

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. № 125071608559-5

Рег. №



M.V. Либанов

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ФИЗИКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ И
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
(промежуточный за 2025, этап 1)

ФЦП

Руководитель НИР,
И.о. директора ИЯИ РАН.,
д-р. физ.-мат. наук,
чл.-корр. РАН

30.12.2025 М.В. Либанов

подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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


30.12.2025
подпись, дата

М. В. Либанов
(введение, заключение)

Исполнители:

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


30.12.2025
подпись, дата

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

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Д. В. Кирпичников
(разделы 1, 12, заключение)

Гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Н. В. Красников
(разделы 1, 12-29, заключение)

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


30.12.2025
подпись, дата

С. Н. Гниенко
(раздел 12)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Ю. М. Андреев
(разделы 12, 34)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

А. В. Копылов
(раздел 11)

Гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Ю. М. Куденко
(разделы 4, 5)

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

А. В. Буткевич
(раздел 32)

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Б. С. Пантуев
(раздел 9)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Б. В. Казалов
(разделы 10, 36)

Гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

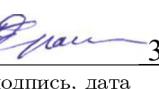
Л. Б. Безруков
(разделы 7, 8)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Н. Ю. Агафонова
(разделы 2, 3)

Ст. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук


30.12.2025
подпись, дата

Ю. Н. Ерошенко
(разделы 30, 31)

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат.
наук

Нормконтроль


30.12.2025
подпись, дата

Б. К. Лубсандоржиеев
(разделы 6, 35)


30.12.2025
подпись, дата

О. Н. Либанова
(введение, заключение)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 187 стр., 61 рис., 8 табл., 192 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, OKA, NOvA, T2K, JUNO, Xe-124, GERDA, Троицк-ню-масс, LHAASO, Carpet-3 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 удалено 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 CalcHEP, microOMEGAs, DMG4, ROOT, PYTHIA, FeynCalc, CORSIKA 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 Plank, Fermi, Telescope Array и др.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	9
1 Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц	36
1.1 Аксионоподобные частицы и эволюция звёзд в шаровых скоплениях	36
1.2 Гипотетическое нарушение лоренц-инвариантности и “мюонная загадка” широких атмосферных ливней	37
1.3 Новая физика и гамма-всплеск GRB 221009A	38
2 Обработка и анализ данных детектора LVD (Гран Сacco, LNGS) по исследованию мюонов под землей и естественной радиоактивности, как фона в экспериментах по поиску редких событий	40
2.1 Описание детектора LVD и регистрация мюонов под землей	40
2.2 Характеристики реконструированных мюонов в детекторе LVD	41
2.3 Фон от естественной радиоактивности. Анализ скорости счета гамма-квантов в подземных залах LVD и LSD	45
3 Анализ данных и моделирование различных фонов первого этапа проекта NEWSdm (Гран Сacco, LNGS) по поиску темной материи	49
3.1 Эксперимент NEWSdm	49
3.2 Источники фона для поиска темной материи	50
3.3 Гамма фон от распада радиоактивных ядер в грунте Гран Сacco	51
4 Поиск нарушения СР-инвариантности и измерение сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280 в ускорительном эксперименте с длинной базой T2K	54
4.1 Продолжение набор статистики с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K при помощи 30 ГэВ-ного ускорителя J-PARC. Новые данные эксперимента T2K в 2025 г	54
4.2 Анализ данных по поиску нарушения СР-инвариантности в эксперименте T2K	55
4.3 Измерение сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280	57
5 Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино)	59
5.1 Эксперимент NA62	59
5.2 Эксперимент ОКА (Протвино)	60

