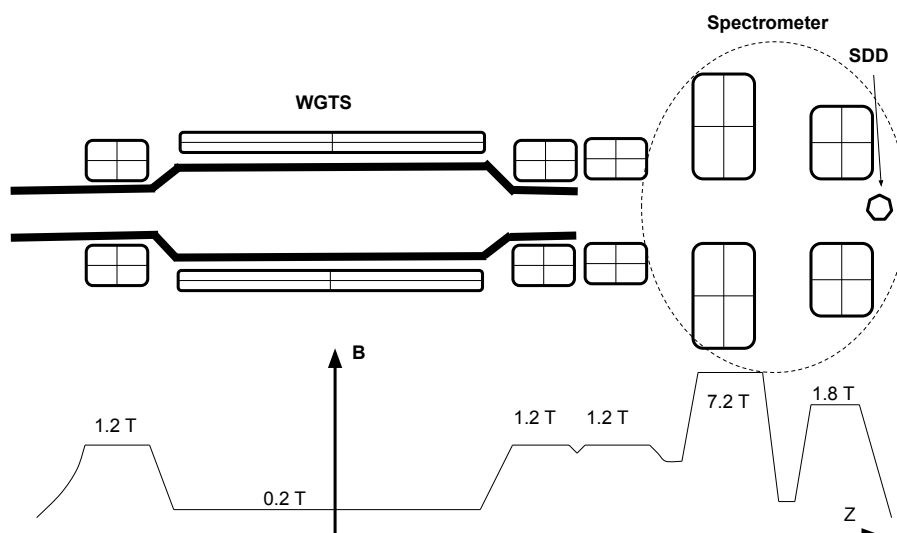


Рисунок 9.5 — Условное изображение установки Троицк ню-масс, сверху, и значения магнитных полей,  $B$ , в единицах Тесла. Спектрометр представлен двумя магнитами 7,2 Т на входе и 1,8 Т

чательные результаты расчёта приведены на рисунке 9.6. При работе спектрометра под большими потенциалами вклад задней стенки на несколько порядков меньше основного спектра. При потенциале в 11000 В вклад достигает 2%. Рисунок 9.8 демонстрирует, насколько важно учитывать вклад задней стенки при фитировании экспериментальных данных. Без учёта вклада невозможно достичь хорошего согласия между теоретической кривой и экспериментальными данными. Первый, мартовский, сеанс измерений большей частью был посвящён настройке новых режимов магнитных полей и электроники. Однако, набранной статистики хватило, чтобы получить предварительные пределы на элемент матрицы смешивания электронного и стерильного нейтрино (рисунок 9.8). Основной набор статистики был продолжен в ноябре 2024 г. Результаты измерений обрабатываются.

#### 9.4 Работы над усовершенствованием и модернизацией криогенной системы.

Проведена модернизация вакуумной системы гелиевого ожижителя TCF-20. Выполнена замена паромасляного насоса на турбомолекулярный насос отечественного производства ТМН-150, что повысило надёжность работы гелиевого ожижителя. Проведён монтаж безмасляного спирального насоса для перекачки гелия из мягко-

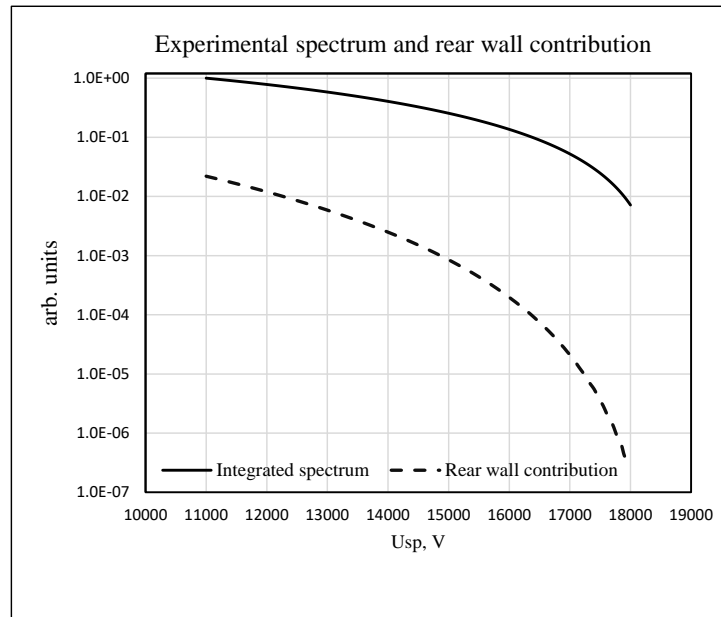


Рисунок 9.6 — Относительная доля электронов рассеянных на задней стенке в зависимости от потенциала спектрометра. Сплошная линия - это интегральный спектр первичных электронов, пунктирная линия - вклад задней стенки

го газгольдера. Это обеспечит эвакуацию гелия без потерь при аварийной остановке. Установлен и откалиброван емкостной уровень жидкого азота для использования его в передвижной цистерне типа ЦТК-0,5. Изготовлена система контроля и аварийной сигнализации температур водяного охлаждения диффузионных насосов. Выполнен ряд других профилактических работ по вакуумной и криогенной системам.

## 9.5 Развитие программного обеспечения

Написаны программы для расчёта рассеяния электронов на задней стенке установки «Троицк ню-масс» и расчёта его влияния на конечный спектр. Для этого создана программа генерации событий на Geant4. Написаны скрипты для построения спектра отражённых электронов. Обеспечен запуск симуляции треппинга в пакетном режиме. Разработаны отладочные программы для контроля отображения результатов моделирования.

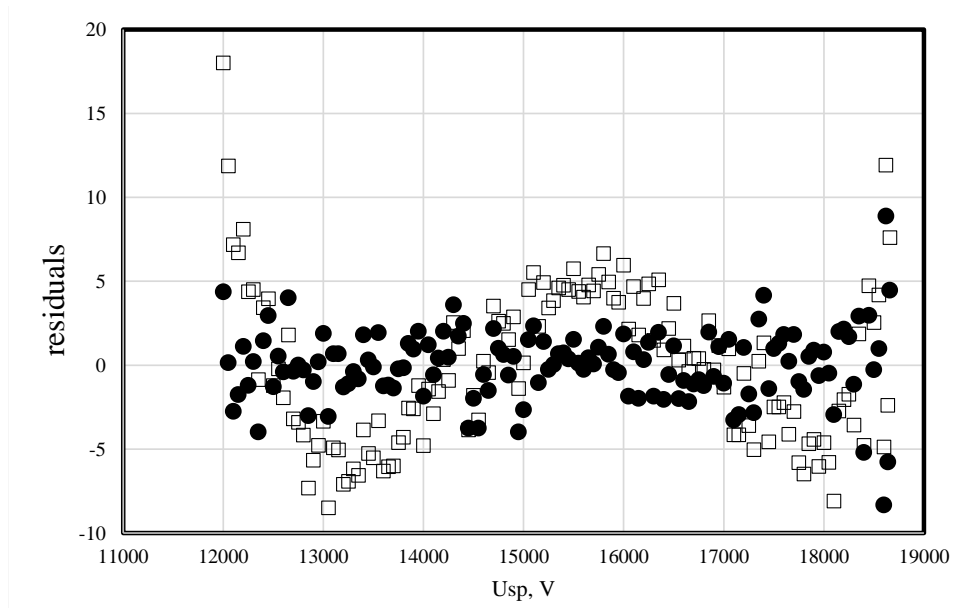


Рисунок 9.7 — Относительные отклонения (в единицах  $\sigma$ ) интерполяции экспериментального спектра теоретической кривой с учётом вклада задней стенки, чёрные точки, и без учёта этого вклада, открытые квадраты

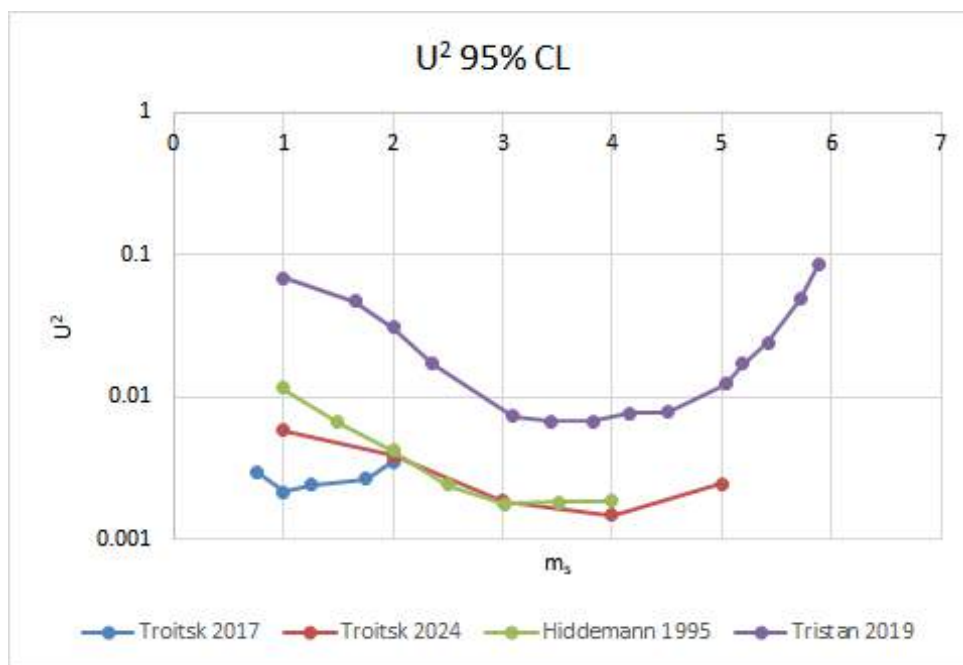


Рисунок 9.8 — Предварительные результаты обработки сеанса в марте 2024. Верхние пределы на элемент матрицы смешивания электронного и стерильного нейтрино в зависимости от массы последнего

## 10 Поиск 2К-захвата в $^{124}\text{Xe}$

С целью повышения эффективности отбора событий в области интересов ( $63,6 \pm 3,7$  кэВ) эксперимента по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  исследуется возможность применения алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных. Классическая методология обработки данных включает следующие этапы.

а) Дифференцирование зарядовой формы импульса сигнала с МПС.

б) Проведение специальной математической процедуры, позволяющей привести дифференциал импульса к исходному току электронов, то есть убрать ионную компоненту из дифференциала импульса.

в) Аппроксимация полученных токовых сигналов набором гауссиан для определения количества кластеров, входящих в состав токового сигнала. Сумма гауссиан дает результирующую кривую процедуры аппроксимации исходного токового сигнала.

г) Разделение сигналов МПС на группы: одноточечные, двухточечные, трехточечные события и события с мужественностью больше трех. Искомый эффект ищется только в наборе трехточечных событий.

В следствии конечного разрешения детектора и рекомбинации пар ионов в кластерах многоточечных событий, при движении к анодной нити (в область газового усиления), возможно слияние отдельных кластеров внутри единичного события, что может привести к неверной интерпретации класса события (одноточечное, двухточечное, трехточечное и т.д.). Для увеличения эффективности разделения сигналов МПС по классу предлагается использовать методы машинного обучения, при помощи которых с некоторой надежностью можно определить истинное количество кластеров в каждом событии детектора.

Данная задача была поручена студенту магистратуры МФТИ (2022-2024 гг.) Сегалу Кириллу Антоновичу (группа M02-206фя). Поставленная перед ним задача была разбита на несколько этапов:

— изучить специфику методов машинного обучения и на основе этого сформулировать модельную задачу;

— создать выборку, соответствующую экспериментальным функциям, которая будет содержать в себе информацию как о внешних, так и о внутренних параметрах функции;

— получить точности и надежности восстановления внутренних параметров на основе внешних на модельной выборке в результате использования методов машинного обучения.

Задача обработки данных эксперимента по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  сводится к выделению событий, имеющих разное количество первичных зарядовых кластеров:

одно-, двух- и трехточечные события. Основным интерес представляют трехточечные события, т.к. искомый эффект от 2К-захвата представлен данным видом событий. В работе, выполненной Сегалом К.А., была создана модельная выборка, в которой генерировали параметры гауссовых функций, описывающих трехточечные события (амплитуды, дисперсии и мат. ожидания), посредством которых генерировались модельные функции.

В качестве входных данных в методах машинного обучения использовались параметры, которые получались в результате аппроксимации методом наименьших квадратов. Как показывает анализ, данный метод недостаточно хорошо работает в ситуациях, когда две близко расположенные гауссовы функции сливаются в одну, тем не менее выборка, составленная из параметров, близких и принципиально неправильных по отношению к заданным параметрам, оказывается очень продуктивной. Отдельно и вместе с параметрами аппроксимации также использовались значения норм в пространстве  $L_2$  от модельных функций и их производных.

Выход в программах машинного обучения должен содержать истинную информацию о модельной функции. В работе исследовались независимо два метода: регрессии и классификации. Для регрессии в качестве выходного вектора использовался набор параметров (амплитуда, дисперсия и мат. ожидание), которыми порождалась модельная функция. По этой информации нетрудно восстановить истинное количество гауссовых функций в сигнале. В методах классификации же входные векторы сопоставлялись классам, которые в свою очередь ставились в соответствие напрямую истинному количеству гауссовых функций.

Обучение проводилось на тренировочной выборке, анализ точности работы программы исследовался на тестовой выборке. Было регенерировано три варианта выборки, отличающихся количеством образцов на порядок: в первой выборке  $10^3$  образцов, во второй  $10^4$ , в третьей  $10^5$ . Тренировочная и тестовая выборки разделялись тремя различными способами: в отношении 20:80, 50:50 и 80:20, соответственно.

Наилучший метод в регрессии оказался метод случайный лес, на тестовой выборке (соответствующий наибольшему объему,  $10^5$  образцов, и разделению тренировочной и тестовой выборки в отношении 50:50) с надежностью 90% параметр  $R$ -квадрат имел значение не хуже 95,0%. Данный параметр служит мерой точности восстановления истинных параметров гауссовых функций. На основе этого восстановления в работе вычислялась точность восстановления истинного количества гауссовых функций определяющих количество кластеров (точек) в событии, которая составила 92,2%. Восстановление именно трехточечных событий равно 98,5%.

Метод ближайших соседей в методах классификации оказывается наиболее точным - с надежностью в 90% точность не хуже 99,56% для определения класса со-

бытия (для той же выборки, что и для регрессии), что эквивалентно восстановлению истинного количества гауссовых функций.

Данные результаты позволяют убедиться в том, что предлагаемые методы в данной работе имеют перспективы для их дальнейшего применения на экспериментальных данных.

Выполненная работа легла в основу выпускной квалификационной работы «Изучение возможности применения машинного обучения для анализа данных эксперимента по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$ ».

## 11 Поиск безнейтринного двойного бета распада $^{100}\text{Mo}$ в составе международной коллаборации AMoRE

По программе эксперимента AMoRE в 2024 году были выполнены следующие работы.

Завершены исследования радиоактивности материалов, которые используются в эксперименте AMoRE-II. Для проведения данных исследований было использованы следующие методы и оборудование:

– низкофоновые гамма-спектрометры на основе HPGe-детекторов: одно-детекторные системы «CC1» и «CC2» [144] на основе коаксиальных детекторов р-типа, производства CANBERRA. Установки имеют одинаковую низкофоновую защиту из 5 см романского свинца (самый близкий слой к детектору), 10 см меди и 15 см свинца стандартного типа. Для повышения чувствительности измерений, и получения более точных значений активности радиоактивных примесей в некоторых материалах (медь, сверхнизкофоновый свинец) была использована высокоэффективная система регистрации гамма-квантов на основе 14-ти ППД - CAGe [145]. Для защиты от радона экспериментальные установки зарыты акриловыми боксами, внутреннее пространство которых продувается парами жидкого азота. Измерения поверхностной альфа-активности с помощью сверхчувствительного детектора – ионизационной камеры UltraLo-1800, производства XIA Co [146]. Максимальный размер исследуемого образца 47x47x0,8 см. Данный детектор имеет одну из самых лучших чувствительностей - 0,0001 отсчета/см<sup>2</sup>/ч.

– измерение концентрации примесей с помощью ICP-MS-метода. Для проведения данного типа анализа используется система Agilent 7900 ICP-MS, которая расположена в чистой комнате класса 1000 (ISO6). Некоторые образцы перед проведением ICP-MS-спектрометрии были разрушены (декомпозированы). Например, образец отражающей пленки Vikuiti был сожжен в специальной микроволновой печи Milestone PYRO.

– нейтроноактивационный анализ (НАА) – применялся для образцов, которые сложно растворить или декомпонировать для ICP-MS-метода, например, для разного вида пластмасс. НАА проводится на исследовательском реакторе HANARO в городе Тэджон в Корее. Реактор имеет максимальную тепловую мощность 30 МВт. Поток тепловых нейтронов зависит от местоположения облучающего отверстия. Для этой работы использовалось специальное отверстие PTS #2. При полной мощности в этом месте поток тепловых нейтронов составляет около  $3,5 \times 10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>/с. Однако для активаций, представленных в этой работе, реактор работал на мощности 15 МВт, что подразумевает поток вдвое меньше этого значения. С помощью этого метода были исследованы образцы тефлона и РЕЕК.



Значения активностей для некоторых образцов приведены в Таблице 11.1 (для гамма-детекторов) и Таблице 11.2 (для ICP-MS- или НАА-метода).

Таблица 11.1 — Активность радиоактивных изотопов в образцах (мБк/кг). Пределы установлены на 90% уровне достоверности

Образец	Материал	Произв-ль	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ac	<sup>228</sup> Th	<sup>40</sup> K	Детектор
Cu holder	медь NOSV	Aurubis (2014)	<0,087	<0,068	<0,075	<1,8	САGe
Cu holder	M3 Brass, болтики	SANCO	<0,15	<0,57	<0,37	<2,8	СС2
Отражатель	отражающая пленка Vikuiti	3M	0,59	<0,93	<0,64	9,4	СС1
Образцы для сенсоров температуры	Superconduc. wire	Supercon Inc.	<4,2	<6,2	<4,1	<170	СС1
Образцы для сенсоров температуры	Polyimide PCB	Hanwha L&C	<1,1	<1,3	<1,1	<12	СС1
Образцы для сенсоров температуры	Олово (5N)	Alfa Aesar	1,38	0,75	<0,47	5,1	СС1
Образцы для сенсоров температуры	Паста для пайки	G.F.Thompson Co.	19,4	7,9	5,7	650	СС2

Завершено тестирование криостата Jinju для этапа AMoRE-II, способного вместить до ~ 900 LMO-кристаллов полной массой <sup>100</sup>Mo до 200 кг. На первом этапе планируется установить 90 кристаллов с общей массой 24 кг, рисунок 11.1. На втором этапе будут установлены еще 360 кристаллов. Т.о. полная масса изотопа <sup>100</sup>Mo будет составлять ~ 90 кг.

Сборка детекторных модулей производится в специальных помещениях CUP IBS. Пример детекторных модулей приведен на рисунке 11.2.

Планируется использование <sup>nat</sup>Li<sub>2</sub><sup>100</sup>MoO<sub>4</sub> кристаллов двух размеров – 1) диаметром 5 см и высотой 5 см (масса 310 грамм), 2) диаметром 6 см и высотой 6 см (масса 520 грамм). Использование кристаллов большей массы позволит уменьшить число каналов и количества вещества вокруг детекторов, позволив при той же массе вещества (изотопа <sup>100</sup>Mo) снизить фон от элементов конструкции и электроники. Но, в этом так же имеется и проблема с возможным наложением друг на дру-

Таблица 11.2 — Концентрации  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  во внутренних материалах, определенные с помощью ICP-MS или НАА (где указано) методов

Образец	Материал образца	Производитель	$^{238}\text{U}$ (г/г)	$^{232}\text{Th}$ (г/г)
Отражатель	Vikuiti film	3M	<3,6	<4,5
Держатель кристаллов	медь NOSV, слиток	Aurubis (2014)	1,6	5,1
Держатель кристаллов	медь NOSV, держатель (верх и низ)	Aurubis (2021)	0,32	0,53
Держатель кристаллов	Эрифлоновые плиты, PTFE	Maagtechnic	<100 (НАА-метод)	<200 (НАА-метод)
Болтики	ОФЕ-медь, исходная	Aurubis (2018)	1,01	0,98
Болтики	ОФЕ-медь, исходная	Aurubis (2021)	0,83	0,98
Болтики	Болтики из ОФЕ-меди, обработанные на станке	Aurubis	1,8	10,7
Болтики	Болтики из бронзы	Sanco	0,49	1,43
РСВ-плата	Polyimide	Hanwha L&C	890	<1,2
Припой	Олово 6N	Alfa Aesar	<50	<50

га сигналов от  $2\nu2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$ , что может привести к появлению событий от  $2\nu2\beta$ -распада в энергетической области  $0\nu2\beta$ -распада (3034,3 кэВ). Этот возможный источник неустраняемого фона будет более подробно изучен при старте измерений с первыми 90 кристаллами. Начало измерений запланировано на конец 2024 года – начало 2025 года.

Закончен анализ данных набранных на этапе АМоRE-I. Для анализа были использованы данные 17 кристаллов: 13 кристаллов  $^{48\text{depl}}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  и 4 кристалла  $^{nat}\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ . Полная экспозиция составила 8 кг/лет для  $\text{XMoO}_4$  (все кристаллы), или 3,88 кг/лет для  $^{100}\text{Mo}$ . На основе полученных данных был рассчитан верхний предел для периода полураспада безнейтринного двойного бета-распада  $^{100}\text{Mo}$  -  $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 2,9 \cdot 10^{24}$  лет (90% У.Д.). Это наилучшая оценка верхнего предела для периода полураспада безнейтринного двойного бета-распада  $^{100}\text{Mo}$ , и превосходит предыдущий результат полученный коллаборацией CUPID-Mo -  $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 1,8 \cdot 10^{24}$  лет (90% У.Д.) [147].