6 Проведение физического пуска эксперимента JUNO, настройка и отладка его детекторных элементов.....	61
7 Поиск двойного безнейтринного бета распада ^{76}Ge в составе международной коллаборации GERDA	63
8 Увеличение точности измерения угла смешивания тэта-13 осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz. - Использование антинейтринных спектров, полученных в эксперименте Double Chooz, для отработки метода вычисления антинейтринных спектров для реакторов с другим составом топлива.	65
8.1 Увеличение точности измерения угла смешивания тэта-13 осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz.	65
8.2 Использование антинейтринных спектров, полученных в эксперименте Double Chooz, для отработки метода вычисления антинейтринных спектров для реакторов с другим составом топлива.	65
9 Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс.....	66
9.1 Экспериментальная установка	66
9.2 Обработка экспериментальных данных.....	67
9.3 Работы над усовершенствованием и модернизацией криогенной системы.	71
9.4 Расширение возможностей работы на вакуумных стендах	72
9.5 Развитие программного обеспечения	74
10 Поиск безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo в составе международной коллаборации AMoRE.....	76
11 Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика.....	82
11.1 Описание методики.	82
11.2 Результаты измерений	86
11.3 Поиск суточных вариаций скорости счета.	89
12 Получение новых ограничений на легкую темную материю в эксперименте NA64	96
12.1 Общий статус эксперимента NA64.....	96
12.2 Проведение сеансов набора данных на электронном и мюонном пучке, для исследование возможности объяснения (g-2) мюонной аномалии за счет вклада новых частиц.	96
12.2.1 Результаты тестирования вето-калориметра VHCAL	97
12.3 Результаты сеансов 2025 года.....	98

12.3.1 Предварительные результаты поиска распада $A' \rightarrow invisible$ с использованием электронов	100
13 Усовершенствование математического аппарата многопетлевых вычислений в квантовой теории поля, и предложение представления ренорм-инвариантных величин в виде ряда теории возмущений. Альтернативный подход к перенормировкам в КТП	103
14 Получение ограничений на параметры моделей ранней Вселенной из сравнения предсказаний с современными наблюдательными данными. Первичные негауссности в модели ранней Вселенной со сжатием	104
15 Исследование модели двух массивных скалярных полей с разными скоростями звука	105
16 Построение моделей ранней Вселенной, альтернативных инфляционным, с модифицированным гравитационным сектором Хорндески. Возмущения над сферически-симметричным фоном в скалярно-тензорных теориях	107
17 Скалярно-векторно-тензорные теории со старшими производными в действии ..	109
18 Проверка моделей с лёгкими гипотетическими частицами на действующих планируемых установках с фиксированной мишенью. Учёт вкладов ЭФ Паули в рождение тёмных фотонов в процессе неупругого тормозного излучения ..	110
19 Численный анализ таяния доменных стенок и образования ими гравитационных волн	112
20 Изучение образования и аннигиляции доменных стенок в моделях со слабо нарушенной дискретной симметрией	113
21 Построение моделей рождения и распространения излучения, согласующихся с результатами астрофизических экспериментов. Поиск фотонной линии от аннигиляции тёмной материи с массой кэВ-диапазоне с помощью NuSTAR: ограничения на $\langle \sigma v \rangle$ по итогам 11 лет наблюдений	114
22 Ограничения на нарушение Лоренц-инвариантности нейтрино	115
23 Новый галоскоп для поиска аксионной темной материи	116
24 Резонансная генерация стерильных нейтрино в ранней Вселенной с ненулевой лептонной асимметрией	117
25 Построение квазиклассических методов описания непертурбативных процессов в Бозе звездах. Самоподобная гравитационная конденсация Бозе-Эйнштейна	118
26 Новая физика в широких атмосферных ливнях	119
27 Нетопологические солитоны в эффективной теории поля	120
28 EMC-эффект в ядрах ^3H и ^3He из данных эксперимента MARATHON	121

29 Корреляция между ядерными поправками и высшими твистами в глобальном КХД-анализе	122
30 Изучение физических процессов и нелинейных структур в эпоху до реонизации Вселенной при наличии возмущений плотности разного типа	123
31 Исследование первичных черных дыр в ранней Вселенной и в современную эпоху	130
32 Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучками мюонных нейтрино	133
32.1 Объединенный анализ нейтринных осцилляций в экспериментах T2K и NOvA	133
32.2 Поиск осцилляций активных нейтрино в стерильные в эксперименте NOvA	134
32.3 Двойные дифференциальные инклузивные сечения рассеяния нейтрино на углероде	135
33 Прецизионное измерение параметров редких распадов B-мезонов в эксперименте LHCb, прецизионное измерение параметров СР-нарушения	137
34 Изучение характеристик КФЭУ для адронного калориметра высокой гранулярности. Обработка и анализ данных, полученных в эксперименте CMS в 2024-2025 годах	138
35 Разработка фотодетекторов и сцинтилляционных детекторов для проектируемых калориметров эксперимента СЕРС	139
36 Разработка алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных, с целью улучшения эффективности отбора событий эксперимента по поиску 2K-захвата ^{124}Xe	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	163
Приложение А Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.	180

ВВЕДЕНИЕ

1 Задача "Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц"

1.1 Акционоподобные частицы и эволюция звёзд в шаровых скоплениях

Гипотетические акционоподобные частицы (ALP) естественным образом появляются во многих расширениях Стандартной модели. Они являются кандидатами на частицы тёмной материи и могут нести информацию о новой физике из астрономических наблюдений. Из-за крайне слабых взаимодействий с обычным веществом их трудно обнаружить в лабораторных экспериментах, поэтому значительная часть наиболее строгих ограничений на параметры ALP получена из астрофизики звёзд. Внутри звезды акционоподобные частицы могут рождаться в плазменных и фотонных процессах и уносить энергию, приводя к дополнительному охлаждению и, следовательно, к модификации эволюции звезд на поздних стадиях.

Особенно чувствительными к дополнительным каналам потери энергии оказываются красные гиганты и звёзды, находящиеся на горизонтальной последовательности диаграммы цвет–светимость. Для красных гигантов важно положение вершины последовательности, а для звезд на горизонтальной ветви — относительное число таких объектов по сравнению с красными гигантами в одном и том же шаровом скоплении. Эти наблюдаемые величины используются для получения ограничений на константы связи ALP с электронами и фотонами.

Публикация третьего выпуска каталога *Gaia* (DR3) радикально улучшила точность астрометрии и фотометрии звёзд, в том числе в шаровых скоплениях. Это позволяет более надёжно выделять членов скоплений по параллаксам и собственным движениям, значительно снижая загрязнение звёздами поля и уменьшая систематические ошибки. Рассматриваемая работа использует эти новые данные для семи галактических шаровых скоплений и повторно анализирует эффекты дополнительного охлаждения, интерпретируя их в терминах констант связи ALP с электронами g_{ae} и фотонами $g_{a\gamma}$.

1.2 Гипотетическое нарушение лоренц-инвариантности и “мюонная загадка” широких атмосферных ливней

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ), порождаемые космическими лучами сверхвысоких энергий, являются единственным доступным инструментом для исследования взаимодействий частиц в энергиях, значительно превышающих достижимые на современных ускорителях. Одним из наиболее обсуждаемых явлений в этой области является “мюонный избыток” (или “мюонная загадка”): во многих экспериментах, работающих в широком диапазоне энергий и с разными методиками регистрации, на-

бллюдаемое число мюонов в ливнях устойчиво превышает предсказания стандартных моделей взаимодействий.

Эта несогласованность затрудняет интерпретацию данных по космическим лучам: реконструкция энергии и состава первичной частицы чувствительна к доле мюонной и электромагнитной компоненты на уровне земли. Если модели взаимодействий систематически недооценивают мюонную компоненту, то выводы о спектре и составе космических лучей могут быть искажены. Различные попытки объяснить мюонный избыток включали модификации адронных моделей, добавление новых каналов образования мюонов и привлечение новой физики за пределами Стандартной модели.

Одним из возможных направлений является нарушение Лоренц-инвариантности (ЛИ), при котором кинематика высокоэнергетических процессов в атмосфере изменяется по сравнению со стандартной. В таких сценариях может меняться, например, вероятность рождения электрон-позитронных пар или других частиц, что влияет на развитие электромагнитного каскада в ШАЛ. Рассматриваемая работа систематически исследует, может ли сублюминальное нарушение ЛИ в фотонном секторе объяснить наблюдаемый мюонный избыток, и одновременно использует данные об ШАЛ для получения новых ограничений на масштаб ЛИ-нарушения.

1.3 Новая физика и гамма-всплеск GRB 221009A

Гамма-всплеск GRB 221009A стал самым ярким и энергетически мощным зарегистрированным гамма-всплеском, привлекшим огромное внимание как астрофизиков, так и специалистов по новой физике. Наземные установки LHAASO и Carpet-3 зарегистрировали от этого события фотоны с энергиями вплоть до десятков и сотен тераэлектронвольт, что при стандартном описании распространения гамма-лучей в космических полях излучения представляется крайне проблематичным.