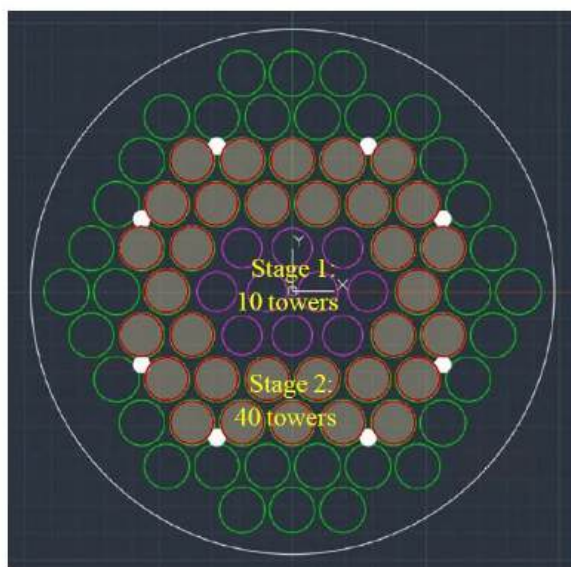


Рисунок 11.1 — Расположение подвесов с кристаллами в криостате

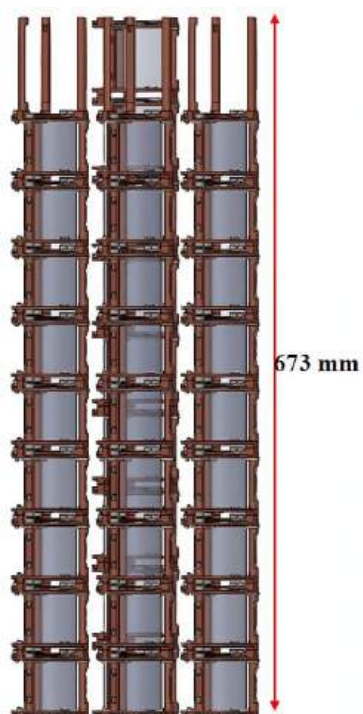


Рисунок 11.2 — Пример детекторных модулей с кристаллами LMO

## 12 Поиск двойного безнейтринного бета распада $^{76}\text{Ge}$ в составе международной коллаборации GERDA и LEGEND

Целью международного эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа  $^{76}\text{Ge}$  ( $0\nu\beta\beta$  распада). Эксперимент GERDA расположен в подземной лаборатории LNGS в Италии. В 2020 году набор данных эксперимента GERDA закончен, с этого времени продолжается обработка данных. В 2024 году получены и опубликованы новые результаты, ожидаются публикации и в 2025 году. В эксперименте GERmanium Detector Array (GERDA) использовались обогащенные германиевые детекторы высокой чистоты в криостате с жидким аргоном, который содержит 0,33%  $^{36}\text{Ar}$ , изотопа-кандидата для двухнейтринного двухэлектронного захвата ( $2\nu\text{ECEC}$ ) и, следовательно, для безнейтринного двухэлектронного захвата ( $0\nu\text{ECEC}$ ). Если бы этот процесс был обнаружен, он свидетельствовал бы о нарушении лептонного числа и майорановской природе нейтрино. При захвате ( $0\nu\text{ECEC}$ )  $^{36}\text{Ar}$  испускается монохроматический фотон с энергией 429,88 кэВ, который может быть обнаружен германиевыми детекторами GERDA. Коллаборация искала  $^{36}\text{Ar}$   $0\nu\text{ECEC}$  по данным GERDA, с общим временем жизни 4,34 года (накоплено 3,08 года во время фазы II GERDA и 1,26 года во время фазы I GERDA). Сигнала обнаружено не было, и был установлен нижний предел периода полураспада этого процесса в 90% С.Л.  $T_{1/2} > 1,5 \cdot 10^{22}$  года [148]. На основе данных, собранных во время второго этапа эксперимента Gerda, был проведен поиск источников полной энергии от кандидатов в темную материю с бозонными энергиями и массами от 65 до 1021 кэВ. В анализ были включены прямое поглощение темной материей, а также её комптоновское рассеяние. При общей экспозиции в 105,5 кг·год не наблюдалось никаких признаков сигнала, превышающего фоновый. Результирующие пределы исключения, полученные с помощью байесовской или частотной статистики, являются наиболее строгими прямыми ограничениями в большей части диапазона масс 140-1021 кэВ. В качестве примера, при массе 150 кэВ безразмерная константа связи темных фотонов и аксионоподобных частиц с электронами была ограничена  $\alpha'/\alpha < 8,7 \cdot 10^{-24}$  и  $g_{ac} < 3,3 \cdot 10^{-12}$  при 90% уровне достоверности (С.Л.), соответственно. Кроме того, выполняется поиск сигналов, похожих на пики, при распадах нуклонов и электронов, выходящих за рамки стандартной модели. Мы обнаружили, что для общего распада одиночного нейтрона в  $^{76}\text{Ge}$  нижний предел времени жизни составляет  $\tau_n > 1,5 \cdot 10^{24}$  лет, а для протона  $\tau_p > 1,3 \cdot 10^{24}$  лет при 90% С.Л. Для электронного распада был определен нижний предел  $\tau_e > 5,4 \cdot 10^{25}$  лет 90% С.Л. [149]. Одновременно проводятся работы по созданию нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND. В LEGEND-200, набирающего статистику в Гра-Сассо в Италии в середине 2023 г. получен первый результат по

фону детектора –  $4,2 \cdot 10^{-4}$ /кэВ·кг·год, представленный на конференции TAUP2023. Это значение является рекордным по сравнению с другими проектируемыми и действующими детекторами по поиску распада и соответствует поставленной задаче достижения чувствительности полномасштабного эксперимента на уровне периода полураспада  $T_{1/2} \sim 10^{28}$  лет.

## 13 Увеличение точности измерения угла смешивания $\theta_{13}$ осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz

### 13.1 Измерения угла смешивания нейтрино $\theta_{13}$

Измерение угла смешивания нейтрино  $\theta_{13}$  проводилось одновременно в трех международных коллаборациях: Double Chooz (Франция) [26], Daya Bay (Китай) [150] и RENO (Южная Корея) [151]. Во всех трех экспериментах было получено одинаковое в пределах экспериментальных погрешностей значение данного угла смешивания. Третий угол смешивания  $\theta_{13}$  оставался неизвестным после измерения углов смешивания нейтрино в потоках мюонных нейтрино ( $\theta_{23}$ ) и солнечных нейтрино ( $\theta_{12}$ ) еще некоторое время. При наличии трех активных типов нейтрино должно существовать три угла смешивания ( $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$ ) и три массовых параметра – разность квадратов масс состояний нейтрино ( $\Delta m_{12}^2$ ,  $\Delta m_{23}^2$ ,  $\Delta m_{13}^2$ ). Предполагалось, что третий угол смешивания  $\theta_{13}$  очень мал, и его трудно измерить в прямом эксперименте. В 2000 году было предложено использовать относительный метод измерения малой величины угла  $\theta_{13}$ , сравнивая измерения проводимые одновременно двумя детекторами, расположенными на разных расстояниях от ядерного реактора [152]. В эксперименте Double Chooz, который проводился на АЭС Chooz B (Франция, Арденны), состоящей из двух ядерных реакторов. Расстояния от детекторов до реакторов составили 400 и 1050 м в среднем. Каждый детектор представляет из себя сложную конструкцию из вложенных друг в друга цилиндрических объемов, заполненных разными жидкостями [153]. Внутри – мишень, состоящая из жидкого сцинтиллятора с добавкой Gd для увеличения эффективности регистрации нейтронов от реакции ОБР (0.2), затем область жидкого сцинтиллятора без Gd для увеличения эффективности регистрации гамма-квантов, выходящих из мишени, область световода и снаружи область мюонного вето. Схема детектора показана на рисунке 13.1. Некоторое время измерения проводились только дальним детектором, который был запущен на четыре года раньше ближнего. Измерения с двумя детекторами, работающими практически одновременно, проводились на протяжении двух лет с 2015 по 2017 г. Живое время измерения ближним детектором составило 258 дней. Была набрана большая статистика нейтринных событий в ближнем детекторе, более 200 тысяч (201148). Из анализа измерений двух детекторов получено значение угла смешивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm 0,014$ . Это значение оказывается несколько больше значений, полученных в экспериментах Daya Bay и RENO на одно стандартное отклонение. Это связано с тем, что в Double Chooz регистрируются дополнительно антинейтрино из бассейнов-отстойников с отработанным топливом [154]. Бассейны расположены бли-

же к ближнему детектору и дают вклад на 0,5% больше в поток ближнего детектора, чем дальнего. Пока этот вклад учтен в увеличенной погрешности измерения.

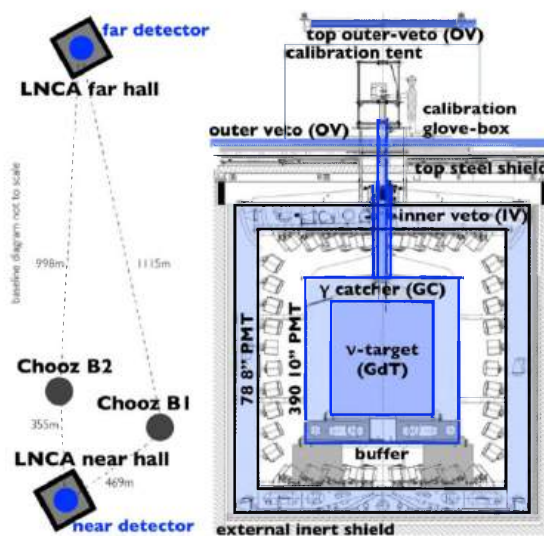


Рисунок 13.1 — Схема проведения измерений в эксперименте Double Chooz с двумя детекторами и двумя ядерными реакторами

### 13.2 Измерение спектра антинейтрино ядерного реактора

Большая статистика нейтринных событий в ближнем детекторе позволяет получить с хорошей точностью спектр антинейтрино, используя методику, разработанную в ИЯИ РАН. Методика основывается на использовании функции пересчета измеренного спектра событий в спектр антинейтрино, которая получается из моделирования процесса регистрации антинейтрино в детекторе методом Монте Карло.

Фоны детекторов оказались намного меньше эффекта от потока антинейтрино, не более 3,5%. Все фоны были хорошо изучены. В результате, они могут быть вычтены из измеренного спектра нейтрино-подобных событий, что дает нам чистый спектр позитронов реакции ОБР. Этот спектр искажен влиянием детектора.

Методом Монте-Карло был промоделирован спектр наблюдаемых позитронов и сравнен с идеальным спектром. Была получена функция, позволяющая получить идеальный спектр. Идеальный спектр представляет из себя спектр антинейтрино, умноженный на дифференциальное сечение взаимодействия антинейтрино с протоном. Экспериментальный спектр антинейтрино получается путем деления идеального спектра на дифференциальное сечение. Предварительно идеальный спектр нормируется на экспериментальное сечение, полученное в этом же эксперименте [26]. В результате экспериментальный спектр оказывается в естественных единицах (частицы/МэВ на одно деление).

### 13.3 Расчет спектров антинейтрино от изотопов урана и плутония

В 2024 году проводился расчет четырех спектров антинейтрино от осколков деления тяжелых изотопов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ), которые входят в состав ядерного топлива. Расчет велся методом суммирования индивидуальных спектров осколков с варьированием формы у ядер с неизвестными схемами распада. При расчете производилось сравнение с экспериментальным спектром. Получено хорошее согласие экспериментальных спектров антинейтрино делящихся изотопов с расчетными и, таким образом, была пополнена действующая база данных по схемам бета-распада для ядер далеких от линии бета-стабильности [155]. Расчет первоначально был опробован на данных эксперимента в Ровно [156] и затем применен к данным Double Chooz [157] [158].

Сечение реакции ОБР, полученное на основе расчетных спектров при составе активной зоны (АЗ) реактора Double Chooz  $\sigma_f = 5,70 \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление, хорошо совпадает с экспериментальным сечением Double Chooz  $\sigma_f = (5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление [26]. Отличие в расчетном и экспериментальном сечениях может объясняться дополнительным вкладом в экспериментальное сечение антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом.

Полученные расчетные спектры антинейтрино показаны на рисунке 13.2.

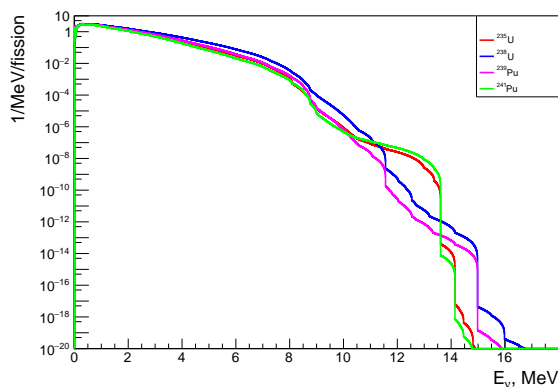


Рисунок 13.2 — Спектры антинейтрино четырех делящихся изотопов  $^{235,238}\text{U}$  и  $^{239,241}\text{Pu}$

Были взяты экспериментальные сечения реакции ОБР из четырех наиболее точных измерений: Bugey-4 [159], Double Chooz [26], Daya Bay [150] и RENO (Южная Корея) [151].

При сравнении сечений реакции ОБР, полученных в четырех экспериментах с наилучшей точностью, с расчетными сечениями, полученными с использованием новых расчетных спектров, совпадение оказывается в пределах одной эксперименталь-



ной ошибки. Полученные спектры описывают экспериментальные сечения с лучшей точностью, чем другие расчеты.

## 14 Анализ данных детектора LVD, накопленных за 20 лет работы, по исследованию мюонной компоненты космических лучей и естественной радиоактивности, являющихся основными источниками фона в экспериментах по поиску редких событий, проводимых в подземной лаборатории Гран Сассо (LNGS)

### 14.1 Частотно-временной анализ измерений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS

Эксперимент LVD сконструирован для регистрации нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей Галактике. Фоном детектора в области высоких энергий являются мюоны космических лучей и продукты их взаимодействия в веществе детектора. В области низких энергий фон детектора – гамма-кванты от естественной радиоактивности грунта и материалов конструкции, а также гамма-кванты от радиоактивного газа радона, находящегося в атмосфере подземного зала.

Гамма-кванты распада дочерних ядер радона и торона от цепочек распада урана и тория, в диапазоне от 0,5 до 3,5 МэВ регистрируются всеми счетчиками детектора в течении 10 секунд каждые 10 минут. Гамма-излучение создается, в основном, ядрами  $^{214}\text{Bi}$ , за счёт  $\beta$ -распада превращающимися в  $^{214}\text{Po}$  с характерным временем  $\tau = 19,7$  мин.

Данные представляют собой темп счёта импульсов выше низкого энергетического порога  $\sim 0,5$  МэВ. Данные усредняются по многим детекторам для каждой из 3х башен LVD и для шести измерений каждого часа. Данные почищены. Таким образом на входе Фурье-анализа имеются временные ряды  $y_{T1}(t)$ ,  $y_{T2}(t)$ ,  $y_{T3}(t)$  - темп счёта радона T1, T2 и T3 башен LVD в Герцах, соответственно.

Дискретный Фурье-анализ проводился по формулам Бесселя для нахождения амплитуд гармоник косинуса и синуса с нулевой фазой, и потом результат приводился к одной функции косинуса (без синуса) с ненулевой фазой (для простого графического представления результатов). Результатом Фурье-анализа являются амплитуды гармоник  $A_m$  в Гц и их ошибки, фазы гармоник в радианах и их ошибки, а также значимости  $\eta_m$  амплитуд гармоник.

На рисунке 14.1 представлен график, полученный Фурье анализом. В некоторых областях спектра гармоник наблюдаются ясно выраженные пики с весьма значимыми гармониками - эти области спектра представлены на графиках, обсуждаемых далее. На всех графиках по оси абсцисс отложены номера гармоник.

На рисунке 14.1 цифрами отмечены одиннадцать номеров гармоник экспериментальных видимых пиков и их соответствие номерам гармоник комбинационных частот.

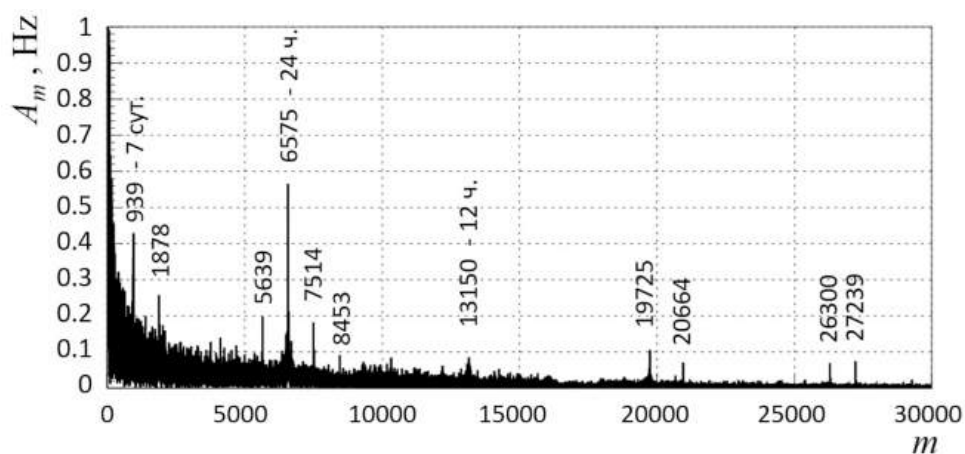


Рисунок 14.1 — Фурье гармоники

Совпадение комбинационных частот с наблюдаемыми значениями подтверждает корректность проведенного Фурье анализа.

В результате Фурье анализа временного ряда данных эксперимента LVD по скорости счета гамма-квантов в подземном помещении в спектре гармоник с большой значимостью  $\eta$  найдены пики следующих периодов:

На рисунке 14.2 представлены фурье гармоники с периодом  $T = 1$  сутки,  $\eta > 10$ . Высокий пик с самой большой амплитудой, вклад в который дает эффект солнечно-суточных приливов в грунте (волна  $S1$ ) и, в основном (больше 95%), сформирован работой персонала Лаборатории и проездом грузовиков в транспортных туннелях.

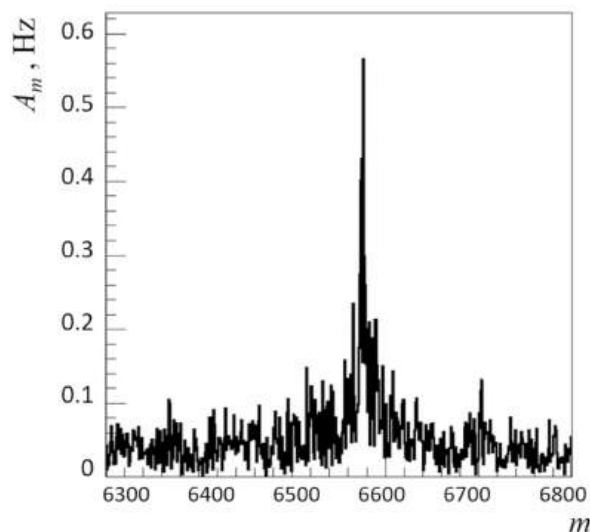


Рисунок 14.2 — Фурье гармоники  $m = 6300-6800$

На рисунке 14.3 показаны гармоники в диапазоне  $m = 450 - 1450$  гармоник. В центре виден «размытый» пик с периодом  $T = 7$  суток. Амплитуда максимальной гармоники ( $m = 940$ ) в недельном пике составляет 0,43 Гц, а его значимость

$\eta_m > 10$ . Период  $T = 7$  суток вызван работой персонала в подземной лаборатории и автомобильный трафик в транспортных туннелях,  $\eta > 10$ .

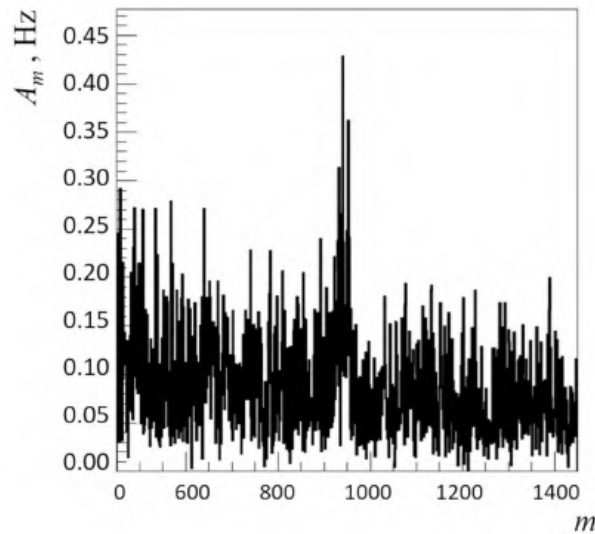


Рисунок 14.3 — Фурье гармоники  $m = 450-1450$

На рисунке 14.4 показаны гармоники в диапазоне  $m = 5500 - 6600$ . Справа суточный пик  $f_1$  ( $m = 6575$ ,  $T_{6575} = 1$  сутки). Слева пик  $(f_1 - f_2)$  ( $m = 6575-939=5636$ ) комбинационная частота.

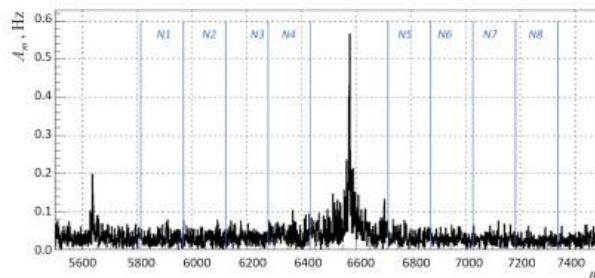


Рисунок 14.4 — Фурье гармоники от 5500 до 7600

Период  $T = (1,01 - 1,06)$  суток – период от лунно-суточных приливов в грунте (волна  $M1$ ),  $\eta=8$ . Период  $T = (0,506 - 0,531)$  суток – период от лунно-полусуточных приливов в грунте (волна  $M2$ ),  $\eta=5,4$ . Вычисленная суммарная мощность пика  $M2$  меньше суммарной мощности пика  $S1$ . Это говорит о том, что происхождение экспериментального пика  $S1$  в основном техногенное и в меньшей степени от гравитационных эффектов Солнца.

Также были найдены периоды с небольшой значимостью:  $T = (29,3 - 29,8)$  суток – синодический лунный месяц - период от лунно-солнечных приливов в грунте,  $\eta=2,7$ .  $T = 365,24$  суток – годовой период между перигелиями,  $\eta=2,6$ .  $T = 27,55455$  суток – аномалистический лунный месяц – период между перигеями,  $\eta=1,38$ . В нашем исследовании мы подтверждаем наличие связанных с солнечными и, в большей

степени, с лунными периодами вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности под землей, существование которых при анализе потока тепловых нейтронов в приземном слое впервые было получено в работе [28].

Необходимо заметить, что полученный розовый Фурье-спектр (большие амплитуды гармоник на малых частотах) связан с долговременной нестабильностью детекторов-счетчиков (в основном фотоумножителей), что корректируется ежемесячными калибровками LVD, но не корректируется при измерении скорости счета гамма-квантов от распадов радона в зале установки. Однако же это не помешало найти периоды в данных LVD, связанные с гравитационными эффектами от вращения Луны и Земли.

Фаза – положение максимума косинусоиды гармоник была определена для синодического периода ( $T=29.5$  сут). Было найдено, что через  $\delta t = (3,51 \pm 0,24)$  суток после полнолуния LVD «видит» увеличение выхода радона по измеряемым детектором гамма-квантам.

Другие фазы определить трудно, т.к. искомые периоды во временном ряде скоростей счета гамма-квантов состоят из нескольких гармоник со своей фазой. Поэтому единственным методом нахождения фазы для уже “заранее известных” периодов остается метод наложения эпох. В статье [160] методом наложения эпох были найдены фазы для годового периода (середина августа) и лунного синодического периода (полнолуние). В работе [161] было указано на задержку максимума выхода радона после полнолуния от 1 до 5 суток. Полученный результат в этой работе подтверждает наличие задержки в 3,5 суток с большей точностью.

## 14.2 Источники фоновых событий в детекторе LVD

В детекторе LVD низкоэнергетические импульсы регистрируются в режиме постоянного мониторинга фона. Импульсы измеряются каждые 10 минут для стабильно работающих счетчиков детектора. Среднее значение скорости счета около 48, 50 и 71 отсчетов в секунду на один внутренний счетчик для T1, T2 и T3 башен LVD, соответственно. Постоянная составляющая фона – это гамма-кванты от радиоактивных распадов материалов детектора и конструкций. Переменная составляющая – это, в основном, гамма-кванты от распадов ядер висмута в цепочки распада радона, которые за счёт бета-распада превращаются в полоний с характерным временем около 20 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0,6 до 2,5 МэВ. Средняя концентрация радона в зале установки составляет около 26 Бк/м<sup>3</sup>.

Для изучения вариаций фона и разделения вкладов от его различных источников в полный темп счета детектора с энергиями больше 0,5 МэВ было проведено Монте-Карло моделирование с использованием программного комплекса Geant4 вер-

сии 10.3 [162]. Подробное описание набора физических моделей, применявшегося в расчетах, и способов его тестирования и отладки с помощью экспериментальных данных можно найти в работе [163]. Для данного исследования были дополнительно включены модели, описывающие радиоактивные распады.

В расчетах использовалась подробная геометрия, включающая детальное описание детектора LVD, грунта, коридоров зала, а также упрощенную модель детектора GERDA (см. рисунок 14.5). Моделирование отклика LVD проводилось для всех частиц ( $\gamma$ -квантов,  $\alpha$ -частиц, электронов), рождающихся в радиоактивных распадах ядер (урана, тория, калия) в грунте и материалах детектора, а также радона в воздухе зала детектора.

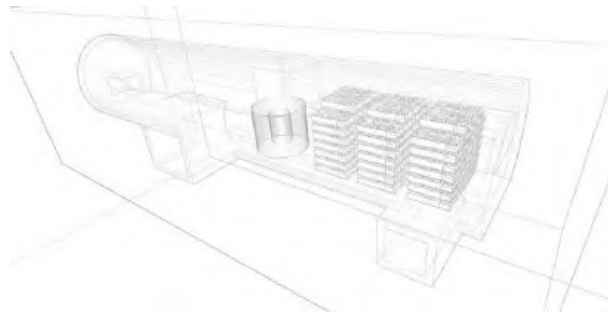


Рисунок 14.5 — Модельная геометрия (детекторы LVD и GERDA, экспериментальный зал), использованная в расчетах

Дополнительные трудности создавало отсутствие надежных данных по концентрациям урана, тория и калия в грунте Гран-Сассо и материалах детектора. В работе 1985 Белотти [164] с соавторами измеряли их концентрации в различных залах лаборатории ( $^{238}\text{U} < 0,643$  ppm,  $^{232}\text{Th} < 0,123$  ppm,  $^{40}\text{K} < 0,019$  ppm). Средние измеренные концентрации имеют достаточно низкие значения, однако, в грунте присутствуют примеси (инфильтраты) с высокой активностью ( $^{238}\text{U} - 6.809$  ppm,  $^{232}\text{Th} - 2,167$  ppm,  $^{40}\text{K} - 0,846$  ppm). Они занимают менее 1% поверхности стен, но их распределение и степень неоднородности неизвестны. Содержания урана, тория и калия в материалах детектора были взяты из измерений группы Копылова и Ковальчука [165].

Для концентрации изотопов в радиоактивных рядах урана и тория мы использовали равновесные значения. В действительности радон частично покидает грунт, а в материалах детектора равновесие могло установиться лишь частично. Вследствие этого результаты наших расчетов для среднего темпа счета являются только оценкой сверху. Эффективная толщина грунта, которая дает вклад в фоновый темп счета, заметно отличается для различных продуктов радиоактивных распадов. Для электронов она составляет порядка 1 см, для гамма-квантов – около 20 см, для нейтронов,

рождаемых альфа-частицами, – примерно 1 м. Для радона помимо внутреннего объема детектора нами был учтен внешний слой воздуха с толщиной около 2 м.

Был получен суммарный вклад различных источников фона в средний темп счета событий (имп/сек/сч) с энергией выше 0,5 МэВ во внутренних счетчиках для всех башен (с учетом эффективности регистрации). В результате моделирования получено, что полное число событий составляет 72, 68 и 67 для T1, T2 и T3, соответственно. Около 78% в общей скорости счета составляет постоянная составляющая, ответственная за радиоактивность грунта и материалов конструкции. Переменная часть фона составляет около 22% (для концентрации радона в зале 50 Бк/м<sup>3</sup>). В пересчете на скорость счета гамма-квантов, можно дать диапазон – это от 7 отсчетов для концентрации радона 26 Бк/м<sup>3</sup> до 57 отсчетов для 200 Бк/м<sup>3</sup> в моменты пиков, которые обусловлены выбросам радона в атмосфере экспериментального зала.

Приближения в расчетах связаны с неопределенностью содержания U, Th, K в стали счетчиков установки, которая делалась разными фирмами в разное время (на протяжении 15 лет), а измерения содержания проводились всего на 2-х счетчиках. Содержание радиоактивности в стальных портатанках и опорных конструкциях детектора мы считали таким же, как и для стали счетчиков. Также мы использовали однородное распределение U, Th, K в грунте, в то время как расположение инфильтратов не известны и сами измерения в Лаборатории неоднородны.

Неопределенности в светосборе ФЭУ (отношение числа фотонов, собирающихся на фотокатоде, к количеству, излученному сцинтиллятором), а также в флуктуациях числа фотоэлектронов для энергий меньше 1 МэВ, завышают полученный МК-результат в абсолютных значениях до 30%.

Радиоактивность стали сцинтилляционных счетчиков и конструкции детектора вносит наибольший (порядка 66%) вклад в полный темп счета внутренних счетчиков LVD. Внутренние счетчики экранируются наружными счетчиками от распада радиоактивных ядер в грунте, поэтому для них вклад событий от грунта составляет лишь около 15%. Для наружных счетчиков 75% составляет вклад от радиоактивности грунта и 15% – вклад от радиоактивности стальных конструкций. Переменная составляющая – распад радона, может давать вклад около 20% для внутренних и 10% для наружных счетчиков, при концентрации радона около 30 Бк/м<sup>3</sup>.

### 14.3 Изучение пампинг эффекта под землей

В рамках изучения связи выхода радона под землей и атмосферного давления проводилось ряд исследований в различных подземных лабораториях (LNGS - 1400 м, НИИЯФ МГУ - 20 м).

Проведены измерения и выполнен корреляционный анализ концентраций радона и аэроионов в подземной лаборатории НИИЯ МГУ. Для пар переменных “давление-радон” и “давление-ионы” обнаружен задержанный пампинг-эффект, аналогичный наблюдавшемуся ранее для нейтронов и гамма-квантов. Представлена простая феноменологическая модель, объясняющая полученные результаты. В рамках этой модели причина задержки заключается в постепенном накоплении радона в помещении при понижении атмосферного давления. Баланс темпа накопления радона, времени его радиоактивного распада и характерного времени вариаций давления приводит к величине эффективной задержки в 2 суток между вариациями атмосферного давления и концентрацией радона. Корреляционный анализ для переменных “давление-ионы” свидетельствует о том, что в воздухе, выносящим радон в лабораторию, уже присутствуют ионы, образовавшиеся в порах грунта. Эти ионы составляют примерно 21% от общего числа ионов в лаборатории.

Рассматриваемый задержанный пампинг-эффект для ионов и гамма-фотонов должен действовать только в закрытом помещении, т.к. он связан с накоплением радона. Если в лаборатории работает вентиляция, выдувающая радон, то концентрация ионов и темп счета гамма-фотонов в лаборатории будут меняться синхронно с выходом радона (без задержки), т.е. синхронно с изменением атмосферного давления. Действительно, в измерениях в тоннелях с естественной вентиляцией задержанный пампинг-эффект не виден, хотя имеется хорошая корреляция радона с давлением в одни и те же моменты времени. Таким образом, эффект задержанного пампинг-эффекта в вентилируемых помещениях можно ожидать лишь для нейтронов, которые приходят в детектор из слоя грунта толщиной 2-3 метра и поэтому не подвержены влиянию вентиляции.

Согласно выполненному в данной работе корреляционному анализу, можно представить следующую картину процессов в подземной лаборатории. Выходящий из стен газ в некоторых пропорциях содержит как радон, так и легкие аэроионы, образовавшиеся в порах грунта. При понижении атмосферного давления выход газа из грунта более эффективен, поэтому с понижением давления радон в невентилируемом помещении начинает накапливаться. Максимальное содержание радона достигается спустя примерно 2 суток после начала понижения давления.

Поскольку ионы поступали в помещение в повышенном количестве и в начале эпизода понижения давления и в период максимального накопления радона, то экстремум их корреляционной функции с давлением находится при меньших временах, чем время максимального накопления радона, а именно, при 18 часах. Эта величина позволяет оценить, что 79% ионов появляются от распада радона непосредственно в помещении лаборатории, а 21% ионов выходят из стен “в готовом виде”. Необходимо



отметить, что корреляционный анализ описывает только наиболее типичные характеристики процессов. Длительные измерения показали, что имеются особые эпизоды, когда содержание ионов изменяется аномально при изменении окружающих условий. Например, есть эпизоды, когда концентрация ионов продолжала расти при увеличении давления. Аномалии могут быть связаны с потоками воздуха в лаборатории, с появлением аэрозоля или другими факторами. Роль аэрозоля состоит в том, что легкие ионы становятся недоступны для регистрации после прилипания к частицам аэрозоля.

## 15 Анализ экспериментальных данных первого этапа эксперимента NEWSdm с использованием результатов расчетов для корректного выделения событий взаимодействия темной материи и фоновых событий.

### 15.1 Эксперимент NEWSdm

Модуль эксперимента NEWSdm состоит из 10-килограммового стека Nano Imaging Trackers, т. е. недавно разработанных ядерных эмульсий с размерами кристаллов AgBr до нескольких десятков нанометров.

Чтобы зафиксировать направленность траекторий частиц ТМ, детектор должен иметь постоянную пространственную ориентацию в направлении созвездия Лебедя, вдоль которого Солнечная система движется в Галактике. С этой целью эмульсионный детектор NEWSdm, собранный из ядерных эмульсий NIT, будет установлен на стандартный экваториальный телескоп, и, следовательно, ВИМП-частицы будут приходить на детектор.

Относительно длинные треки отдачи, вызванные усиленной темной материей, в сочетании с нано-размерной гранулярностью эмульсии приводят к чрезвычайно низкому фону. Это делает установку в лаборатории INFN Gran Sasso, как на поверхности, так и под землей, жизнеспособной. Проводилось сравнение между двумя местоположениями. Ожидается, что угловое распределение ядерных отдач, вызванных усиленной темной материей в эмульсионных пленках в поверхностной лаборатории, покажет избыток с коэффициентом 3,5 в направлении Галактического центра. Этот избыток позволяет проводить поиск темной материи с направленной чувствительностью. Конфигурация поверхностной лаборатории предотвращает ухудшение сигнала в скальных породах и является наиболее мощным подходом для направленного наблюдения усиленной темной материи с высокой чувствительностью. При таком подходе 10-килограммовый модуль эксперимента NEWSdm, экспонируемый в течение одного года в поверхностной лаборатории Гран-Сассо, может исследовать массы темной материи от  $1 \text{ кЭВ}/c^2$  до  $1 \text{ ГэВ}/c^2$  и значения сечения до  $10\text{-}30 \text{ см}^2$  с помощью направленного чувствительного поиска. В настоящее время прототип детектора установлен в зале Лаборатории Гран Сассо (рисунок 15.1).

Фоновыми источниками для поиска темной материи являются альфа- и бета-частицы, гамма-лучи и отдачи, вызванные нейтронами, в то время как NIT по существу нечувствительны к минимально ионизирующим частицам (MIP). Основными источниками альфа-частиц являются радиоактивные цепи U и Th и радон.  $\alpha$ -частицы, образующиеся в этих процессах, имеют энергию порядка МэВ, а их пробег в эмульсии составляет порядка десятков микрометров, что намного больше, чем у ядерных отдач, вызванных WIMP. Поэтому альфа-частицы можно идентифицировать и от-



Рисунок 15.1 — Фотография модуля детектора NEWSdm в экспериментальном зале Гран Сассо

брасывать в эмульсиях путем верхнего среза по длине трека.  $\beta$ -лучи, образующиеся при распаде  $^{14}\text{C}$ , составляют немалый вклад в общий фоновый бюджет. Этот вид фона в любом случае менее критичен для эмульсии NIT по сравнению с другими источниками: электроны можно отбрасывать, правильно регулируя отклик эмульсии с точки зрения количества сенсibilизированных кристаллов на единицу длины пути, посредством химической обработки самой эмульсии. Более того, возможного улучшения мощности отклонения можно достичь, используя реакцию  $\beta$ -лучей на поляризованное рассеяние света или выполняя криогенное воздействие и используя эффект фона. Отдача, вызванная нейтронами, является основным источником фона, поскольку она неотличима от ожидаемого сигнала WIMP, за исключением изотропного углового распределения и типичной длины трека, значительно превышающей диапазон, ожидаемый для отдачи, вызванной WIMP. Три типа источников нейтронов влияют на подземные эксперименты: радиогенные нейтроны в диапазоне МэВ, образующиеся в  $(\alpha, n)$  и реакциях спонтанного деления в детекторе из-за его внутренних радиоактивных загрязнений, космогенные нейтроны с энергетическим спектром, простирающимся до энергий ГэВ, вызванные мюонами, проникающими под землю через скалу, нейтроны, вызванные радиоактивностью окружающей среды.

В то время как внешний поток нейтронов можно снизить до разумного уровня с помощью соответствующей защиты, внутренняя радиоактивность эмульсии будет отвечать за неснижаемый выход нейтронов через  $(\alpha, n)$  и реакцию спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ . Для оценки этого вклада активность U и Th в компонентах эмульсии была измерена с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) и гамма-спектрометрии. Обнаруживаемый нейтронно-индуцированный фон оценивается примерно в 0,06 в год на килограмм [166], что позволяет спроектировать детектор для экспозиции 10 кг-год без какой-либо дополнительной очистки.

## 15.2 Считывание и обработка эмульсии

Эксперимент использует твердотельную мишень для прямого поиска частиц темной материи с помощью высокочувствительных ядерных эмульсий с наноразмерными зернами с применением для их обработки сканирующих микроскопов с уникально высоким пространственным разрешением. Ядерная эмульсия представляет собой суспензию на основе желатина с равномерно распределенными по объему светочувствительными кристаллами галоидного серебра AgBr, являющимися “сенсорами” прохождения заряженных частиц. Вследствие ионизации, производимой пролетающей заряженной частицей, происходит восстановление катионов  $\text{Ag}^+$  на поверхности кристаллов AgBr, и после обработки проявителем “поврежденные” кристаллы образуют конгломераты атомов металлического серебра, различимые под микроскопом в виде черных зерен. В результате возникает цепочка проявленных зерен серебра, которая воспроизводит траекторию движения частицы.

Треки, выбранные с помощью анализа формы, были проверены с помощью рентгеновского микроскопа. Эта техника отличается более высоким разрешением (порядка 60 нм), но более медленной скоростью сканирования по сравнению с оптической микроскопией. Анализ нескольких сотен  $\mu\text{м}^2$  занимает около 100 с. Поэтому рентгеновскую микроскопию можно использовать только для проверки образца уже выбранных треков-кандидатов: рентгеновский анализ использовался для демонстрации принципа отбора с помощью анализа эллиптической формы и измерения эффективности, достижимой с помощью оптической микроскопии. Сравнение оптических и рентгеновских изображений треков-кандидатов представлено на рисунке 15.2. Высокое разрешение рентгеновского микроскопа позволяет разрешать зерна, принадлежащие субмикрометрическим трекам, тем самым обеспечивая окончательное различие между сигналом и фоном.

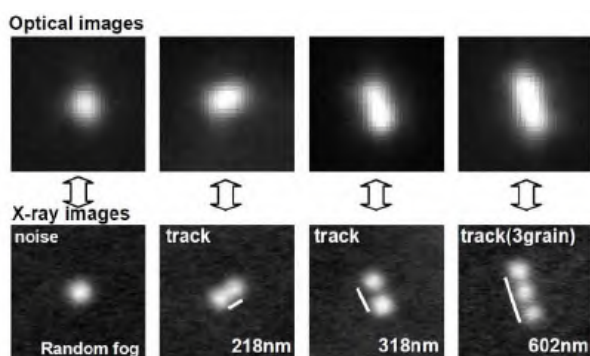


Рисунок 15.2 — Сравнение реконструированных треков длиной в несколько сотен нанометров с помощью оптического микроскопа и рентгеновского микроскопа

Система обработки эмульсий, использующая алгоритм непрерывного сканирования, позволяет увеличить скорость сканирования до более чем 200 см<sup>2</sup>/час. Поскольку при такой скорости резко увеличивается объём данных, подлежащих обработке и анализу, основная обработка должна производиться в режиме реального времени. Это требует значительных вычислительных мощностей, использование которых возможно только при создании распределенной вычислительной системы. Определяющим элементом такой системы является программный модуль, позволяющий узлам системы обмениваться большими массивами данных с высокой скоростью и надежностью.

Первые результаты анализа эксперимента показывают, что построенная система считывания данных [167] демонстрирует принципиально новый подход к обработке эксперимента в нанометрическом диапазоне, совмещая мощную цифровую апертуру объектива микроскопа со световым поляризатором, и обеспечивает высокое пространственное и пиксельное разрешение, а также контрастность и яркость изображения, необходимые для надежной регистрации наноразмерных треков, образованных зернами металлического серебра в ядерной эмульсии.

## 16 Изучение физических условий в газе в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности, создаваемых гало темной материи и первичными черными дырами, и расчет поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см нейтрального водорода

Для расчета поглощения в линии 21 см на звуковой волне исследована структура волны вокруг сферически-симметричного возмущения плотности в темной материи (ТМ). Гравитация от избытка плотности ТМ действует на барионный газ, и он растекается от центра медленнее, чем по закону Хаббла. Такой избыток плотности в барионах мы называем звуковой волной. В работе [168] представлено линеаризованное уравнение для эволюции возмущений только в барионах. Мы используем похожую методику, но рассматриваем двухкомпонентную среду из ТМ и барионного газа. Такая двухкомпонентная среда рассматривалась в работе [169], но только в линейном приближении для обоих компонент и на красных смещениях  $z > 150$ . Мы рассматриваем эпоху  $z < 150$ , когда прекращается подогрев барионного газа за счет рассеяния фотонов. Если обобщить проведенный в работе [168] вывод уравнения для эволюции сферически-симметричных возмущений в барионном газе с учетом наличия ТМ, то можно получить следующее уравнение

$$\frac{\partial^2 \delta_B}{\partial t^2} + 2H \frac{\partial \delta_B}{\partial t} = 4\pi G(\Delta\rho_D + \Delta\rho_B) + \frac{v_s^2}{a^2} \left( \frac{\partial^2 \delta_B}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \delta_B}{\partial x} \right), \quad (16.1)$$

где  $\delta_B = \Delta\rho_B/\bar{\rho}_B$  – возмущение плотности барионного газа,  $\Delta\rho_D$  – отклонение плотности ТМ от средней космологической плотности  $\bar{\rho}_D$  (и аналогичные величины  $\Delta\rho_B$  и  $\bar{\rho}_B$  для барионов),  $a(t)$  – масштабный фактор Вселенной,  $H(t)$  – постоянная Хаббла,  $x = r/a(t)$  – сопутствующая координата,  $v_s \simeq [5k_B T(z)/(3m_p)]^{1/2}$  – скорость звука,  $T(z)$  – температура газа,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $m_p$  – масса протона.