Ожидается, что такие фотоны должны эффективно поглощаться за счёт рождения пар e^+e^- на фоне космического микроволнового и инфракрасного излучения. Для удалённого источника с ненулевым красным смещением оптическая толщца для фотонов энергий $\gtrsim 10-100$ ТэВ велика, и стандартные модели предсказывают сильное подавление потока. Наблюдение же фотонов столь высоких энергий породило многочисленные сценарии новой физики, включая смешивание фотонов с аксионоподобными частицами в магнитных полях и нарушение Лоренц-инвариантности, изменяющее пороги и сечения процессов поглощения.

Первые обсуждения основывались на оперативных телеграммах и предварительных спектрах. Позднее LHAASO и Carpet-3 опубликовали уточнённые результаты, включающие обновлённую оценку энергии Carpet-3-события и более детальные спектры. Рассматриваемая работа ставит задачу построить объединённый интегри-

рованный по времени спектр всплеска по данным LHAASO (установки WCDA и KM2A) и Carpet-3 и затем количественно сравнить стандартную модель поглощения с двумя сценариями новой физики: смешиванием фотон-ALP и сублюминальным ЛИ-нарушением.

2 Задача "Обработка и анализ данных детектора LVD (Гран Сассо, LNGS) по исследованию мюонов под землей и естественной радиоактивности, как фона в экспериментах по поиску редких событий"

Одной из важных экспериментальных задач, решаемых в эксперименте LVD [1], [2] является исследование мюонов космических лучей. Мюоны, наблюдаемые глубоко под землей, представляют собой высокоэнергетические остатки атмосферных ливней, образовавшихся при первых столкновениях первичных ядер с ядрами воздуха. Изучение атмосферных мюонов на больших глубинах под землей позволяет получить информацию о первичном составе, энергетическом спектре космических лучей и взаимодействиях элементарных частиц при высоких энергиях.

Мюоны в основном генерируются легкими компонентами, протонами и гелием, с энергией 10^{13} эВ. При более высоких энергиях вклад больших множественостей в подземный поток мюонов увеличивается, при этом увеличивается вклад более тяжелых ядер.

В настоящее время существует «мюонная загадка» – нерешенная проблема, связанная с избытком мюонов космических лучей при сверхвысоких энергиях первичных частиц [3].

Причем этот избыток возрастает с увеличением энергии первичных частиц (с увеличением зенитного угла). Согласно существующим теориям, при развитии ШАЛ образуется определенное количество мюонов, но экспериментальные данные значительно превышают теоретические предсказания. Мюонная загадка была сформулирована на основе результатов, полученных в различных экспериментах, проведенных как на ускорительных детекторах, так и в космических лучах.

Основными источниками фона в подземных экспериментах являются: радиоактивность окружающих горных пород, присутствие радиоактивных примесей в материале детекторов и их защиты, мюоны космических лучей и их вторичные частицы, а также содержащийся в воздухе и воде газ радон ^{222}Rn и продукты его распада. Фон от ^{222}Rn в атмосфере помещений, трудно учитывать, так как концентрация радона величина не постоянная в силу подвижности и хорошей растворимости в воде этого газа. ^{222}Rn постоянно генерируется в горных породах в процессе естественного радиоактивного распада. Уменьшение его концентрации в породе происходит как за счёт распада, так и в результате миграции из массива в воздух. На изменение концентрации радона в подземных помещениях влияют многие факторы и это усложняет

задачу учета фона, связанного с радоном. Причиной изменения может быть как человеческая деятельность, так и природные факторы. Например, устройство и режим работы вентиляции, вибрация грунта (прохождение машин по транспортному туннелю, работа техники и т.д.), изменение насыщения водой скального грунта, приливные силы, сейсмическая активность, деформации земной коры, возникновение напряжений в грунте.

3 Задача "Анализ данных и моделирование различных фонов первого этапа проекта NEWSdm (Гран Сассо, LNGS) по поиску темной материи"

В настоящее время существует большое количество косвенных экспериментальных указаний на существование темной материи [4], [5]. Эксперимент NEWSdm [6] 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).

Для подземных экспериментов, таких как NEWSdm, сложной задачей является учет всех фонов, включающих как постоянный фон от радиоактивности материалов конструкции и грунта, так и переменный, зависящий от влажности, давления, температуры, перемешивания воздуха при открывании дверей в помещение эксперимента. Исследовать все параметры фонов возможно проводя детальное моделирование экспериментов или строя новые более точные детекторы.