Важное отличие уравнения (16.1) от уравнения, полученного в [168], заключается также в том, что мы линеаризовали уравнение во всех частях, за исключением источника гравитационного поля  $4\pi G(\Delta\rho_D + \Delta\rho_B)$ . В нашем случае он может быть и нелинейным. Нелинейным источником называется сгущение ТМ (гало), которое приближается к стадии вириализации или уже вириализовалось,  $\Delta\rho_D/\bar{\rho}_D \geq 1$ . Эволюцию ТМ, которая служит источником гравитации для барионов, мы рассматриваем в линейном и в нелинейном режиме с помощью решения для сферической “top-hat” модели. Но предполагается, что звуковая волна в барионном газе линейная,  $\delta_B \ll 1$ . Насколько нам известно, в данном комбинированном подходе уравнение (16.1) раньше не рассматривалось.

В задаче рассматриваются красные смещения  $z \leq z_1 = 150$ , когда газ охлаждается адиабатически по мере расширения Вселенной. Индексом “1” отмечаются

величины при  $z = z_1$ . Уравнение (16.1) сводится к уравнению с постоянными коэффициентами путем замены переменных  $\eta = 1 - t_1^{1/3}/t^{1/3}$ ,  $s = \delta_B/x$ :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial \eta^2} - w_s^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = f(\eta, x), \quad (16.2)$$

где  $w_s = 3v_1 t_1 / a_1^2$ ,

$$f(\eta, x) = \frac{6x}{(1-\eta)^2} \frac{\Delta \rho_D}{\bar{\rho}_D}, \quad (16.3)$$

и  $v_1$  – скорость звука  $v_s$  в газе в момент  $z_1$ . Введем также обозначения  $r_s = 3v_1 t_1 \simeq 60$  пк,  $M_s = (4\pi/3)r_s^3 \rho_D(t_1) \simeq 10^5 M_\odot$ . Величина  $M_s$  близка к массе Джинса.

Общее решение уравнения (16.2) следует из формулы Даламбера с четным продолжением  $f(\eta, x)$  на отрицательную полупрямую. Эволюция избытка плотности темной материи  $\Delta \rho_D$  в нелинейной области описывается с помощью известных параметрических зависимостей в сферической модели. Итоговое решение для звуковой волны принимает вид суммы сходящейся и расходящихся волн

$$s(\eta, x) = \frac{3}{2w_s} \int_0^\eta d\tau \frac{1}{(1-\tau)^2 \beta(\tau)} \frac{\Delta \rho_D(\tau)}{\bar{\rho}_D(\tau)} \left[ e^{-\beta(\tau)[x-w_s(\eta-\tau)]^2} - e^{-\beta(\tau)[x+w_s(\eta-\tau)]^2} \right]. \quad (16.4)$$

Сходящаяся часть волны требуется для правильного представления плотности и скорости вблизи  $x = 0$ . Путем расчета декремента затухания, можно показать, что в эпоху Темных веков условия таковы, что звуковая волна успевает распространиться на расстояние, в десятки и сотни раз большее размеров гало ТМ до того, как затухнет в  $e$  раз, т.е. для рассматриваемой задачи затухание не важно.

На рисунке 16.1 показан результат расчета плотности в звуковой волне, когда в качестве величин начальных возмущений  $\delta_{\text{eq}}$  взяты среднеквадратичные возмущения для спектра возмущений, нормированного на данные спутника Планк. Для гало с меньшими массами возмущение в газе меньше, но эволюционирует оно более резко. Это объясняется тем, что менее массивные гало вириализуются рано, а возмущения с  $M_D \sim M_s$  на красных смещения  $z \sim 10-15$  в среднем еще только начинают выходить на нелинейную стадию.

Для расчета поглощения в линии 21 см необходимо вычислить поле пекулярных скоростей в звуковой волне. Из уравнения непрерывности можно найти пекулярные скорости газа, т.е. отклонения скоростей от хаббловского закона

$$v_B = -\frac{1}{\bar{\rho}_B r^2} \int_0^r dr r^2 \left[ \frac{\partial \delta \rho_B}{\partial t} + 3H \delta \rho_B + Hr \frac{\partial \delta \rho_B}{\partial r} \right]. \quad (16.5)$$

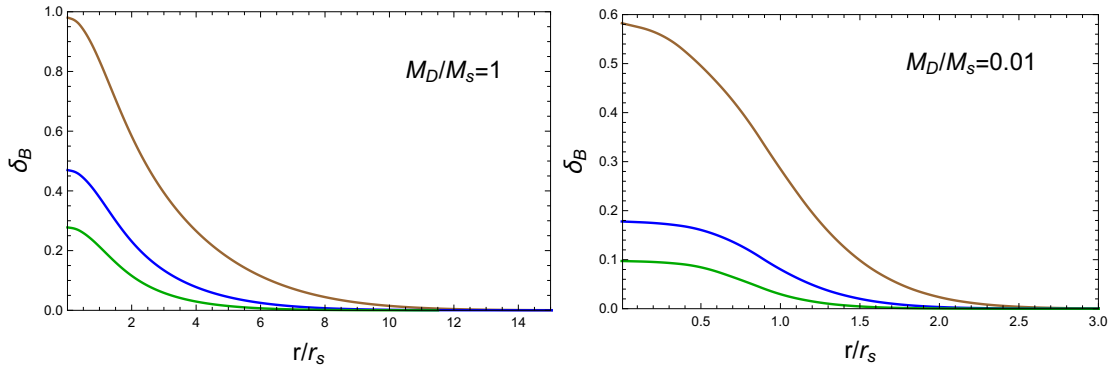


Рисунок 16.1 — Плотность в звуковой волне в зависимости от красного смещения  $z = 10, 15$  и  $20$  (сверху вниз) для масс объекта из темной материи  $M_D = M_s$  (слева) и  $M_D = 0.01M_s$  (справа)

Результат расчета пекулярных скоростей показан на рисунке 16.2.

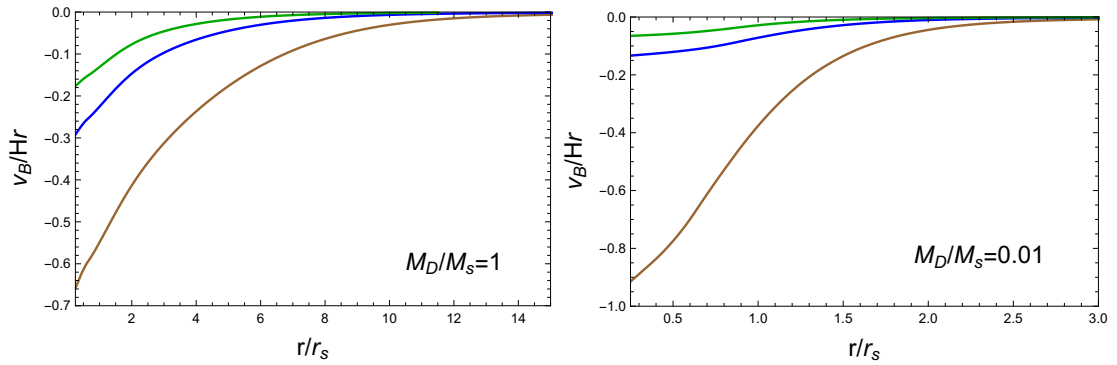


Рисунок 16.2 — Пекулярная скорость в звуковой волне в зависимости от красного смещения  $z = 10, 15$  и  $20$  (снизу вверх) для масс объекта из темной материи  $M_D = M_s$  (слева) и  $M_D = 0,01M_s$  (справа)

Для объектов, масса которых составляет порядка 1% от джинсовской массы, пекулярная скорость оказывается больше, чем для объектов с джинсовской массой, что также связано с более ранним выходом маломассивных объектов на нелинейную стадию. Но если рассмотреть еще более легкие объекты с  $M_D < 0,01M_s$ , то пекулярные скорости уменьшаются из-за уменьшения гравитационного потенциала.

Рассчитаем поглощение в линии 21 см на звуковых волнах. Величина поглощения дается известным выражением, зависящим от градиента пекулярной скорости [35]. Мы производим интегрирование по объему отдельной звуковой волны вокруг одного объекта и затем усредняем по многим объектам.

Предварительно вычисляется градиент пекулярной скорости вдоль луча зрения. При интегрировании этой величины по сферически симметричному или по эллипсоидальному объекту первые степени скорости сокращаются, и вклад дают толь-



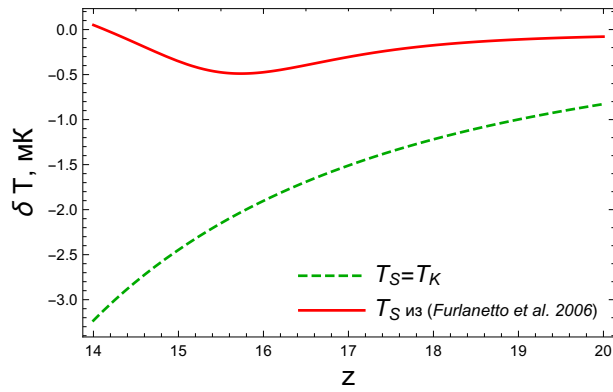


Рисунок 16.3 — Глубина поглощения в линии 21 см в зависимости от красного смещения. Верхняя сплошная кривая показывает поглощение для спиновой температуры, рассчитанной в работе [35]. Нижняя штрихованная кривая соответствует случаю, когда спиновая температура равна кинетической температуре газа

ко квадратичные слагаемые. Усреднение по пространству зависит от расстояния между ближайшими объектами и от максимального радиуса разбегания звуковых волн.

На рисунке 16.3 представлен результат расчета для консервативного случая со спиновой температурой, приведенной в работе [35] и соответствующей умеренному УФ-излучению первых звезд, и для наиболее оптимистического случая, когда спиновая температура равна кинетической температуре газа  $T_s = T_K$ . Как и ожидалось, эффект поглощения на звуковых волнах очень мал. Для  $z > 15$  он составляет десятые и сотые доли процента от величины поглощения в однородной Вселенной, а на  $z < 15$  величина поглощения составляет несколько процентов в оптимистическом случае и десятые доли процента в указанном консервативном случае.

Результаты данного исследования опубликованы в работе [170].

## 17 Эксперимент JUNO

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) — международный комплексный многозадачный эксперимент в нейтринной физике и астрофизике частиц. Одной из основных задач эксперимента JUNO является, в первую очередь, измерение иерархии масс нейтрино. Подземная лаборатория эксперимента на глубине  $\sim 650$  м (глубина потолка подземной лаборатории) находится на расстоянии  $\sim 53$  км от реакторных комплексов Тяньшань (2 реактора мощностью 4,6 ГВт каждая) и Янцзян (6 реакторов, 2,9 ГВт каждая), общая мощность реакторов 26,6 ГВт. Указаны тепловые мощности реакторов. Ожидаемый поток мюонов космических лучей на глубине эксперимента составляет  $4,1 \times 10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Центральный детектор эксперимента окружен водным черенковским детектором вето, который также служит и в качестве пассивной защиты от радиоактивности окружающей породы. Эффективность регистрации мюонов космических лучей превышает 99,5%. Кроме этого, верхняя часть водного черенковского детектора вето ( $\sim 60\%$  площади) будет покрыта пластиковым трековым сцинтилляционным детектором вето, определяющим направление прихода мюонов с точностью 0,2 градуса. Центральный детектор — это 20 ктонн жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) со сцинтилляционными добавками PPO и bis-MSB с концентрациями 2,5 г/л и 1,4 мг/л соответственно в акриловой сфере толщиной 12 см и диаметром 35,4 м. Центральный детектор помещается в бак диаметром 43,5 м и высотой 44 м, наполненный ультра чистой водой. Жидкий сцинтиллятор просматривают 17 612 крупногабаритных (20-дюймовых) фотоумножителя (MCP-PMT производства NNVT Co., Китай, и R12860 производства Hamamatsu Photonics, Япония) и 25 600 малогабаритных (3-дюймовых) фотоумножителей (XP72B22 производства HZC Photonics, Китай). Такая “двойная калориметрия” на основе двух систем фотоумножителей позволяет получить средний световыход детектора  $\sim 1345$  фотоэлектронов на 1 МэВ при среднем уровне покрытия детектора фотокатодами 77,9%. При таком световыходе достигается рекордное энергетическое разрешение эксперимента  $\leq 3\%/ \text{МэВ}$ , необходимое для решения задачи определения иерархии масс нейтрино. Кроме того в водном черенковском детекторе вето ( $\sim 40$  килотонн ультра чистой воды) и детекторе OSIRIS (20-тонный жидкосцинтилляционный детектор контроля в режиме онлайн во время осуществления заливки жидкого сцинтиллятора в центральный детектор внутренней радиоактивности сцинтиллятора) используются  $\sim 2500$  крупногабаритных 20-ти дюймовых фотоумножителей R12860 производства Hamamatsu Photonics, Япония.

Также для улучшения чувствительности эксперимента JUNO ведутся работы по созданию ближнего детектора ТАО, который располагается в непосредственной близости ( $\sim 44$  м) от одного из реакторов комплекса Тайшань. Активной мишенью

ближнего детектора ТАО служит жидкий сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола с небольшой добавкой DPnB (Dipropylenglykol-n-butylether). Общая масса сцинтиллятора составляет 2,8 тонны. В качестве сцинтилляционных добавок используются PPO и bis-MSB с концентрациями 3 г/л и 2 мг/л соответственно. События в жидком сцинтилляторе регистрируются кремниевыми фотоумножителями. Гадолиний добавлен ( $\sim 0,1\%$  по массе) для увеличения эффективности регистрации реакторных нейтрино. DPnB (Dipropylenglykol-n-butylether) ( $\leq 1\%$  по массе) добавляется для сохранения вязкости линейного алкилбензола и достаточного уровня растворимости сцинтилляционных добавок при низких температурах. Общая площадь чувствительных поверхностей кремниевых фотоумножителей составляет  $\sim 10 \text{ м}^2$ , ( $\sim 4000$  кремниевых фотоумножителей), покрывая  $\sim 95\%$  поверхности сцинтилляционного детектора. Эффективность регистрации фотонов кремниевыми фотоумножителями на длине волны, соответствующей максимуму излучения жидкого сцинтиллятора ( $\sim 430 \text{ нм}$ ), составляет  $50\%$ . Это обеспечивает световыход в 4,5 раза больше, чем в Центральном детекторе эксперимента JUNO, т.е.  $> 6000$  фотоэлектронов на 1 МэВ. В детекторе ТАО жидкий сцинтиллятор и кремниевые фотоумножители будут работать при температуре  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Световыход сцинтиллятора при этой температуре превышает на  $\sim 20\%$  световыход этого сцинтиллятора при комнатной температуре. Скорость счета импульсов темнового тока кремниевых фотоумножителей уменьшается до  $\sim 100 \text{ Гц/мм}^2$  при  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Исследованы основные параметры жидкого сцинтиллятора и кремниевых фотоумножителей при температуре  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Основные результаты, полученные в 2024 году.

— Успешно завершён монтаж всех 17 612 крупногабаритных 20-дюймовых фотоумножителей Центрального детектора. Полностью установлены и все 25 600 малогабаритных 3-дюймовых фотоумножителей Центрального детектора. Смонтированы все 20-дюймовые фотоумножители водного черенковского детектора вето Центрального детектора и установки OSIRIS.

— Детектор OSIRIS полностью заполнен двадцатью тоннами жидкого сцинтиллятора. Полностью заполнен и водный черенковский детектор вето установки OSIRIS. Успешно протестированы герметичности жидкосцинтилляционного детектора и водного черенковского детектора установки.

— Произведены тестовые включения всех фотоумножителей (крупно- и малогабаритных) Центрального детектора, водного черенковского детектора и установки OSIRIS. Выполнены первые измерения содержания радона в установке.

## 18 Поиск стерильных нейтрино в области масс 0,1-10 кэВ в бета-распаде трития

Разработан прототип детектирующей части на основе цилиндра Фарадея и пикоамперметра Keithley 6430. Проведена оптимизация шумов измерительного тракта, которые при токе 2пА оказались всего на фактор 2,5 больше теоретического предела. Адаптирован и изготовлен механизм ввода детектора в сверхпроводящий соленоид установки «Троицк ню-масс». 2-4 декабря 2024 г. Были проведены пробные измерения спектра бета-распада трития и опробованы методы компенсации медленных дрейфов сигнала.

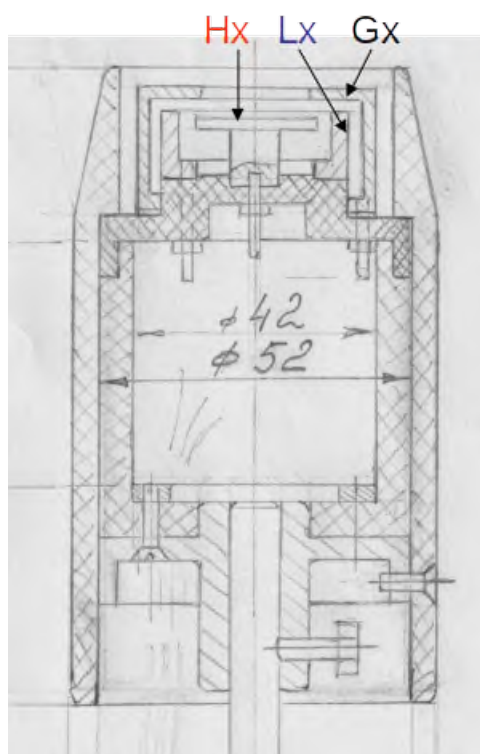


Рисунок 18.1 — - схема детектора, Hx – высокопотенциальный электрод (поглотитель бета-частиц), Lx – низкопотенциальный электрод (компенсатор шумов), Gx – заземленный, защитный электрод, служащий коллиматором бета-частиц и электромагнитным экраном

Цилиндр Фарадея в качестве детектора был выбран по нескольким соображениям. Прежде всего, в металле не приходится ожидать накопления зарядов, приводящих к накоплению объемного заряда, искажению внутреннего электрического поля и, как следствие, дрейфу эффективности регистрации. Изменение потенциала детектора при изменении загрузки пренебрежимо мало по сравнению с энергией регистрируемых частиц и не должно как-то влиять на электростатику детектора. Цилиндр Фарадея прост по конструкции и не требует охлаждения до криогенных



Рисунок 18.2 — Детектор в сборе



Рисунок 18.3 — Узел ввода детектора в сверхпроводящий соленоид, в центре SHV-разъём для вывода сигналов детектора, слева разъём типа ШР для вывода сигналов датчиков температуры и магнитного поля, в центре и слева вакуумные разъёмы для откачки

температур. Современные достижения в области измерения малых токов исключают необходимость усиления сигнала при регистрации  $\beta$  распадов трития.

Современные пикоамперметры предполагают трехпроводную схему подключения. Соответственно, детектор спроектирован с тремя основными электродами (рисунок 18.1). Свободный объем под детектором зарезервирован для размещения датчиков температуры и магнитного поля. Бета частицы движутся вертикально сверху вниз в постоянном магнитном поле масштаба 2 Тл. Собранный детектор представлен на рисунке 18.2.

В 2024 году был адаптирован и изготовлен узел ввода детектора в сверхпроводящий соленоид детекторной части спектрометра «Троицк ню-масс».

Современные пикоамперметры имеют три входных клеммы: высокопотенциальная (Hx - High), низкопотенциальная (Lx - Low) и защитная (Gx - Guard). Со-



Рисунок 18.4 — Узел ввода детектора в сверхпроводящий соленоид, в центре SHV-разъём для вывода сигналов детектора, слева разъём типа ШР для вывода сигналов датчиков температуры и магнитного поля, в центре и слева вакуумные разъёмы для откачки

ответственно, сигнал снимается триаксиальным кабелем, но в настоящее время он отечественной промышленностью не производится. Поэтому было решено использовать два коаксиальных кабеля для снятия сигналов  $H_x$  и  $L_x$  по центральным жилам и  $G_x$  по оплеткам, см. рисунок 18.3. Такое включение уменьшает емкость кабеля между входами  $H_x$  и  $L_x$ , которая сильно влияет на шумы пикоамперметра.

Шумы системы детектор – пикоамперметр Keithley 6430 исследовались в узле ввода детектора в сверхпроводящий соленоид (рисунок 18.4) при атмосферном давлении. Сигналы детектора выводились через вакуумный SHV разъём кабелями SHV-BNC длиной 15 см. В коммутационной коробке BNC разъёмы были подпаяны к триаксиальному кабелю длиной 15 см производства КНР, который в свою очередь подключался к входу удаленного предусилителя пикоамперметра Keithley 6430. Помимо кабеля РК50-2 использовался antivибрационный кабель АВК-6. Сравнивались кабели SHV-BNC длиной 15 и 150 см. Также менялись местами на входе пикоамперметра  $L_x$  и  $G_x$  сигналы.

Исследование чувствительности проводилось с использованием высокостабильного источника электронов установленного на расстоянии 10 мм от детектора в узле ввода детектора в сверхпроводящий соленоид. Объем откачивался до уровня  $10^{-4}$  мбар, что сводило практически к нулю эффекты ионизации остаточного газа. На источник электронов подавалось смещение -300В для моделирования влияния магнитного поля на траектории электронов.

Обработка сигнала проводилась сглаживанием сигнала по времени (1, 2, 5 и 10 минут) и фильтрацией выбросов показаний (0,2%) данных). Усреднение в течении

1 минуты, что эквивалентно введению фильтра высоких частот на уровне 8,3 мГц, практически устраняет влияние шумов на сигнал.

Предел случайного разброса величины измеряемого тока определялся дробовым шумом (shot noise), который связан с Пуассоновскими флуктуациями количества электронов зарегистрированных за одно измерение (0,63 сек). Таким образом, при токе на уровне 2 пА, уровень шумов всего лишь примерно в 2,6 раза превышает теоретический предел.

2-4 декабря 2024 интегральный детектор, установленный в механизме перемещения был успешно введен в сверхпроводящий соленоид спектрометра «Троицк-ню-масс». Были проведены пробные измерения спектра бета-распада трития и моделировалась схема набора данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

**1 Задача "Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц. Разработка необходимого математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля и теорий за рамками стандартной модели"**

**1.1 Численное моделирование эволюции системы доменных стенок в расширяющейся Вселенной и оценка спектра образуемых ими гравитационных волн**

Используя общедоступный код CosmoLattice, проведено численное моделирование сети космических доменных стенок и создаваемых ими гравитационных волн в радиационно-доминированной Вселенной в зеркально-симметричной модели скалярного поля. Детально исследована эволюция доменных стенок как до, так и после достижения скейлингового режима. Показано, что общая площадь замкнутых стенок пренебрежимо мала по сравнению с площадью одной длинной стенки, простирающейся по всей области моделирования, а значит несущественны для общей динамики. Это контрастирует со случаем космических струн, где именно образование петель поддерживает систему в режиме скейлинга. Вычисленный спектр образующихся стенками гравитационных волн неплохо согласуется с недавними результатами работ, в которых используются другие численные коды. В спектре обнаружены пик на хаббловском масштабе, экспоненциальный спад для частот, меньших обратной ширины стенки, и плато в промежуточных масштабах. Исследована чувствительность полученных результатов к выбору начальных условий: различные типы начальных условий приводят к качественно сходной эволюции доменных границ в режиме масштабирования, но с существенными вариациями, приводящими к различной интенсивности образования гравитационных волн.

**1.2 Перспективы экспериментального исследования физики элементарных частиц на проектируемой Супер-Чарм-Тау-Фабрике**

Закончен обзор технической части проекта и физической программы нового эксперимента на Супер-Чарм-Тау-Фабрике фабрике, в основе которой должен стоять высокоточный электрон—позитронный коллайдер со светимостью порядка  $10^{35} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$  и энергией в системе центра масс в области 3-5 ГэВ. Представлена реалистичная конфигурация детектора, который обеспечит необходимую для полной реализации физической программы уровень точности измерений. Показана важная роль использования продольной поляризации электронного пучка и рекордной яркости для успешной конкуренции с работающими по схожей физической программе



установками Belle II и LHCb. Представлена обширная физическая программа, среди прочего включающая исследование свойств и измерение физических параметров очарованных адронов,  $\tau$ -лептонов, чармония и экзотических многокварковых состояний, а также изучение образования легких адронов при электрон-позитронной аннигиляции и в двухфотонных процессах. Помимо высокоточного тестирования предсказаний СМ и уточнения величин её фундаментальных параметров на установке планируется всесторонний поиск новой физики. Примеры показывают хороший потенциал открытия по многим реалистичным моделям, в частности, с новыми лёгкими частицами.

### **1.3 Долгоживущие сголдстино в нейтринных телескопах**

Найдена область пространства параметров суперсимметричной модели с новыми легкими частицами из сектора, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии, к которой чувствителен проект HyperKamiokande. Результаты этой работы готовятся к публикации.

### **1.4 Рождение тёмных фотонов в процессе упругого тормозного излучения протона с ненулевым переданным импульсом**

Учитывая ненулевую передачу импульса между протонами мишени и падающего пучка, найдено сечение упругого тормозного излучения протона. Проверено, что полученный результат хорошо согласуется с сечением данного процесса в рамках приближения Вайцзеккера-Вильямса [11]. Кроме того, получено согласие нашего результата с сечением упругого тормозного излучения при обмене векторным помероном [7], если в последнем не учитывать феноменологический адронный формфактор. Выявлены существенные отличия от широко используемого в оценках чувствительности планируемых экспериментов по поиску тёмного фотона результата Блюмляйна и Брюннера [6]. Таким образом, впервые показана применимость приближения Вайцзеккера-Вильямса не только для бесструктурных фермионов, но и для протона. Получены предсказания для уточненного сечения упругого тормозного излучения для энергий пучка 30 ГэВ (J-PARC), 70 ГэВ (У-70), 120 ГэВ (Fermilab) и 400 ГэВ (CERN SPS). Результаты опубликованы в работах [171, 172].

### **1.5 Перспективы проекта NICA по поиску новой физики: модель с темным фотоном и аксионоподобной частицей**

В процессе решения задачи был вычислен ожидаемый сигнал частиц НФ на NICA MPD. Были рассмотрены две модели: с темным фотоном и с ALP. Для каждой было вычислено ожидаемое число рожденных частиц и представлены области параметров, к которым может быть чувствителен проект NICA MPD после модернизации внутренней трековой системы. Результаты опубликованы в статье [173].

## **1.6 Поиски астрофизических проявлений аксионов и аксионоподобных частиц**

В результате анализа различных астрофизических процессов и явлений (распространения излучения от космического гамма-всплеска, направлений прихода космических лучей сверхвысоких энергий, сравнения диффузных потоков нейтрино и фотонов, эволюции звезд в шаровых скоплениях) были получены ограничения на параметры аксионоподобных частиц, в том числе наиболее строгие в мире ограничения на аксион-электронное взаимодействие. Все проведенные анализы указывают на одну область значений параметров аксионоподобной частицы – массы и константы взаимодействия с фотоном.

## **1.7 Резонансная генерация электромагнитных мод в нелинейной электродинамике: квантовый подход**

Мы применили технику квантовых пертурбативных расчетов для электромагнитного поля с нелинейным 4-фотонным взаимодействием в замкнутой полости. Мы вычислили амплитуды и вероятности элементарных процессов слияния  $3 \rightarrow 1$  и рассеяния  $2 \rightarrow 2$ . Мы проясняем два момента, которые остались неясными в классическом расчете согласно эффективной теории поля [20]. Во-первых, матричные элементы для генерации третьей гармоники и комбинационных мод «плюс» зануляются, поскольку матричные элементы в разложении плоской волны содержат только скалярные произведения импульсов, которые исчезают при наличии лоренцевой инвариантности. Во-вторых, мы даем ясную квантовую интерпретацию для генерации «минус» моды сигнала взаимодействием двух мод накачки. Таким образом, оказывается, что решающим элементарным процессом является процесс  $2 \rightarrow 2$  в терминах квантов. Общая амплитуда не равна нулю, поскольку когерентные состояния, описывающие классические волны, содержат флуктуирующее число квантов, поэтому общее число не должно сохраняться. По результатам работы была опубликована статья [174]

## **1.8 Ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности кубического типа в квантовой электродинамике из формирования фотонных атмосферных ливней**

Были получены ограничения на масштаб энергии нарушения ЛИ для фотонов с кубическим дисперсионным соотношением из недавних наблюдений гамма-излучения в диапазоне энергий 100 ТэВ–ПэВ по данным обсерватории LHAASO. Предполагая модель эффективной теории поля Майерса–Поспелова, мы получили подавление для процесса Бете–Гайтлера, который в основном отвечает за формирование атмосферных ливней, инициированных фотонами. Сравнивая события высокоэнергетических фотонов с предсказанным в рамках модели с нарушенным ЛИ потоком, мы получили ограничения на масштаб нарушения ЛИ с 95% доверительным интер-

валом. Полученное ограничение на массу нарушения ЛИ  $E_{\text{LIV}} \sim \mathcal{O}(10^{20} - 10^{21})$  ГэВ значительно слабее существующих ограничений [22], полученных при учёте процесса вакуумного двойного лучепреломления, но является независимым. По результатам работы была опубликована статья [175].

## **2 Задача "Построение новых теорий и моделей, предсказывающих существование частиц – кандидатов на роль темной материи Вселенной. Разработка математического аппарата для описания моделей квантовой теории поля"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

### **2.1 Галактическая темная материя, состоящая из стерильных нейтрино, с массами несколько кэВ по данным NuSTAR после 11 лет работы**

В рамках данной задачи был исследован и вычислен сигнальный поток от распадов стерильных нейтрино, для различных профилей распределения темной материи в нашей Галактике, который может быть получен по данным 11 летних наблюдений телескопа NuSTAR. Вместе с этим был проведен анализ рентгеновских спектров и сравнение данных наблюдений с теоретическими предсказаниями. Это позволяет серьезно ограничить параметры стерильных нейтрино с массами несколько кэВ по данным рентгеновских наблюдений NuSTAR. Работа [56] находится на рецензии в журнале Phys. Rev. Lett.

### **2.2 Поиск скалярных медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью**

Найдена область пространства параметров легкой темной материи, которая взаимодействует в частицами стандартной модели при помощи медиатора спина-0. Оценена чувствительность эксперимента NA64 к поиску таких частиц. Работы по данной задаче опубликованы в статьях [57, 58].

### **2.3 Теоретическое и феноменологическое исследование партонных распределений и глубоконеупругих структурных функций в протонах, нейтронах и ядрах**

Проведен глобальный КХД-анализ с включением ГНР данных по легким ядрам, в котором одновременно определяются ПР в протоне и параметры, характеризующие изменения ПР в связанных нуклонах [59]. Использование экспериментальных данных по легким ядрам в КХД-анализе позволяет существенно снизить неопределенность в распределении d-кварка в протоне в области больших значений бьеркеновской переменной  $x$ . Показано, что предсказания модели ядерных ГНР структурных функций и ПР, разработанной в ИЯИ РАН, отлично согласуются с новыми измерениями ядерного EMC эффекта в эксперименте MARATHON [60]. Результаты являются

уникальными и будут применены для анализа партонных распределений в тяжелых ядрах, используя микроскопическую модель. Проведен глобальный анализ партонных распределений в протоне в порядках NLO и NNLO по константе сильного взаимодействия [61] с включением новых данных эксперимента SeaQuest по сечениям ДЯ- процесса на дейтроне и протоне. Показано, что такой анализ позволяет уменьшить неопределенности в определении распределений  $u$ - и  $d$ -антикварков и улучшить ограничения на  $u$ - $d$  асимметрию в кварковом море протона при больших  $x$ .

#### **2.4 Теоретическая поддержка нейтринного эксперимента DUNE**

В рамках программы тестирования ближнего детектора нейтринного эксперимента с длинной базой DUNE, измерены полное неупругое сечение заряженных каонов на ядрах аргона при энергии пучка в интервале 5-7.5 ГэВ [176], проведен анализ 25 миллиона событий вызванных космическими лучами [177]. Опубликовано подробное описание технических решений для LArTPC системы дальнего детектора эксперимента DUNE [178].

#### **2.5 Рост аксионных звезд**

Было показано, что существенная доля аксионных миникластеров может сконденсироваться, образовав Бозе-звезды, которые в модели с темными аксионами КХД должны иметь астероидные массы и размеры около 100 км. Результаты работы опубликованы в статье [62].

#### **2.6 Применение метода эффективного потенциала для стационарных задач в квантовой теории поля**

Модель Фридберга–Ли–Сирлина — это известная перенормируемая теория скалярных полей, которая допускает существование нетопологических солитонов. В рамках развития этой модели были изучены ее классические решения и их свойства для применения в различных задачах физики частиц и космологии. В работе [179] было изучено то, как  $Q$ -шары в эффективной теории поля воспроизводят нетопологические солитоны в полной теории ФЛС. Было получено аналитическое описание упрощенной модели и приведено сравнение результатов с численными расчетами и теорией возмущений. Мы также изучаем конденсацию заряженных бозонов на доменной стенке. Последний анализ основан на применении методов ЭТ к существенно неоднородным конфигурациям. Была дана интерпретация результатов в терминах смещенной массы бозона и перестройки вакуума.

Был проведен анализ УФ поправок модели ФЛС в квантовой теории поля. Было показано, что в УФ пределе можно проанализировать нетопологические солитоны в тонкостенном приближении. Однопетлевой эффективный потенциал в перенормируемой модели ФЛС был построен в предположении иерархии масс. С помощью специального выбора параметров было изучено, как механизм Коулмена-Вайнберга

индуцирует новый массовый параметр  $\omega$  в классической модели ФЛС. Его можно интерпретировать в терминах устойчивого конденсата. Как следствие, асимптотическое поведение энергии нетопологического солитона при большом заряде изменяется с  $Q^{3/4}$  на линейный закон [180].

### **2.7 Фантомное скалярное поле в ОТО, приводящее к существованию кротовой норы с взаимодействующими устьями**

Опубликованы результаты решения задачи на начальные данные в ОТО плюс фантомное скалярное поле [181]. Решения описывают начальную конфигурацию кротовой норы, устья которой взаимодействуют друг с другом. Для случая симметричной по времени начальной гиперповерхности, решение, по сути, представляет собой 1-параметрическое расширение решения Мизнера для пары черных дыр. Описан метод позволяющий распространить полученные начальные данные на случай, когда в теорию добавлено электромагнитное поле.

### **2.8 Конформно инвариантная гравитация и гравитирующие миражи**

Построена модель феноменологического описания рождение частиц скалярным полем на основе действия для идеальной жидкости. Показано, что в законе рождения должны присутствовать не только уже хорошо известные комбинации, но и слагаемые, зависящие от плотности числа уже рожденных частиц. Это приводит к появлению гравитирующих миражей в тензоре энергии-импульса, которые в космологии могут описывать невидимую темную материю и невидимую часть реликтового излучения. Важно отметить, что в нашей модели возможно рождение частиц в однородных и изотропных космологических моделях, что абсолютно невозможно, если не учитывать обратное влияние на метрику пространства-времени не только тензора энергии-импульса уже рожденных частиц, но и самого процесса квантового рождения. Работа опубликована в журнале [72].

### **3 Задача "Изучение космологических решений в теории Хорндески"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В работе [73] был исследован новый подход к перенормировкам в КТП, основанный на дифференциальных уравнениях типа Каллана-Симанчика. Было произведено обобщение этого подхода на класс неперенормируемых теорий с операторами размерности шесть. Данный метод был использован для вычисления двух-, четырех- и шести- точечных вершинных функций, соответствующих аномальных размерностей и бета-функций, а также и поправки к эффективному потенциалу в однопетлевом приближении для конкретной выбранной неперенормируемой теории.

В данном подходе к перенормировкам не возникают расходимости ни на одном из этапов вычислений.

В работе [74] в модели сжимающейся Вселенной с сильной гравитацией в прошлом, построенной в [75], была вычислена негауссовость для первичных скалярных возмущений, или, более точно – нелинейный параметр  $f_{NL}$  негауссовости, и найдены новые условия на параметры модели из соответствующих наблюдательных данных [76] и [77]. Из результатов работы [74] можно сказать, что либо модель находится на грани закрытия, либо же можно провести более аккуратный анализ формы биспектра, уточнив таким образом ограничения на параметры модели, и сделать таким образом уже конечный вывод о жизнеспособности выбранной модели ранней Вселенной.

В работе [78] была доказана запрещающая теорема для несингулярных космологических решений без сверхсветовых скоростей в квадратичной теории Хорндески с кручением. Построено всюду устойчивое отскоковое решение, но со сверхсветовыми гравитонами на некоторой стадии. В работе [79] уже в кубической теории Хорндески с кручением построено устойчивое и досветовое решение в виде космологического отскока. Таким образом, показано, что в кубическом подклассе нет запрещающей теоремы.

В работе [80] построены возмущения в теории Хорндески над космологическим анизотропным фоном. Показано, что в простейших решениях без динамических скалярных возмущений при добавлении анизотропии появляется дух. В работе [81] исследован способ разрешения связей в скалярном секторе с помощью уравнений движения в ковариантном виде. Показано, что в сферически симметричном случае он работает только в линейном подклассе теории Хорндески.

В работе [82] Построена компактификация пятимерной теории Хорндески на окружность, показано, что результат является примером калибровочной теории с векторным галилеоном, а скорости фотона и гравитона совпадают в широком классе лагранжианов. В работе [83] продолжено исследование компактификации теории Хорндески, построен скалярный сектор теории и исследованы старшие лагранжианы теории, возникающие только в пятимерном пространстве.

#### **4 Задача "Проверка новых моделей с лёгкими гипотетическими частицами на установке NA64"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В 2024 году участники эксперимента NA64 в рамках общей исследовательской программы эксперимента успешно провели два сеанса набора данных: восьминедельный сеанс в апреле-июне на электронном пучке H4 ускорителя SPS на установке

NA64e и затем семинедельный сеанс в июле-сентябре на мюонном канале M2 ускорителя SPS на установке NA64 $\mu$ . В результате сеанса на канале H4 ускорителя SPS на установке NA64e в течение мая – июня 2024 г. было набрано около  $5,2 \times 10^{11}$  электронов на мишени. Предварительные результаты анализа данных свидетельствуют об их хорошем качестве и отсутствии фона, связанного с электророждением адронов в канале. В ходе сеанса на мюонном пучке на установке NA64 $\mu$  после наладки и калибровки был проведен набор данных с рабочими триггерами, зарегистрировано около  $10^{12}$  мюонов на мишени.

В эксперименте NA64 $\mu$  был выполнен первый поиск скрытого сектора материи с использованием высокоэнергетического мюонного пучка и метода определения недостающей энергии-импульса. Для полного набора данных, соответствующего  $(1,98 \pm 0,02) \times 10^{10}$  мюонов на мишени, в области ожидаемого сигнала не наблюдается событий. Это позволило установить новые ограничения на оставшееся пространство параметров  $(m_{Z'}, g_{Z'})$  – массы и константы связи нового векторного бозона  $Z'(L_\mu - L_\tau)$  с мюоном, которые могли бы объяснить аномалию магнитного момента мюона  $(g - 2)_\mu$ .

В эксперименте NA64h получены первые результаты проверки концепции поиска скрытого сектора частиц с помощью невидимых распадов псевдоскалярных  $\eta$  и  $\eta'$ -мезонов. Применяемый метод, предложенный сотрудниками ИЯИ РАН, использует зарядово-обменную реакцию при рассеянии пионов с энергией 50 ГэВ на ядрах активной мишени в качестве источника нейтральных мезонов. При анализе  $2,9 \times 10^9$  пионов на мишени никаких свидетельств событий реакции  $\eta, \eta' \rightarrow \text{invisible}$  обнаружено не было, что позволило установить строгое ограничение на относительную долю такого распада для  $\eta'$ -мезона  $Br(\eta' \rightarrow \text{invisible}) < 2,1 \times 10^{-4}$ , улучшив существующую границу примерно в 3 раза. Также установлено ограничение на  $Br(\eta \rightarrow \text{invisible}) < 1,1 \times 10^{-4}$ , сравнимое с существующим. Эти результаты по поиску скрытого сектора материи опубликованы в журнале Physical Review Letters (см. статьи [102] и [103]).

### **5 Задача "Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

По результатам 2024 года готовится статья в журнале Ядерная Физика и статья в журнале Приборы и Техника Эксперимента. По результатам измерений точных вариаций скорости счета одиночных электронов мы наблюдаем в первой серии систематическое превышение над средним в интервале времен от 8–00 до 12–00 звездного времени и во второй серии – с 18–00 по 22–00 звездного времени. В сол-

нечной системе координат подобного эффекта мы не наблюдаем. Вероятность, что этот эффект в первой серии есть результат чисто статистической флуктуации равен  $7,6 \times 10^{-10}$ , что соответствует достоверности выше  $6 \sigma$ . Вероятность, что этот эффект во второй серии есть результат чисто статистической флуктуации равен  $9,1 \times 10^{-6}$ , что соответствует достоверности выше  $4 \sigma$ . Для получения доказательной базы мы подключили к измерениям второй счетчик с алюминиевым катодом. Одновременное наблюдение эффекта в обоих счетчиках усилит нашу аргументацию в поддержку гипотезы существования темных фотонов.

## **6 Задача "Определение параметров осцилляций и иерархии масс нейтрино в эксперименте T2K"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работы в рамках международного нейтринного эксперимента T2K (Tokai-to-Kamioka), основной целью которого является определение параметров осцилляций (углов смешивания, разности квадратов масс и CP-нарушающей фазы) и иерархии масс нейтрино. Всего с начала 2010 г. по конец 2024 г. в T2K проведено 14 сеансов с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Новые сеансы по набору статистики проходили в ноябре-декабре 2023 г., феврале 2024 г. и мае-июне 2024 г. (№13), а также в ноябре-декабре 2024 г. (№14), причем в мае 2024 г. в ближнем детекторе ND280 был полностью установлен обновленный нейтринный детектор из SFGD, двух горизонтальных времяпроекционных камер НТРС и шести панелей ТоF. Был проведен обновленный анализ данных, набранных в ходе предыдущих сеансов (№№1-11), в котором удалось уменьшить систематические ошибки, связанные с дальним детектором. Получены результаты совместного анализа T2K-SK и T2K-NOvA.

## **7 Задача "Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино)"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В 2024 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работы в рамках международного эксперимента NA62, основной целью которого является измерение вероятности редкого распада положительно заряженного каона  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Был обеспечен набор новых данных для дальнейшего анализа. В течение 2024 г. был завершен анализ данных, набранных в 2021–2022 гг., и было проведено самое точное измерение вероятности распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Впервые в мире редкий распад  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  был обнаружен на уровне достоверности, превышающем  $5\sigma$ . Показана тенденция смещения измеренной вероятности от предсказания Стандартной модели. В 2024 г. сотрудники



ИЯИ РАН продолжали работы в совместном с НИЦ КИ-ИФВЭ и ОИЯИ каонном эксперименте ОКА на ускорителе У-70 в г. Протвино: принимали участие в сменах по набору данных и в анализе данных прошлых сеансов. Получены и опубликованы новые результаты для различных мод распада положительных каонов.