4 Задача "Поиск нарушения СР-инвариантности и измерение сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280 в ускорительном эксперименте с длинной базой T2K"

В 2025 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работы в рамках международного ускорительного нейтринного эксперимента T2K (Tokai-to-Kamioka), основной целью которого на данный момент является поиск нарушения СР-инвариантности в лептонном секторе, а также измерение различных параметров осцилляций (углов смешивания, разности квадратов масс и СР-нарушающей фазы), сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в веществе модернизированного ближнего детектора ND280 и определение иерархии масс нейтрино.

Всего с начала 2010 г. по конец 2025 г. в T2K проведено 15 сеансов с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Новые сеансы по набору статистики проходили в феврале-марте 2025 г. (№14) и в ноябре-декабре 2025 г. (№15).

Был проведен обновленный анализ данных, набранных в ходе предыдущих сеансов (№№1-11), в котором удалось уменьшить систематические ошибки, связанные с дальним детектором. Получены и опубликованы в журнале Nature результаты совместного анализа T2K-NOvA. Получены и опубликованы результаты измерений сечений взаимодействия мюонных и электронных нейтрино в веществе как ближнего детектора ND280, так и дальнего детектора SK.

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

В 2025 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 продолжен анализ данных, набранных в 2023–2024 гг., и была проведена реинтерпретация результатов измерения вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в рамках процесса $K^+ \rightarrow \pi^+ X$.

В 2025 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. Продолжается анализ данных для различных мод распада положительных каонов.

6 Задача "Проведение физического пуска эксперимента JUNO, настройка и отладка его детекторных элементов"

В настоящее время нейтринная физика добилась впечатляющих успехов. С высокой точностью определены параметры осцилляций нейтрино – с рекордной точностью в экспериментах на реакторными нейтрино Daya Bay, RENO и Double Chooz измерен третий угол смешивания Θ_{13} , в экспериментах с длинной базой ведутся измерения СР-нарушающей фазы δ матрицы смешивания нейтрино. Одной из основных задач современной нейтринной физики является определение иерархии масс нейтрино. Именно на решение этой задачи нацелен международный крупномасштабный эксперимент JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory), создающийся близ города Цзяньмынь в провинции Гуандун на юго-востоке Китая. Эксперимент расположен на расстоянии ~ 53 км от реакторных комплексов Тайшань (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 нейтриновых 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 Тайшань, позволит не только вести измерения параметров осцилляций нейтрино с точностью лучше 1%, но и даст возможность исследования нарушения СР-четности. Детектор ТАО — это 2,8 тонны жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкил бензола с добавкой гадолиния.

7 Задача "Поиск двойного безнейтринового бета распада ${}^{76}\text{Ge}$ в составе международной коллаборации GERDA"

Целью международного эксперимента GERDA является поиск безнейтринового 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, получен первый результат по фону детектора — $4.2 \cdot 10^{-4}/\text{кэВ}\cdot\text{кг}\cdot\text{год}$ и первое ограничение на период полураспада по моде $0\nu\beta\beta$. 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. С 2024 году российские учёные участвуют в работе коллаборации GERDA и LEGEND удалённо.

8 Задача "Увеличение точности измерения угла смешивания тэта-13 осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино

в эксперименте Double Chooz. - Использование антинейтринных спектров, полученных в эксперименте Double Chooz, для отработки метода вычисления антинейтринных спектров для реакторов с другим составом топлива"

Основной целью работы являлось измерение осцилляционного угла смешивания нейтрино θ_{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 большая статистика нейтринных событий ближним детектором (201 тысяча нейтринных событий) [7], что дает возможность получить экспериментальный спектр антинейтрино и сравнить его с модельным расчетом.

В ядерном реакторе горит смесь изотопов урана и плутония: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}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

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \quad (0.1)$$

Энергетический порог реакции обратного бета-распада (0.1) 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 ν_e , ν_μ , ν_τ . 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 ν_μ в ν_τ . В экспериментах с реакторными нейтрино на расстояниях, где эффективен переход ν_e в ν_μ были найдены параметры этого перехода. Для измерения параметров перехода ν_e в ν_τ 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-распа-

да (ОБР) (0.1) на ядерно-свободном протоне. Основной проблемой является перевод измеренного спектра позитронов реакции ОБР в спектр антинейтрино.

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_ν - энергия налетающего антинейтрино, 1.806 – порог реакции (0.1) 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 сцинтиляционном детекторе.

В 2024 году проводился расчет четырех спектров антинейтрино от осколков деления тяжелых изотопов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}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 $\sigma_f = 5.70 \times 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$, хорошо совпадает с экспериментальным сечением Double Chooz $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \times 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$ [7]. Отличие в расчетном и экспериментальном сечениях может объясняться дополнительным вкладом в экспериментальное сечение антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом. Проблема учёта вклада излучения бассейна в различные величины изучалась в 2025 году.

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.

Нейтриновые состояния ν_e , ν_μ , ν_τ , и стерильные нейтрино ν_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 [8, 9].

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 2025 году проведено два сеанса измерений.

10 Задача "Поиск безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo в составе международной коллаборации AMoRE"

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}Mo . Энергия перехода $Q_{\beta\beta}$ для ^{100}Mo составляет 3034 кэВ, что значительно больше, чем максимальная энергия гамма-излучения от природной радиоактивности (линия 2614,5 кэВ ^{208}Tl). Также достаточно большая природная распространённость (9,7%) позволяет с меньшими затратами наработать большое количество изотопа. С целью поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{100}Mo , в 2010 году, была организована международная коллaborация AMoRE (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 ~ 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 LMO-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 LMO-кристаллов, с общей массой 24 кг. На втором этапе будет добавлено еще 360 LMO-кристаллов, с общей массой 150 кг. Т.о. полная масса изотопа ^{100}Mo будет составлять ~ 90 кг. Место расположения эксперимента - подземная лаборатория Yemilab, Южная Корея. Эксперимент будет проводиться с 2026 по 2035 гг.

11 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. На-

ми 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 для поиска темных фотонов Задачи 11 используется мультикатодный счетчик с металлическим катодом и нитями из никрома. Наше исследование сфокусировано, как новая постановка задачи, на поиске суточных вариаций скорости счета, которое может наблюдаться вследствие вращения Земли. Обнаружение эффекта от темных фотонов опирается на возможном наблюдении избытка 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 трех серий, каждая серия из четырех ранов измерений длительностью примерно 50–60 суток. Получены оригинальные результаты. В качестве доказательной базы результаты измерений должны воспроизводиться в последующих измерениях либо в независимом эксперименте. По результатам работ с 2022 по 2025 годы нами были получены два патента на полезную модель и один на метод.

12 Задача "Получение новых ограничений на легкую темную материю в эксперименте NA64"

В эксперименте NA64 на ускорителе SPS в ЦЕРНе был впервые применен метод определения недостающей энергии-импульса в поиске скрытых секторов. Текущая исследовательская программа NA64 с использованием этого подхода (рисунок 0.1) направлена на решение трех наиболее интересных и важных взаимодополняющих проблем в физике скрытого сектора, которые доступны для изучения на ускорителе SPS в ЦЕРН:

- поиск легкой темной материи и других объектов физики за пределами Стандартной модели с массами ниже электротяжелой шкалы (много меньше 100 ГэВ), объединяющий результаты электронных и позитронных пучков на канале H4 ускорителя SPS;
- поиск скрытых секторов, преимущественно связанных со вторым поколением лептонов, и легких реликтов темной материи с помощью мюонного пучка на канале M2;
- поиск лептофобных скрытых секторов, преимущественно связанных с легкими кварками Стандартной модели, с помощью адронных пучков SPS.

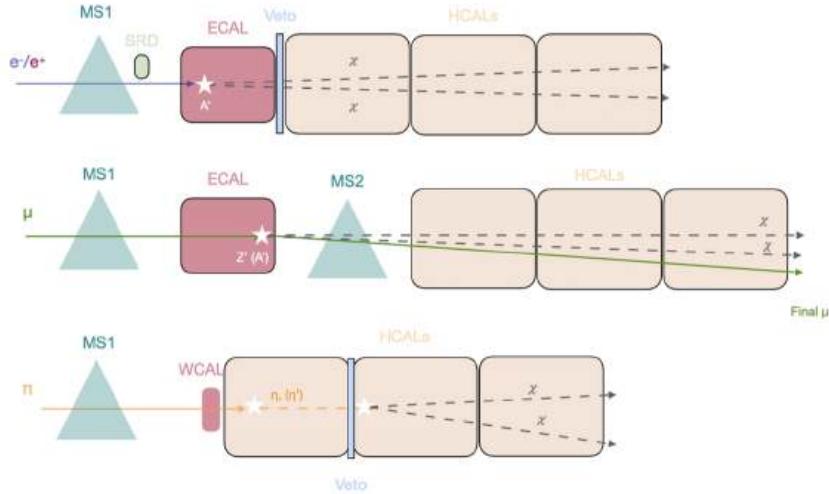


Рисунок 0.1 — Схема метода определения недостающей энергии-импульса, используемого в эксперименте NA64 на пучках e^- , e^+ , μ и π