### **8 Задача "Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучком мюонных (анти)нейтрино"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Использование байесовского анализа позволило измерить величину  $\sin\theta_{23}$  и провести параметризационно-независимое измерение фазы нарушения CP-инвариантности. Показано, что учет возможных нестандартных взаимодействий нейтрино в незначительной степени улучшает результаты предыдущего анализа параметров осцилляций, полученных без учета этих взаимодействий. Предложен метод проверки ядерных моделей квази-упругого взаимодействия (анти)нейтрино с ядрами с использованием данных о приведенных сечениях рассеяния электронов. Его можно применять для тестирования спектральных функций и моделей взаимодействия нуклонов в конечном состоянии с остаточным ядром, которые используются в генераторах нейтринных событий. Результаты работы опубликованы в статьях [141, 137, 136].

### **9 Задача "Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Проведено два сеанса измерений энергетического спектра бета-электронов от распада трития. Обработан первый короткий сеанс. Набранная статистика показала, что процедура обработки спектров и учёт различных поправок правилен. Показано, что полученный на тот момент результат близок к уже опубликованным мировым данным. В ноябре закончен второй длительный набор статистики. Начата его обработка. В течение года проводилась модернизация отдельных частей вакуумной и криогенной аппаратуры.

### **10 Задача "Поиск 2К-захвата в $^{124}\text{Xe}$ "**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

С целью повышения эффективности отбора событий в области интересов ( $63,6 \pm 3,7$  кэВ) эксперимента по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  исследуется возможность применения алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных. В работе предлагается два разных метода: классификация и регрессия. Оба метода направлены на то, чтобы определить класс события по задаваемой на вход

функции. Для этого производится генерация модельных экспериментальных функций, являющихся аналогами сигналов с детектора. Для этого производится перебор  $3N$  параметров ( $N=1,2,3,4$ ) гауссовых функций: высота, ширина и положение каждой гауссовой функции. Решение данной задачи на основе классификации происходит при помощи сопоставления классов точкам в многомерном пространстве. Классы характеризуют истинное количество гауссовых функций, которыми была порождена модельная экспериментальная функция, и количество наблюдаемых пиков этой функции. Векторы из пространства, в котором происходит разделение классов, являются совокупностью значений, которые можно получать при помощи модельной экспериментальной функции: нормы от функции и её производных, и параметры, получаемые за счёт аппроксимации классическим алгоритмом (методом наименьших квадратов). Методы на основе регрессии основаны на сопоставлении векторов из того же многомерного пространства, что используются в классификации, истинным параметрам гауссовых функций из сгенерированной модельной выборки. Оба метода дают отличную точность на тестовой выборке: регрессия даёт 97,6% точности (параметр  $R$ -квадрат) при использовании метода случайного леса (сравниваются параметры заданной функции и параметры функции, которые получаются в результате регрессии), классификация — 95% точности при использовании метода ближайших соседей. Получение информации об истинных параметрах (результат регрессии) или номера класса (результат классификации) позволяет определить истинное количество гауссовых функций, что в свою очередь даёт информацию о классе события (одноточечное, двухточечное, трехточечное и т.д.). Выполненная работа легла в основу выпускной квалификационной работы «Изучение возможности применения машинного обучения для анализа данных эксперимента по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$ ».

### 11 Задача "Поиск безнейтринного двойного бета распада в составе $^{100}\text{Mo}$ международной коллаборации AMoRE"

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задаче вошли в число важнейших достижений Института в 2024 году.

Завершена обработка данных эксперимента AMoRE-I. Набор данных проводился в период с 2020 по 2022 гг. Для анализа были использованы данные с 17 кристаллов (полное число кристаллов 18 штук): 13 кристаллов  $^{48\text{depl}}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  и 4 кристалла  $^{\text{nat}}\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ . Суммарная экспозиция составила 8 кг/лет для  $\text{XMoO}_4$  (17 кристаллов), или 3,88 кг/лет для  $^{100}\text{Mo}$ . На основе полученных данных был рассчитан верхний предел для периода полураспада безнейтринного двойного бета-распада  $^{100}\text{Mo}$  -  $T_{1/2}^{0\nu 2\beta} > 2,9 \cdot 10^{24}$  лет (90% У.Д.) [182]. Это наилучшая оценка верхнего предела для периода полураспада безнейтринного двойного бета-распада  $^{100}\text{Mo}$ , и пре-

восходит предыдущий результат, полученный коллаборацией CUPID-Mo -  $T_{1/2}^{0\nu 2\beta} > 1,8 \cdot 10^{24}$  лет (90% У.Д.) [147]. Была проведена серия измерений активности радиоактивных примесей в конструкционных материалах низкофоновой защиты AMoRE-II, держателях LMO-кристаллов, элементах электроники, которые закрепляются в непосредственной близости LMO-кристаллов, а также некоторых LMO-кристаллах. Для этого было использовано оборудование для ICP-MS измерений, ионизационная камера для измерения поверхностной альфа-активности, ППД гамма-спектрометры. Для повышения чувствительности измерений, и получения более точных значений активности радиоактивных примесей в некоторых материалах (медь, сверхнизкофоновый свинец) была использована высокоэффективная система регистрации гамма-квантов на основе 14-ти ППД - "CAGe". Полученные результаты представлены в [183]

### **12 Задача "Поиск двойного безнейтринного бета распада $^{76}\text{Ge}$ в составе международной коллаборации GERDA и LEGEND"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Целью международного эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа  $^{76}\text{Ge}$  ( $0\nu\beta\beta$  распада). Эксперимент GERDA проводился в подземной лаборатории LNGS в Италии. В 2020 году набор данных эксперимента GERDA закончен, с этого времени продолжается обработка данных. В 2024 году получены и опубликованы новые результаты, подготовлены публикации, которые выйдут в 2025 году. Одновременно проводятся работы по созданию нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND. Установка LEGEND-200 (около 200 кг Ge детекторов) эксплуатируется в существующей инфраструктуре эксперимента GERDA в лаборатории LNGS в Италии и получены первые результаты.

### **13 Задача "Увеличение точности измерения угла смешивания $\theta_{13}$ осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

По результатам измерений двумя детекторами Double Chooz получено значение угла смешивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm 0,014$ . Это значение на одно стандартное отклонение превышает полученное в других аналогичных экспериментах (Daya Bay и RENO). Расхождение может объясняться не учетом в текущем анализе дополнительного излучения антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом. Напомним, что в эксперименте Double Chooz бассейны расположены в направлении ближнего детектора, относительно центров активной зоны ядерных

реакторов. Вклад в полные потоки, измеряемые детекторами отличается на 0,5%. В то время как в других экспериментах этот вклад не дает искажения в измеряемый угол смешивания, так как бассейны-отстойники находятся на том же расстоянии, что и активные зоны ядерных реакторов.

Был проведен расчет спектров антинейтрино от осколков, получаемых при делении тяжелыми изотопами. Расчет велся методом суммирования индивидуальных спектров осколков с варьированием формы  $u$  ядер с неизвестными схемами распада. При расчете производилось сравнение с экспериментальным спектром [158]. Получено хорошее согласие экспериментальных спектров антинейтрино делящихся изотопов с расчетными и, таким образом, была пополнена действующая база данных по схемам бета-распада.

Сечение реакции ОБР, полученное на основе расчетных спектров при составе активной зоны реактора Double Chooz  $\sigma_f = 5,70 \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление, хорошо совпадает с экспериментальным сечением Double Chooz  $\sigma_f = (5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление [26]. Отличие в расчетном и экспериментальном сечениях может объясняться дополнительным вкладом в экспериментальное сечение антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом.

**14 Задача "Анализ данных детектора LVD, накопленных за 20 лет работы, по исследованию мюонной компоненты космических лучей и естественной радиоактивности, являющихся основными источниками фона в экспериментах по поиску редких событий, проводимых в подземной лаборатории Гран Сассо (LNGS)"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Детектор LVD, находящийся в Лаборатории LNGS, измеряет вариации скорости счета гамма-квантов от распада радона под землей. Результаты исследования могут помочь геофизикам в мониторинговании тектонических процессов. Земная кора, как и литосфера в целом, под воздействием приливных волн в Земле постоянно подвергается деформациям: во время положительных полуволн - растяжению, а во время отрицательных - сжатию. Результаты нашего анализа подтверждают, что в районах геофизических разломов возрастает эманация глубинных газов, коррелирующая с приливами в земной коре.

Результаты анализа вместе с Монте-Карло моделированием позволят выделить (разделить) в экспериментальных данных детектора возрастания темпа счета гамма-квантов от естественной радиоактивности, связанные с гравитационными эффектами, и события с возрастанием от инъекции радона при землетрясениях в итальянском регионе.

Эксперименты в подземных лабораториях могут иметь важные практические применения, например, для задачи прогнозирования землетрясений. В случае подготовки землетрясения изменение выхода радона, углекислого газа и ионов может происходить под влиянием вариаций давления в геологической среде, если перед землетрясением до места наблюдения дошли упругие сдвиги, причем достаточно, вероятно, микроскопических смещений, либо эти сдвиги могли повлиять на эффективную структуру пор и трещин. Такое же влияние может происходить под действием лунных приливов в грунте.

### **15 Задача "Анализ экспериментальных данных первого этапа эксперимента NEWSdm с использованием результатов расчетов для корректного выделения событий взаимодействия темной материи и фоновых событий"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Эксперимент NEWSdm должен стать первым детектором с твердой мишенью для направленных поисков темной материи: использование детектора на основе ядерной эмульсии, действующего как в качестве мишени, так и в качестве устройства слежения, позволит расширить поиски темной материи за пределы нейтринного пола и обеспечить однозначную сигнатуру обнаружения галактической темной материи. Новая технология эмульсии, основанная на использовании ядерных эмульсионных пленок с нанометрическими кристаллами AgBr и недавно разработанных оптических микроскопов, уже достигла беспрецедентной пространственной точности около 3 нм. Такое разрешение позволяет разрешать зерна нанометрических треков, обеспечивая тем самым очень высокое отношение сигнал/шум. Результаты опубликованы в работах [184, 185, 186, 187].

### **16 Задача "Изучение физических условий в газе в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности, создаваемых гало темной материи и первичными черными дырами, и расчет поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см нейтрального водорода"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В рамках данной темы рассчитана структура и пекулярные скорости звуковых волн, создаваемых в эпоху Темных веков объектами темной материи с массами, меньшими массы Джинса. Выполнен расчет поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см. Поглощение происходит, в основном, за счет наличия градиентов пекулярных скоростей во втором порядке по скорости. Поглощение на звуковых волнах действительно имеет место, и оно зависит от УФ-излучения первых звезд посред-

ством эффекта Ваутхейзена-Филда, но величина поглощения очень мала, на уровне нескольких процентов или долей процента. Однако нельзя исключать, что в будущем для интерпретации данных космологических наблюдений такие малые поправки на уровне процента необходимо будет учитывать.

### **17 Задача "Эксперимент JUNO"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Успешно завершен монтаж всех 17 612 крупногабаритных 20-дюймовых фотоумножителей Центрального детектора JUNO. Полностью установлены и все 25 600 малогабаритных 3-дюймовых фотоумножителей Центрального детектора. Смонтированы все 20-дюймовые фотоумножители водного черенковского детектора вето Центрального детектора и установки OSIRIS. Детектор OSIRIS заполнен двадцатью тоннами жидкого сцинтиллятора. Полностью заполнен черенковский водного детектор вето установки OSIRIS. Успешно протестированы герметичности жидкосцинтилляционного детектора и черенковского водного детектора установки. Произведены тестовые включения всех фотоумножителей (крупно- и малогабаритных) Центрального детектора, водного черенковского детектора и установки OSIRIS. Выполнены первые измерения содержания радона в установке OSIRIS.

### **18 Задача "Поиск стерильных нейтрино в области масс 0,1-10 кэВ в бета-распаде трития"**

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Разработан и изготовлен интегральный детектор электронов бета-распада трития. По принципу работы детектор представляет из себя цилиндр Фарадея. Был адаптирован и изготовлен механический узел ввода детектора в сверхпроводящий соленоид детекторной части спектрометра «Троицк ню-масс». В сентябре 2024 был получен пикоамперметр Keithley 6430 с рекордными характеристиками.

Была проведена серия измерений собственного шума системы детектор – пикоамперметр и выбрана оптимальная конфигурация для получения минимальных фоновых шумов. Чувствительность собранной системы проверялась с помощью высокостабильного источника электронов. Превышение шума сигнала над уровнем дробового шума составило фактор не более 2,5. 2-4 декабря детектор был введен в спектрометр. Были проведены пробные измерения спектра бета-распада и опробованы возможные подходы к подавлению медленных дрейфов сигнала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Searches for Atmospheric Long-Lived Particles / C. Argüelles, P. Coloma, P. Hernández, V. Muñoz // JHEP. — 2020. — Vol. 02. — P. 190. — [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2020\)190](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2020)190).
2. New constraints on Heavy Neutral Leptons from Super-Kamiokande data / P. Coloma, P. Hernandez, V. Munoz, I. Shoemaker // Eur. Phys. J. C. — 2020. — Vol. 80, no. 3. — P. 235. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7795-z>.
3. Archer-Smith P., Zhang Y. Higgs Portal From The Atmosphere To Hyper-K // Phys. Lett. B. — 2021. — Vol. 817. — P. 136309. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136309>.
4. Searching for light long-lived neutralinos at Super-Kamiokande / P. Candia, G. Cottin, A. Méndez, V. Muñoz // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 104, no. 5. — P. 055024. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.055024>.
5. Lanfranchi G., Pospelov M., Schuster P. The Search for Feebly Interacting Particles // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2021. — Vol. 71. — P. 279–313. — <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102419-055056>.
6. Blümlein J., Brunner J. New Exclusion Limits on Dark Gauge Forces from Proton Bremsstrahlung in Beam-Dump Data // Phys. Lett. B. — 2014. — Vol. 731. — P. 320–326. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.02.029>.
7. Foroughi-Abari S., Ritz A. Dark sector production via proton bremsstrahlung // Phys. Rev. D. — 2022. — Vol. 105, no. 9. — P. 095045. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.095045>.
8. New constraint on dark photon at T2K off-axis near detector / T. Araki, K. Asai, T. Iizawa [et al.] // JHEP. — 2023. — Vol. 11. — P. 056. — [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2023\)056](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2023)056).
9. Searching for physics beyond the Standard Model in an off-axis DUNE near detector / M. Breitbach, L. Buonocore, C. Frugiuele [et al.] // JHEP. — 2022. — Vol. 01. — P. 048. — [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2022\)048](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2022)048).
10. Ahdida C. [et al.]. Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 5. — P. 451. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09224-3>.
11. Kim K. J., Tsai Y.-S. Improved Weizsacker-Williams method and its application to lepton and W boson pair production // Phys. Rev. D. — 1973. — Vol. 8. — P. 3109. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.8.3109>.
12. Abgaryan V. [et al.]. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA // Eur. Phys. J. A. — 2022. — Vol. 58, no. 7. — P. 140. — <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6>.

13. Abramov V. V. [et al.]. Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams // Phys. Part. Nucl. — 2021. — Vol. 52, no. 6. — P. 1044–1119. — <https://doi.org/10.1134/S1063779621060022>.
14. Bezrukov F., Gorbunov D. Light inflaton Hunter’s Guide // JHEP. — 2010. — Vol. 05. — P. 010. — [https://doi.org/10.1007/JHEP05\(2010\)010](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2010)010).
15. Holdom B. Two U(1)’s and Epsilon Charge Shifts // Phys. Lett. B. — 1986. — Vol. 166. — P. 196–198. — [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(86\)91377-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91377-8).
16. Brodin G., Marklund M., Stenflo L. Proposal for Detection of QED Vacuum Nonlinearities in Maxwell’s Equations by the Use of Waveguides // Phys. Rev. Lett. — 2001. — Vol. 87. — P. 171801. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.171801>.
17. A Possibility to measure elastic photon-photon scattering in vacuum / D. Eriksen, G. Brodin, M. Marklund, L. Stenflo // Phys. Rev. A. — 2004. — Vol. 70. — P. 013808. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.70.013808>.
18. Probing Axionlike Particles and the Axiverse with Superconducting Radio-Frequency Cavities / Z. Bogorad, A. Hook, Y. Kahn, Y. Soreq // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Vol. 123, no. 2. — P. 021801. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.021801>.
19. Shibata K. Intrinsic resonant enhancement of light by nonlinear vacuum // Eur. Phys. J. D. — 2020. — Vol. 74, no. 10. — P. 215. — <https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-10420-1>.
20. Kopchinskii I., Satunin P. Resonant generation of electromagnetic modes in nonlinear electrodynamics: Classical approach // Phys. Rev. A. — 2022. — Vol. 105, no. 1. — P. 013508. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.013508>.
21. Horava P. Quantum Gravity at a Lifshitz Point // Phys. Rev. D. — 2009. — Vol. 79. — P. 084008. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.79.084008>.
22. Kostelecky A., Russell N. Data Tables for Lorentz and CPT Violation // Rev. Mod. Phys. — 2011. — Vol. 83. — P. 11–31. — <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.11>.
23. Levkov D. G., Panin A. G., Tkachev I. I. Gravitational Bose-Einstein condensation in the kinetic regime // Phys. Rev. Lett. — 2018. — Vol. 121, no. 15. — P. 151301. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.151301>.
24. An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from ‘Troitsk nu-mass’ data / A. I. Belesev, A. I. Berlev, E. V. Geraskin [et al.] // JETP Lett. — 2013. — Vol. 97. — P. 67–69. — <https://doi.org/10.1134/S0021364013020033>.



25. Abdurashitov J. N. [et al.]. First measurements in search for keV-sterile neutrino in tritium beta-decay by Troitsk nu-mass experiment // *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 2017. — Vol. 105, no. 12. — P. 723–724. — <https://doi.org/10.1134/S0021364017120013>.
26. Double Chooz  $\theta_{13}$  measurement via total neutron capture detection / H. de Kerret, T. Abrahao, H. Almazan [et al.] // *Nature Physics*. — 2020. — Vol. 16, no. 5. — P. 558–564. — <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0831-y>.
27. Сивухин Д. В. *Общий курс физики. 3-е издание, стереотипное.* — М.: Физматлит, 2002.
28. Алексеенко В.В. [и др.]. Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью // *Физика земли.* — 2009. — № 8. — С. 91–100.
29. Мельхиор П. *Земные приливы.* — М.: Мир., 1968.
30. Massey R., Kitching T., Richard J. The dark matter of gravitational lensing // *Rep. Prog. Phys.* — 2010. — Vol. 73. — P. 086901.
31. Rezaei Z. Accelerated expansion of the Universe in the presence of dark matter pressure // *Can. J. Phys.* — 2020. — Vol. 98, no. 2. — P. 210–216. — <https://doi.org/10.1139/cjp-2019-0135>.
32. Maity D., Saha P. Connecting CMB anisotropy and cold dark matter phenomenology via reheating // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 98, no. 10. — P. 103525. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.103525>.
33. Gorbunov S. A., Konovalova N. S. New Experiment NEWSdm for Direct Searches for Heavy Dark Matter Particles // *Phys. Atom. Nucl.* — 2020. — Vol. 83, no. 1. — P. 83–91. — <https://doi.org/10.1134/S1063778820010056>.
34. Eroshenko Yu. N. Strong gravitational lensing of blazar gamma-radiation and intergalactic magnetic fields // *Chinese Physics C.* — 2024. — Vol. 48, no. 1. — P. 015104. — <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad0b6a>.
35. Furlanetto S. R., Oh S. P., Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe // *Physics Reports.* — 2006. — Vol. 433, no. 4-6. — P. 181–301. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.08.002>.
36. An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum / J. D. Bowman, A. E. Rogers, R. A. Monsalve [et al.] // *Nature.* — 2018. — Vol. 555, no. 7694. — P. 67–70. — <https://doi.org/10.1038/nature25792>.
37. Aker M. [et al.]. Measurement of the electric potential and the magnetic field in the shifted analysing plane of the KATRIN experiment // *Eur. Phys. J. C.* — 2024. — Vol. 84, no. 12. — P. 1258. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13596-7>.

38. CosmoLattice: A modern code for lattice simulations of scalar and gauge field dynamics in an expanding universe / D. Figueroa, A. Florio, F. Torrenti, W. Valkenburg // *Comput. Phys. Commun.* — 2023. — Vol. 283. — P. 108586. — <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108586>.
39. Figueroa D., Florio A., Torrenti F. Present and future of  $\mathcal{C}$  osmo  $\mathcal{L}$  attice // *Rept. Prog. Phys.* — 2024. — Vol. 87, no. 9. — P. 094901. — <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ad616a>.
40. Hiramatsu T., Kawasaki M., Saikawa K. On the estimation of gravitational wave spectrum from cosmic domain walls // *JCAP.* — 2014. — Vol. 02. — P. 031. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/02/031>.
41. Saikawa K. A review of gravitational waves from cosmic domain walls // *Universe.* — 2017. — Vol. 3, no. 2. — P. 40. — <https://doi.org/10.3390/universe3020040>.
42. Li Y., Bian L., Jia Y. Solving the domain wall problem with first-order phase transition. — 2023. — 4. — 2304.05220.
43. Cosmic Simulations of Axion String-Wall Networks: Probing Dark Matter and Gravitational Waves for Discovery / Y. Li, L. Bian, R. Cai, J. Shu. — 2023. — 11. — 2311.02011.
44. Revisiting evolution of domain walls and their gravitational radiation with CosmoLattice / I. Dankovsky, E. Babichev, D. Gorbunov [et al.] // *JCAP.* — 2024. — Vol. 09. — P. 047. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/09/047>.
45. Agazie G. [et al.]. The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background // *Astrophys. J. Lett.* — 2023. — Vol. 951, no. 1. — P. L8. — <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acdac6>.
46. Beyond freeze-in: Dark matter via inverse phase transition and gravitational wave signal / S. Ramazanov, E. Babichev, D. Gorbunov, A. Vikman // *Phys. Rev. D.* — 2022. — Vol. 105, no. 6. — P. 063530. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.063530>.
47. Gravitational shine of dark domain walls / E. Babichev, D. Gorbunov, S. Ramazanov, A. Vikman // *JCAP.* — 2022. — Vol. 04, no. 04. — P. 028. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/04/028>.
48. NANOGrav spectral index  $\gamma=3$  from melting domain walls / E. Babichev, D. Gorbunov, S. Ramazanov [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2023. — Vol. 108, no. 12. — P. 123529. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.123529>.
49. Abe K. [et al.]. Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 97, no. 7. — P. 072001. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.072001>.

50. Vysotskii M., Zhemchugov E. Equivalent photons in proton and ion—ion collisions at the LHC // *Phys. Usp.* — 2019. — Vol. 62, no. 9. — P. 910–919. — <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.07.038389>.
51. Troitsky S. Towards a model of photon-axion conversion in the host galaxy of GRB 221009A // *JCAP.* — 2024. — Vol. 01. — P. 016. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/01/016>.
52. Kudenko M., Troitsky S. An isotropic full-sky sample of optically selected blazars // *Astron. Astrophys.* — 2024. — Vol. 686. — P. A178. — <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449163>.
53. Kudenko M. A., Troitsky S. V. Anomalous Cosmic-Ray Correlations Revisited with a Complete Full-Sky Sample of BL Lac Type Objects // *JETP Lett.* — 2024. — Vol. 119, no. 5. — P. 335–338. — <https://doi.org/10.1134/S0021364024600034>.
54. Riabtsev K. Implications of ALP-photon conversion for the diffuse gamma-ray background associated with high-energy neutrinos // *Phys. Lett. B.* — 2024. — Vol. 859. — P. 139095. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139095>.
55. Troitsky S. V. Stellar evolution and axion-like particles: new constraints and hints from globular clusters in the GAIA DR3 data // *arXiv eprints.* — 2024. — 10. — 2410.02266.
56. Strong limits on keV-scale galactic sterile neutrino dark matter with stray light from NuSTAR after 11 years of operation / R. A. Krivonos, V. V. Barinov, A. A. Mukhin, D. S. Gorbunov. — 2024. — 5. — 2405.17861.
57. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. Probing scalar, Dirac, Majorana, and vector dark matter through a spin-0 electron-specific mediator at electron fixed-target experiments // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 109, no. 7. — P. 075012. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.075012>.
58. Probing hidden leptonic scalar portals using the NA64 experiment at CERN / A. Ponten, H. Sieber, B. Banto Oberhauser [et al.] // *Eur. Phys. J. C.* — 2024. — Vol. 84, no. 10. — P. 1035. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13421-1>.
59. Alekhin S. I., Kulagin S. A., Petti R. On the Interplay of Nuclear and Higher-Twist Corrections in Nuclear Structure Functions // 31st International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.21472>.
60. Abrams D. [et al.]. The EMC Effect of Tritium and Helium-3 from the JLab MARATHON Experiment. — 2024. — 10. — 2410.12099.
61. Impact of SeaQuest data on sea-quark PDFs at large x / S. Alekhin, M. Garzelli, S. Kulagin, S. Moch // *PoS.* — 2024. — Vol. EPS-HEP2023. — P. 279. —

<https://doi.org/10.22323/1.449.0279>.

62. Self-Similar Growth of Bose Stars / A. S. Dmitriev, D. G. Levkov, A. G. Panin, I. I. Tkachev // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 132, no. 9. — P. 091001. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.091001>.

63. Rajaraman R. Solitons and Instantons: An Introduction to Solitons and Instantons in Quantum Field Theory. North-Holland personal library. — North-Holland Publishing Company, 1982. — ISBN: 9780444862297. — <https://books.google.kz/books?id=1XucQgAACAAJ>.

64. C. Sidney. Q-balls // *Nuclear Physics B.* — 1985. — Vol. 262, no. 2. — P. 263–283. — [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(85\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0550-3213(85)90286-X).

65. Nugaev E. Ya., Shkerin A. V. Review of Nontopological Solitons in Theories with  $U(1)$ -Symmetry // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2020. — Vol. 130, no. 2. — P. 301–320. — <https://doi.org/10.1134/S1063776120020077>.

66. Levkov D., Nugaev E., Popescu A. The fate of small classically stable Q-balls // *JHEP.* — 2017. — Vol. 12. — P. 131. — [https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2017\)131](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2017)131).

67. Enqvist K., McDonald J. Q balls and baryogenesis in the MSSM // *Phys. Lett. B.* — 1998. — Vol. 425. — P. 309–321. — [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(98\)00271-8](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(98)00271-8).

68. Kusenko A., Shaposhnikov M. Supersymmetric Q balls as dark matter // *Phys. Lett. B.* — 1998. — Vol. 418. — P. 46–54. — [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(97\)01375-0](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(97)01375-0).

69. Coleman S., Weinberg E. Radiative Corrections as the Origin of Spontaneous Symmetry Breaking // *Phys. Rev. D.* — 1973. — Vol. 7. — P. 1888–1910. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.7.1888>.

70. Misner C. Wormhole Initial Conditions // *Phys. Rev.* — 1960. — Vol. 118. — P. 1110–1111. — <https://doi.org/10.1103/PhysRev.118.1110>.

71. Ortin T. Time symmetric initial data sets in 4-d dilaton gravity // *Phys. Rev. D.* — 1995. — Vol. 52. — P. 3392–3405. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.3392>.

72. Berezin V., Ivanova I. Conformally Invariant Gravity and Gravitating Mirages // *Universe.* — 2024. — Vol. 10, no. 3. — P. 147. — <https://doi.org/10.3390/universe10030147>.

73. Ageeva Y., Petrov P., Shaposhnikov M. Non-renormalizable theories and finite formulation of QFT. — 2024. — 9. — 2409.15036.

74. Ageeva Y., Kotenko M., Petrov P. The primordial non-Gaussianities for non-singular Horndeski cosmologies. — 2024. — 10. — 2410.10742.

75. Ageeva Y., Petrov P., Rubakov V. Generating cosmological perturbations in non-singular Horndeski cosmologies // JHEP. — 2023. — Vol. 01. — P. 026. — [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2023\)026](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2023)026).
76. Aghanim N. [et al.]. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // Astron. Astrophys. — 2020. — Vol. 641. — P. A6. — [Erratum: Astron.Astrophys. 652, C4 (2021)]. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.
77. Ade P. A. R. [et al.]. Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck Observations through the 2018 Observing Season // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 127, no. 15. — P. 151301. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.151301>.
78. Mironov S., Valencia-Villegas M. Stability of nonsingular cosmologies in Galileon models with torsion: A no-go theorem for eternal subluminality // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 109, no. 4. — P. 044–073. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.044073>.
79. Mironov S., Valencia-Villegas M. Healthy Horndeski cosmologies with torsion // JCAP. — 2024. — Vol. 07. — P. 030. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/07/030>.
80. Mironov S. A., Shtennikova A. M. Perturbations in Horndeski Theory above Anisotropic Cosmological Background // JETP Lett. — 2024. — Vol. 119, no. 5. — P. 339–344. — <https://doi.org/10.1134/S002136402360204X>.
81. Mironov S., Volkova V. DPSV trick for spherically symmetric backgrounds // Nucl. Phys. B. — 2024. — Vol. 1004. — P. 116550. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2024.116550>.
82. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. // Phys. Lett. B. — 2024. — Vol. 858. — P. 139058. — 2405.02281.
83. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Higher derivative SVT theories from Kaluza-Klein reductions of Horndeski theory. — 2024. — 8. — 2408.04626.
84. Depero E. [et al.]. High purity 100 GeV electron identification with synchrotron radiation // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2017. — Vol. 866. — P. 196–201. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.05.028>.
85. Light dark matter search with positron beams at NA64 : Rep. : CERN-SPSC-2024-003, SPSC-P-348-ADD-4 / CERN ; Executor: P Bisio, M Bondi, A Celentano [et al.]. — Geneva : 2024. — P. 63. <https://cds.cern.ch/record/2887649>.
86. Addendum to the Proposal P348: Search for dark sector particles weakly coupled to muon with NA64mu : Rep. : CERN-SPSC-2018-024, SPSC-P-348-ADD-3 / CERN ; Executor: Sergei Gninenko. — Geneva : 2018. — P. 52. <http://cds.cern.ch/record/2640930>.

87. Feng J. Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 48. — P. 495–545. — <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101659>.
88. Feng J., Tu H., Yu H. Thermal Relics in Hidden Sectors // *JCAP.* — 2008. — Vol. 10. — P. 043. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2008/10/043>.
89. Feng J., Kumar J. The WIMPless Miracle: Dark-Matter Particles without Weak-Scale Masses or Weak Interactions // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 101. — P. 231301. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.231301>.
90. Arcadi G. [et al.]. The waning of the WIMP? A review of models, searches, and constraints // *Eur. Phys. J. C.* — 2018. — Vol. 78, no. 3. — P. 203. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5662-y>.
91. Jaeckel J., Lamont M., Vallée C. The quest for new physics with the Physics Beyond Colliders programme // *Nature Phys.* — 2020. — Vol. 16, no. 4. — P. 393–401. — <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0838-4>.
92. Krnjaic G. [et al.]. A Snowmass Whitepaper: Dark Matter Production at Intensity-Frontier Experiments. — 2022. — 7. — 2207.00597.
93. Antel C. [et al.]. Feebly-interacting particles: FIPs 2022 Workshop Report // *Eur. Phys. J. C.* — 2023. — Vol. 83, no. 12. — P. 1122. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-12168-5>.
94. Krasnikov N. V. Dark matter models with suppressed dark matter nuclei elastic cross section // *Phys. Lett. B.* — 2024. — Vol. 854. — P. 138747. — 2405.03325.
95. Zhevlakov A., Kirpichnikov D., Lyubovitskij V. Lepton flavor violating dark photon // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 109, no. 1. — P. 015015. — 2307.10771.
96. Test of the vector portal with dark fermions in the charge-exchange reactions in the NA64 experiment at CERN SPS / S. Gninenko, D. Kirpichnikov, S. Kuleshov [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 109, no. 7. — P. 075021. — 2312.01703.
97. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. The bremsstrahlung-like production of the massive spin-2 dark matter mediator. — 2024. — 12. — <https://arxiv.org/abs/2412.10150>.
98. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. Implication of the Weizsacker-Williams approximation for the dark matter mediator production. — 2024. — 9. — <https://arxiv.org/abs/2409.12748>.
99. Probing leptophobic dark sector with a pseudoscalar portal in the NA64 experiment at CERN / Sergei N. Gninenko, Dmitry V. Kirpichnikov, Nikolai V. Krasnikov [et al.]. — 2024. — 7. — <https://arxiv.org/abs/2407.01181>.
100. Workman R. L. [et al.]. Review of Particle Physics // *PTEP.* — 2022. — Vol. 2022. — P. 083C01. — <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>.

101. Gninenko S. N. Search for invisible decays of  $\pi^0, \eta, \eta', K_S$  and  $K_L$ : A probe of new physics and tests using the Bell-Steinberger relation // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Vol. 91, no. 1. — P. 015004. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.015004>.
102. Andreev Yu. M. [et al.]. First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 132, no. 21. — P. 211803. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.211803>.
103. Andreev Yu. M. [et al.]. Dark-Sector Search via Pion-Produced  $\eta$  and  $\eta'$  Mesons Decaying Invisibly in the NA64h Detector // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 133, no. 12. — P. 121803. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.121803>.
104. P. Fayet. A la recherche d'un nouveau boson de spin un // *Nucl. Phys. B.* — 1981. — Vol. 187, no. 1. — P. 184–204. — [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(81\)90122-X](https://doi.org/10.1016/0550-3213(81)90122-X).
105. Okun L. B. LIMITS OF ELECTRODYNAMICS: PARAPHOTONS? // *Sov. Phys. JETP.* — 1982. — Vol. 56. — P. 502.
106. Georgi H., Ginsparg P., Glashow S. Photon Oscillations and the Cosmic Background Radiation // *Nature.* — 1983. — Vol. 306. — P. 765–766. — <https://doi.org/10.1038/306765a0>.
107. Dzhunushaliev V., Folomeev V. Axially symmetric particlelike solutions with the flux of a magnetic field in the non-Abelian Proca-Higgs theory // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Vol. 104, no. 11. — P. 116027. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.116027>.
108. Dzhunushaliev V., Folomeev V. Proca balls with angular momentum or flux of electric field // *Phys. Rev. D.* — 2022. — Vol. 105, no. 1. — P. 016022. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.016022>.
109. Essig R., Volansky T., Yu T. New Constraints and Prospects for sub-GeV Dark Matter Scattering off Electrons in Xenon // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 96, no. 4. — P. 043017. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.043017>.
110. Abramoff O. [et al.]. SENSEI: Direct-Detection Constraints on Sub-GeV Dark Matter from a Shallow Underground Run Using a Prototype Skipper-CCD // *Phys. Rev. Lett.* — 2019. — Vol. 122, no. 16. — P. 161801. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.161801>.
111. Aguilar-Arevalo A. [et al.]. Constraints on Light Dark Matter Particles Interacting with Electrons from DAMIC at SNOLAB // *Phys. Rev. Lett.* — 2019. — Vol. 123, no. 18. — P. 181802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.181802>.
112. Kopylov A. V., Orekhov I. V., Petukhov V. V. A multi-cathode counter in a single-electron counting mode // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2018. — Vol. 910. — P. 164–167. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.075>.

113. Cairns R. B., Samson J. A. R. Metal Photocathodes as Secondary Standards for Absolute Intensity Measurements in the Vacuum Ultraviolet // *J. Opt. Soc. Americ.* — 1966. — Vol. 56, no. 11. — P. 1568–1573. — <https://doi.org/10.1364/JOSA.56.001568>.
114. Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V. Results from a Hidden Photon Dark Matter Search Using a Multi-Cathode Counter // *JCAP*. — 2019. — Vol. 07. — P. 008. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/07/008>.
115. Zyla P. A. [et al.]. Review of Particle Physics // *PTEP*. — 2020. — Vol. 2020, no. 8. — P. 083C01. — <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>.
116. Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V. PHELEX: Present Status // *Moscow Univ. Phys. Bull.* — 2022. — Vol. 77, no. 2. — P. 315–318. — <https://doi.org/10.3103/S0027134922020539>.
117. Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V. Diurnal Variations of the Count Rates from Dark Photons in PHELEX // *Particles*. — 2022. — Vol. 5, no. 2. — P. 180–187. — <https://doi.org/10.3390/particles5020016>.
118. Kopylov A. V., Orekhov I. V., Petukhov V. V. Multicathode Counter As a Detector of Dark Photons // *Phys. Atom. Nucl.* — 2022. — Vol. 85, no. 6. — P. 673–680. — <https://doi.org/10.1134/S1063778822060084>.
119. Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V. Present Status of the Experiment on the Search for Dark Photons by Multi-Cathode Counter // *Phys. Atom. Nucl.* — 2021. — Vol. 84, no. 6. — P. 860–865. — <https://doi.org/10.1134/S1063778821060090>.
120. Abe K. [et al.]. The T2K Experiment // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2011. — Vol. 659. — P. 106–135. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.067>.
121. Abe S. [et al.]. Characterization of the optical model of the T2K 3D segmented plastic scintillator detector. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.24099>.
122. Giganti C. T2K experiment status and plans. — Zenodo, 2024. — June. — <https://doi.org/10.5281/zenodo.12704703>.
123. Fukuda Y. [et al.]. Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos // *Phys. Rev. Lett.* — 1998. — Aug. — Vol. 81. — P. 1562–1567. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.81.1562>.
124. Ayres D. S. [et al.]. The NOvA Technical Design Report. — 2007. — 10. — <https://doi.org/10.2172/935497>.
125. Abe K. [et al.]. First joint oscillation analysis of Super-Kamiokande atmospheric and T2K accelerator neutrino data. — 2024. — 5. — <https://arxiv.org/abs/2405.12488>.
126. Denton P., Parke S. Simple and precise factorization of the Jarlskog invariant for neutrino oscillations in matter // *Phys. Rev. D*. — 2019. — Sep. — Vol. 100. —



P. 053004. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.100.053004>.

127. Wolcott J. New neutrino oscillation results from NOvA with 10 years of data. — Zenodo, 2024. — June. — <https://doi.org/10.5281/zenodo.12704805>.

128. Cortina G. [et al.]. Measurement of the rare  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  decay // JHEP. — 2021. — Vol. 06. — P. 093. — [https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2021\)093](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2021)093).

129. Anatomy of kaon decays and prospects for lepton flavour universality violation / G. D'Ambrosio, A. M. Iyer, F. Mahmoudi, S. Neshatpour // JHEP. — 2022. — Vol. 09. — P. 148. — [https://doi.org/10.1007/JHEP09\(2022\)148](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2022)148).

130. Buras Andrzej J., Venturini Elena. The exclusive vision of rare K and B decays and of the quark mixing in the standard model // Eur. Phys. J. C. — 2022. — Vol. 82, no. 7. — P. 615. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10583-8>.

131. Swallow J. New measurement of the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  decay by the NA62 Experiment (CERN Seminar). — 2024. — 24 September. — <https://indico.cern.ch/event/1447422/>.

132. Collaboration NA62. Observation of the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  decay and measurement of its branching ratio. — 2024. — 2412.12015.

133. Артамонов А. В. и другие. Ограничение на относительную вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 e^+ \nu$  // Письма в ЖЭТФ. — 2024. — Т. 120. — С. 578. — [http://jetpletters.ru/ps/0/article\\_36463.shtml](http://jetpletters.ru/ps/0/article_36463.shtml).

134. Artamonov A. V. [et al.]. Observation of  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma$  decay // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 4. — P. 345. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12674-0>.

135. Sadovsky A. S. [et al.]. Searches for the light invisible axion-like particle in  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$  decay // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 3. — P. 266. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12444-y>.

136. Acero M. A. [et al.]. Expanding neutrino oscillation parameter measurements in NOvA using a Bayesian approach // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 110, no. 1. — P. 012005. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.012005>.

137. Acero M. A. [et al.]. Search for CP-Violating Neutrino Nonstandard Interactions with the NOvA Experiment // Phys. Rev. Lett. — 2024. — Vol. 133, no. 20. — P. 201802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.201802>.

138. Denton P., Gehrlein J., Pestes R. CP -Violating Neutrino Nonstandard Interactions in Long-Baseline-Accelerator Data // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 126, no. 5. — P. 051801. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.051801>.

139. Chatterjee S., Palazzo A. Nonstandard Neutrino Interactions as a Solution to the NOvA and T2K Discrepancy // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 126, no. 5. — P. 051802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.051802>.

140. Farzan Y., Tortola M. Neutrino oscillations and Non-Standard Interactions // Front. in Phys. — 2018. — Vol. 6. — P. 10. — <https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00010>.
141. Butkevich A. V. Reduced cross sections of electron and neutrino charged current quasielastic scattering on nuclei // Phys. Rev. C. — 2024. — Vol. 109, no. 4. — P. 045502. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.045502>.
142. Dutta D. [et al.]. A Study of the quasielastic (e,e-prime p) reaction on C-12, Fe-56 and Au-97 // Phys. Rev. C. — 2003. — Vol. 68. — P. 064603. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.68.064603>.
143. Nozik A., Hamitov T. Electron evaporation from magnetic trap in Troitsk nu-mass experiment // JINST. — 2021. — Vol. 16, no. 05. — P. P05022. — <https://doi.org/10.1134/S0021364017120013>.
144. Measurements of detector material samples with two HPGe detectors at the YangYang Underground Lab. / E. Lee, K. Hahn, E. Jeon [et al.] // PoS ICHEP2018. — 2019. — P. 809. — <https://doi.org/10.22323/1.340.0809>.
145. Development of an array of fourteen HPGe detectors having 70 2021. — Vol. 989. — P. 164954. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164954>.
146. Initial performance of the high sensitivity alpha particle detector at the Yangyang underground laboratory. / C. Ha, G. Adhikari, P. Adhikari [et al.] // Nucl Instrum Meth. — 2019. — Vol. 913. — P. 15–9. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.129>.
147. Armengaud E. [et al.]. New Limit for Neutrinoless Double-Beta Decay of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo Experiment. // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 126. — P. 181802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.181802>.
148. Agostini M. [et al.]. An improved limit on the neutrinoless double-electron capture of  $^{36}\text{Ar}$  with GERDA // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84. — P. 34. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-12280-6>.
149. Agostini M. [et al.]. Searches for new physics below twice the electron mass with GERDA // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84. — P. 940. — <https://doi.org/epjc/s10052-024-13020-0>.
150. New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay / F. P. An, A. B. Balantekin, H. R. Band [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Vol. 115, no. 11. — P. 11802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.111802>.
151. Observation of Energy and Baseline Dependent Reactor Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment / J. H. Choi, W. Q. Choi, Y. Choi [et al.] //

Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 116, no. 21. — P. 211801 – 211806. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.211801>.

152. Mikaelyan L. A., Sinev V. V. Neutrino Oscillations at Reactors: What Is Next? // Phys. Atom. Nuclei. — 2000. — Vol. 63, no. 6. — P. 1002–1006. — <https://doi.org/10.1134/1.855739>.

153. The Double Chooz antineutrino detectors / H. de Kerret, Y. Abe, C. Aberle [et al.] // Eur. Phys. — 2022. — Vol. 82, no. 9. — P. 804. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10726-x>.

154. Jolle C., Onillon A., Sinev V. Residual reactor antineutrinos observation with the Double Chooz detectors // Neutrino-2020. — 2020. — 6.

155. МАГАТЭ. База данных известных изотопов Live Chart of Nuclides. — 2009. — <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.

156. New Antineutrino Spectra of Nuclear-Reactor Fissile Isotopes: Experiment and Calculations / A. P. Vlasenko, S. V. Ingerman, P. Yu. Naumov, V. V. Sinev // Phys. Atom. Nuclei. — 2022. — Vol. 85, no. 6. — P. 690–700. — <https://doi.org/10.1134/S1063778823010611>.

157. Ingerman S. V., Sinev V. V. Application of the clarified database of parameters of beta-active atomic nuclei for antineutrino spectrum calculation // 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2024). — 2024. — 10.

158. Antineutrino Spectra of  $^{235,238}\text{U}$  and  $^{239,241}\text{Pu}$  Taken from the Double Chooz Experiment / A. P. Vlasenko, S. V. Ingerman, P. Yu. Naumov, V. V. Sinev // Phys. Atom. Nuclei. — 2024. — Vol. 87, no. 1. — P. 79–89. — <https://doi.org/10.1134/S1063778824010599>.

159. Study of reactor antineutrino interaction with proton at Bugey nuclear power plant / Y. Declais, H. de Kerret, B. Lefievre [et al.] // Physics Letters B. — 1994. — Vol. 338, no. 2. — P. 383–389. — [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(94\)91394-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(94)91394-3).

160. Периодические вариации концентрации радона в подземной Лаборатории Гран Сассо, измеренные с помощью LVD / Н. Ю. Агафонова, Е.А. Добрынина, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова // ЖЭТФ. — 2023. — Т. 164, № 3(9). — С. 386–395. — <https://doi.org/10.31857/S0044451023090079>.

161. Lunar-Monthly Variances in the Background Gamma-Quanta Measured at the LVD / N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina [et al.] // Phys. Atom. Nucl. — 2023. — Vol. 86, no. 6. — P. 1014–1020. — <https://doi.org/10.1134/S1063778824010046>.

162. Ivanchenko V. N. Geant4 toolkit for simulation of HEP experiments // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 502. — P. 666–668. — [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00538-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00538-2).
163. Neutron production by cosmic-ray muons in various materials / K. V. Manukovsky, O. G. Ryazhskaya, N. M. Sobolevsky, A. V. Yudin // Phys. Atom. Nucl. — 2016. — Vol. 79, no. 4. — P. 631–640. — <https://doi.org/10.1134/S106377881603011X>.
164. New measurement of rock contaminations and neutron activity in the Gran Sasso tunnel / E. Belotti, M. Burashi, E. Fiorini, Liguori C. — 1985.
165. Копылов А. В., Череховский В. И. Естественная радиоактивность конструкционных материалов. — 1989.
166. Alexandrov A. [et al.]. Intrinsic neutron background of nuclear emulsions for directional Dark Matter searches // Astropart. Phys. — 2016. — Vol. 80. — P. 16–21. — 1507.03532.
167. Super-resolution high-speed optical microscopy for fully automated readout of metallic nanoparticles and nanostructures / A. Alexandrov, T. Asada, G. De Lellis [et al.] // Sci. Rep. — 2020. — Vol. 10, no. 1. — P. 18773. — <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75883-z>.
168. Bonnor W. B. Jeans' formula for gravitational instability // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 1957. — Vol. 117. — P. 104. — <https://doi.org/10.1093/mnras/117.1.104>.
169. Peebles P. J. Dark matter and the origin of galaxies and globular star clusters // Astrophys. J. — 1984. — Vol. 277. — P. 470–477. — <https://doi.org/10.1086/161714>.
170. Eroshenko Yu. N. Nonlinear Generation of Sound Waves in the Pre-Galactic Era and Absorption in the 21-cm Line // Astrophysical Bulletin. — 2024. — Vol. 79, no. 3. — P. 516–524. — <https://doi.org/10.1134/S1990341324600789>.
171. Gorbunov D., Kriukova E. Dark photon production via elastic proton bremsstrahlung with non-zero momentum transfer // JHEP. — 2024. — Vol. 01. — P. 058. — [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2024\)058](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2024)058).
172. Kriukova E. Dark photon emission in elastic proton bremsstrahlung // PoS. — 2024. — Vol. ICPPCRubakov2023. — P. 011. — <https://doi.org/10.22323/1.455.0011>.
173. Gorbunov D., Kalashnikov D. NICA prospects in searches for light exotics from hidden sectors: The cases of hidden photons and axion-like particles // Phys. Lett. B. — 2024. — Vol. 852. — P. 138599. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138599>.

174. Kopchinskii I., Satunin P. Resonant generation of electromagnetic modes in nonlinear electrodynamics: quantum perturbative approach // *Eur. Phys. J. D.* — 2024. — Vol. 78, no. 5. — P. 54. — <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-024-00850-6>.
175. Satunin P., Sharofeev A. Shower formation constraints on cubic Lorentz invariance violation parameters in quantum electrodynamics // *Eur. Phys. J. C.* — 2024. — Vol. 84, no. 8. — P. 793. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13152-3>.
176. Abed Abud A. [et al.]. First measurement of the total inelastic cross section of positively charged kaons on argon at energies between 5.0 and 7.5 GeV // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110, no. 9. — P. 092011. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.092011>.
177. Abed Abud A. [et al.]. Performance of a Modular Ton-Scale Pixel-Readout Liquid Argon Time Projection Chamber // *Instruments.* — 2024. — Vol. 8, no. 3. — P. 41. — <https://doi.org/10.3390/instruments8030041>.
178. Abed Abud A. [et al.]. The DUNE Far Detector Vertical Drift Technology. Technical Design Report // *JINST.* — 2024. — Vol. 19, no. 08. — P. T08004. — <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/08/T08004>.
179. Kim E., Nugaev E. Effectively flat potential in the Friedberg–Lee–Sirlin model // *Eur. Phys. J. C.* — 2024. — Vol. 84, no. 8. — P. 797. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13167-w>.
180. Kim E., Nugaev E., Shnir Y. Large solitons flattened by small quantum corrections // *Phys. Lett. B.* — 2024. — Vol. 856. — P. 138881. — <https://10.1016/j.physletb.2024.138881>.
181. Smirnov A. Initial Data Problem for a Traversable Wormhole with Interacting Mouths // *Grav. Cosmol.* — 2024. — Vol. 30, no. 3. — P. 289–300. — <http://dx.doi.org/10.1134/S0202289324700191>.
182. Agrawal A., Alenkov V. V., Aryal P. [et al.]. Improved limit on neutrinoless double beta decay of  $^{100}\text{Mo}$  from AMoRE-I. — 2024. — <https://arxiv.org/abs/2407.05618>.
183. Radioassay of the materials for AMoRE-II experiment / A. Agrawal, V. V. Alenkov, P. Aryal [et al.] // *Frontiers in Physics.* — 2024. — Vol. 12. — <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2024.1362209>.
184. Частотно-временной анализ изменений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS, измеренных детектором LVD / В. Ф. Якушев, Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин [и др.] // *Журнал экспериментальной и теоретической*

физики. — 2024. — Т. 166, № 3. — С. 330–339. — <https://doi.org/10.31857/S0044451024090049>.

185. Bezrukov L. B. [et al.]. Study of the Delayed Pumping Effect in an Underground Laboratory by Correlation Analysis of Radon and Air Ion Concentrations // Geomagn. Aeron. — 2024. — Vol. 64, no. 1. — P. 102–111. — <https://doi.org/10.1134/s0016793223600765>.

186. Агафонова Н. Ю. [и др.]. Лунно-месячные вариации фоновых гамма-квантов измеренных на LVD // Ядерная Физика. — 2024. — Т. 87, № 1. — С. 26–32. — <https://doi.org/10.31857/S0044002724010047>.

187. Agafonova N. Yu. [et al.]. Analysis of Correlations between the Counting Rate for Natural-Radioactivity Gammas at the Large Volume Detector (LVD) and Atmospheric Pressure // Phys. Atom. Nucl. — 2024. — Vol. 87, no. 6. — P. 732–739. — <https://doi.org/10.1134/S1063778824700686>.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ОТЧЕТА ЗА 2024 Г.**

A.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2024 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Артамонов А. В. [и др.]. Ограничение на относительную вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0e^+\nu$  // Письма в ЖЭТФ. — 2024. — Т. 120. — С. 578. — [http://jetpletters.ru/ps/0/article\\_36463.shtml](http://jetpletters.ru/ps/0/article_36463.shtml).

2. Artamonov A. V. [et al.]. Observation of  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0\gamma$  decay // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 4. — P. 345. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12674-0>.

3. Sadovsky A. S. [et al.]. Searches for the light invisible axion-like particle in  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0a$  // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 3. — P. 266. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12444-y>.

4. Aker M. [et al.]. Measurement of the electric potential and the magnetic field in the shifted analysing plane of the KATRIN experiment // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 12. — P. 1258. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13596-7>.

5. Revisiting evolution of domain walls and their gravitational radiation with CosmoLattice / I. Dankovsky, E. Babichev, D. Gorbunov [et al.] // JCAP. — 2024. — Vol. 09. — P. 047. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/09/047>.

6. M. Achasov [et al.]. Experiments at the Super Charm-Tau factory // Phys. Usp. — 2024. — Vol. vol, no. 1. — P. 55–70. — <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.10.039583>.

7. D. Gorbunov, E. Kriukova. Dark photon production via elastic proton bremsstrahlung with non-zero momentum transfer // JHEP. — 2024. — Vol. 01. — P. 058. — [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2024\)058](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2024)058).

8. D. Gorbunov, D. Kalashnikov. NICA prospects in searches for light exotics from hidden sectors: The cases of hidden photons and axion-like particles // Phys. Lett. B. — 2024. — Vol. 852. — P. 138599. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138599>.

9. Troitsky S. Towards a model of photon-axion conversion in the host galaxy of GRB 221009A // JCAP. — 2024. — Vol. 01. — P. 016. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/01/016>.

10. M. Kudenko, S. Troitsky. An isotropic full-sky sample of optically selected blazars // Astron. Astrophys. — 2024. — Vol. 686. — P. A178. — <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449163>.

11. Kudenko M. A., Troitsky S. V. Anomalous Cosmic-Ray Correlations Revisited with a Complete Full-Sky Sample of BL Lac Type Objects // JETP Lett. — 2024. — Vol. 119, no. 5. — P. 335–338. — <https://doi.org/10.1134/S0021364024600034>.
12. Riabtsev K. Implications of ALP-photon conversion for the diffuse gamma-ray background associated with high-energy neutrinos // Phys. Lett. B. — 2024. — Vol. 859. — P. 139095. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139095>.
13. Kopchinskii I., Satunin P. Resonant generation of electromagnetic modes in nonlinear electrodynamics: quantum perturbative approach // Eur. Phys. J. D. — 2024. — Vol. 78, no. 5. — P. 54. — <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-024-00850-6>.
14. Satunin P., Sharofeev A. Shower formation constraints on cubic Lorentz invariance violation parameters in quantum electrodynamics // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 8. — P. 793. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13152-3>.
15. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. Probing scalar, Dirac, Majorana, and vector dark matter through a spin-0 electron-specific mediator at electron fixed-target experiments // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 109, no. 7. — P. 075012. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.075012>.
16. Probing hidden leptonic scalar portals using the NA64 experiment at CERN / A. Ponten, H. Sieber, B. Banto Oberhauser [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 10. — P. 1035. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13421-1>.
17. A. Abed [et al.]. First measurement of the total inelastic cross section of positively charged kaons on argon at energies between 5.0 and 7.5 GeV // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 110, no. 9. — P. 092011. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.092011>.
18. A. Abed [et al.]. Performance of a Modular Ton-Scale Pixel-Readout Liquid Argon Time Projection Chamber // Instruments. — 2024. — Vol. 8, no. 3. — P. 41. — <https://doi.org/10.3390/instruments8030041>.
19. A. Abed [et al.]. The DUNE Far Detector Vertical Drift Technology. Technical Design Report // JINST. — 2024. — Vol. 19, no. 08. — P. T08004. — <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/08/T08004>.
20. Self-Similar Growth of Bose Stars / A. S. Dmitriev, D. G. Levkov, A. G. Panin, I. I. Tkachev // Phys. Rev. Lett. — 2024. — Vol. 132, no. 9. — P. 091001. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.091001>.
21. Kim E., Nugaev E. Effectively flat potential in the Friedberg–Lee–Sirlin model // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 8. — P. 797. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13167-w>.



22. Kim E., Nugaev E., Shnir Y. Large solitons flattened by small quantum corrections // *Phys. Lett. B.* — 2024. — Vol. 856. — P. 138881. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138881>.
23. Smirnov A. Initial Data Problem for a Traversable Wormhole with Interacting Mouths // *Grav. Cosmol.* — 2024. — Vol. 30, no. 3. — P. 289–300. — <http://dx.doi.org/10.1134/S0202289324700191>.
24. Berezin V., Ivanova I. Conformally Invariant Gravity and Gravitating Mirages // *Universe.* — 2024. — Vol. 10, no. 3. — P. 147. — <https://doi.org/10.3390/universe10030147>.
25. Mironov S., Valencia-Villegas M. Stability of nonsingular cosmologies in Galileon models with torsion: A no-go theorem for eternal subluminality // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 109, no. 4. — P. 044–073. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.044073>.
26. Mironov S., Valencia-Villegas M. Healthy Horndeski cosmologies with torsion // *JCAP.* — 2024. — Vol. 07. — P. 030. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/07/030>.
27. Mironov S. A., Shtennikova A. M. Perturbations in Horndeski Theory above Anisotropic Cosmological Background // *JETP Lett.* — 2024. — Vol. 119, no. 5. — P. 339–344. — <https://doi.org/10.1134/S002136402360204X>.
28. Mironov S., Volkova V. DPSV trick for spherically symmetric backgrounds // *Nucl. Phys. B.* — 2024. — Vol. 1004. — P. 116550. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2024.116550>.
29. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Reviving Horndeski after GW170817 by Kaluza-Klein compactifications // *Phys. Lett. B.* — 2024. — Vol. 858. — P. 139058. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139058>.
30. Andreev Yu. M. [et al.]. First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 132, no. 21. — P. 211803. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.211803>.
31. Andreev Yu. M. [et al.]. Dark-Sector Search via Pion-Produced  $\eta$  and  $\eta'$  Mesons Decaying Invisibly in the NA64h Detector // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 133, no. 12. — P. 121803. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.121803>.
32. Acero M. A. [et al.]. Expanding neutrino oscillation parameter measurements in NOvA using a Bayesian approach // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110, no. 1. — P. 012005. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.012005>.
33. Acero M. A. [et al.]. Search for CP-Violating Neutrino Nonstandard Interactions with the NOvA Experiment // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 133, no. 20. — P. 201802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.201802>.

34. Butkevich A. V. Reduced cross sections of electron and neutrino charged current quasielastic scattering on nuclei // *Phys. Rev. C*. — 2024. — Vol. 109, no. 4. — P. 045502. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.045502>.
35. Radioassay of the materials for AMoRE-II experiment / A. Agrawal, V. V. Alenkov, P. Aryal [et al.] // *Frontiers in Physics*. — 2024. — Vol. 12. — <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2024.1362209>.
36. Antineutrino Spectra of  $^{235,238}\text{U}$  and  $^{239,241}\text{Pu}$  Taken from the Double Chooz Experiment / A. P. Vlasenko, S. V. Ingerman, P. Yu. Naumov, V. V. Sinev // *Phys. Atom. Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 1. — P. 79–89. — <https://doi.org/10.1134/S1063778824010599>.
37. Agostini M. [et al.]. An improved limit on the neutrinoless double-electron capture of  $^{36}\text{Ar}$  with GERDA // *Eur. Phys. J. C*. — 2024. — Vol. 84. — P. 34. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-12280-6>.
38. Agostini M. [et al.]. Searches for new physics below twice the electron mass with GERDA // *Eur. Phys. J. C*. — 2024. — Vol. 84. — P. 940. — <https://doi.org/epjc/s10052-024-13020-0>.
39. Частотно-временной анализ изменений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS, измеренных детектором LVD / В. Ф. Якушев, Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин [и др.] // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2024. — Т. 166, № 3. — С. 330–339. — <https://doi.org/10.31857/S0044451024090049>.
40. Bezrukov L. B. [et al.]. Study of the Delayed Pumping Effect in an Underground Laboratory by Correlation Analysis of Radon and Air Ion Concentrations // *Geomagn. Aeron.* — 2024. — Vol. 64, no. 1. — P. 102–111. — <https://doi.org/10.1134/s0016793223600765>.
41. Агафонова Н. Ю. [и др.]. Лунно-месячные вариации фоновых гамма квантов измеренных на LVD // *Ядерная Физика*. — 2024. — Т. 87, № 1. — С. 26–32. — <https://doi.org/10.31857/S0044002724010047>.
42. Agafonova N. Yu. [et al.]. Analysis of Correlations between the Counting Rate for Natural-Radioactivity Gammas at the Large Volume Detector (LVD) and Atmospheric Pressure // *Phys. Atom. Nucl.* — 2024. — Vol. 87, no. 6. — P. 732–739. — <https://doi.org/10.1134/S1063778824700686>.
43. Eroshenko Yu. N. Strong gravitational lensing of blazar gamma-radiation and intergalactic magnetic fields // *Chinese Physics C*. — 2024. — Vol. 48, no. 1. — P. 015104. — <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad0b6a>.
44. A. Angel [et al.]. Real-time monitoring for the next core-collapse supernova in JUNO // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2024. — Vol. 2024, no. 01. — P. 057. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/01/057>.

45. Z. Jie [et al.]. Model-independent Approach of the JUNO 8B Solar Neutrino Program // The Astrophysical Journal. — 2024. — Vol. 956, no. 2. — P. 122. — <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad2bfd>.

46. Test of the vector portal with dark fermions in the charge-exchange reactions in the NA64 experiment at CERN SPS / S. Gninenko, D. Kirpichnikov, S. Kuleshov [et al.] // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 109, no. 7. — P. 075021. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.075021>.

47. Zhevlakov A., Kirpichnikov D., Lyubovitskij V. Lepton flavor violating dark photon // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 109, no. 1. — P. 015015. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.015015>.

48. Krasnikov N. V. Dark matter models with suppressed dark matter nuclei elastic cross section // Phys. Lett. B. — 2024. — Vol. 854. — P. 138747. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138747>.

A.2 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ

1. Kriukova E. Dark photon emission in elastic proton bremsstrahlung // PoS. — 2024. — Vol. ICPPCRubakov2023. — P. 011. — <https://doi.org/10.22323/1.455.0011>. 2. Impact of SeaQuest data on sea-quark PDFs at large x / S. Alekhin, M. V. Garzelli, S. Kulagin, S. Moch // PoS. — 2024. — Vol. EPS-HEP2023. — P. 279. — <https://doi.org/10.22323/1.449.0279>.

3. Alekhin S. I., Kulagin S. A., Petti R. On the Interplay of Nuclear and Higher-Twist Corrections in Nuclear Structure Functions // 31st International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.21472>.

4. Ingerman S. V., Sinev V. V. Application of the clarified database of parameters of beta-active atomic nuclei for antineutrino spectrum calculation // 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2024). — 2024. — 10.

5. Eroshenko Yu. N. Absorption in the 21 cm line in the pre-galactic epoch // Proceedings of the 66th Scientific Conference of MIPT, April 1-6, 2024. Fundamental and applied physics. M: Fizmatkniga, 2024 (in Russian). — 2024. — P. 296–297.

A.3 Иные публикации по теме

1. Troitsky S. V. Stellar evolution and axion-like particles: new constraints and hints from globular clusters in the GAIA DR3 data // arXiv eprints. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.02266>.

2. Strong limits on keV-scale galactic sterile neutrino dark matter with stray light from NuSTAR after 11 years of operation / R. A. Krivonos, V. V. Barinov, A. A. Mukhin, D. S. Gorbunov. — 2024. — 5. — <https://arxiv.org/abs/2405.17861>.

3. Abrams D. [et al.]. The EMC Effect of Tritium and Helium-3 from the JLab MARATHON Experiment. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.12099>.
4. Ageeva Y., Petrov P., Shaposhnikov M. Non-renormalizable theories and finite formulation of QFT. — 2024. — 9. — <https://arxiv.org/abs/2409.15036>.
5. Ageeva Y., Kotenko M., Petrov P. The primordial non-Gaussianities for non-singular Horndeski cosmologies. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.10742>.
6. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Higher derivative SVT theories from Kaluza-Klein reductions of Horndeski theory. — 2024. — 8. — <https://arxiv.org/abs/2408.04626>.
7. Collaboration NA62. Observation of the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  decay and measurement of its branching ratio. — 2024. — <https://arxiv.org/abs/2412.12015>.
8. Agrawal A., Alenkov V. V., Aryal P. [et al.]. Improved limit on neutrinoless double beta decay of  $^{100}\text{Mo}$  from AMoRE-I. — 2024. — <https://arxiv.org/abs/2407.05618>.
9. A. Angel [et al.]. JUNO Sensitivity to Invisible Decay Modes of Neutrons. — 2024. — 04. — <https://arxiv.org/abs/2405.17792>.
10. A. Angel [et al.]. Prediction of Energy Resolution in the JUNO Experiment. — 2024. — 04. — <https://arxiv.org/abs/2405.17860>.
11. A. Angel [et al.]. Potential to Identify the Neutrino Mass Ordering with Reactor Antineutrinos in JUNO. — 2024. — 04. — <https://arxiv.org/abs/2405.18008>.
12. Abe S. [et al.]. Characterization of the optical model of the T2K 3D segmented plastic scintillator detector. — 2024. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2410.24099>.
13. Abe K. [et al.]. First joint oscillation analysis of Super-Kamiokande atmospheric and T2K accelerator neutrino data. — 2024. — 5. — <https://arxiv.org/abs/2405.12488>.
14. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. The bremsstrahlung-like production of the massive spin-2 dark matter mediator. — 2024. — 12. — <https://arxiv.org/abs/2412.10150>.
15. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. Implication of the Weizsacker-Williams approximation for the dark matter mediator production. — 2024. — 9. — <https://arxiv.org/abs/2409.12748>.
16. Probing leptophobic dark sector with a pseudoscalar portal in the NA64 experiment at CERN / S. Gninenko, D. Kirpichnikov, N. Krasnikov [et al.]. — 2024. — 7. — <https://arxiv.org/abs/2407.01181>.