Недавно, по результатам измерений на канале H4, в эксперименте NA64 установлены самые строгие верхние пределы в плоскости масс кинетического смещения (ϵ) и темного фотона (A') для масс ниже 350 МэВ [10]. Собранные данные также позволяют ограничить значения скалярной и майорановской темной материи со связью $a_D \leq 0,1$ и $m_{A'} > 3m_x$ в диапазоне масс $0,001 \leq m_x \leq 0,1$. В настоящем отчете описываются последние результаты, полученные в ходе эксперимента на различных каналах SPS. Также приводятся сведения о текущем состоянии анализа данных, собранных в различных сеансах на каналах SPS, и о перспективах на будущее после долгосрочной остановки Большого адронного коллайдера LS3 (Long Shutdown 3). В 2025 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.

13 Задача "Усовершенствование математического аппарата много-петлевых вычислений в квантовой теории поля, и предложение представления ренорм-инвариантных величин в виде ряда теории возмущений. Альтернативный подход к перенормировкам в КТП"

Актуальным и активно развивающимся направлением исследований на сегодняшний день является исследование новых методов в теории перенормировок. Так, в работах [11], [12], [13] был отмечен [14], [15] и развит метод перенормировок с использованием уравнений типа Каллана-Симанчика. Так, в работах [11], [12], [13] и [16] было показано, что на самом деле уравнения КС можно использовать и для вычисления корреляционных функций, и эффективного потенциала (поправок к нему) в рассматриваемой теории. В этом методе дифференциальные уравнения содержат

только конечные величины/выражения, полученные из соответствующих (также сходящихся) диаграмм Фейнмана. Использование данного метода уже было продемонстрировано на примере перенормируемых теорий поля в работах [11], [12], [13] (теория ϕ^4 и теория взаимодействия двух скалярных полей). Однако, также весьма интересно убедиться и в том, что КС метод можно обобщить и на случай неперенормируемых теорий. Это и было сделано в работе [16].

Далее, в работе [17] подробно обсуждается, как именно такой подход связан со стандартным ренорм групповым уравнением. Уравнения КС были получены на полностью перенормированном языке, а далее в такой формулировке было показано, что уравнения КС полностью эквивалентны стандартному уравнению ренорм группы, но в схеме перенормировки массы на массовой оболочке. Все это было сделано в работе [17].

14 Задача "Получение ограничений на параметры моделей ранней Вселенной из сравнения предсказаний с современными наблюдательными данными. Первичные негауссости в модели ранней Вселенной со сжатием"

На сегодняшний день теория горячего Большого взрыва вместе с инфляционной парадигмой [18, 19, 20, 21, 22] являются ключевыми компонентами для описания эволюции ранней Вселенной. Модель инфляции находится в отличном согласии с результатами экспериментов [23], [24] и способна последовательно объяснить различные аспекты эволюции ранней Вселенной. Однако, модели Вселенной с начальной инфляцией пока нельзя считать совершенно доказанным, и Вселенная вполне могла развиваться и другими путями. Построение и исследование таких альтернатив и дополнений является активно развивающейся областью космологии сегодня. Одними из допустимых и широко обсуждаемых на данный момент в литературе являются сценарии: 1) модель Вселенной, начинающаяся со сжатия и с последующим отскоком [25, 26, 27]; 2) а также модель Генезиса, в которой Вселенная начинает свою эволюцию с плоского пространства-времени Минковского, постепенно переходя на этап расширения [28, 29, 30]. Нами была изучена модель скимающейся Вселенной (которая может далее претерпевать фазу отскока и последующей инфляции, либо сразу выходить на эпоху первичного разогрева после отскока) в рамках скалярно-тензорной теории модифицированной гравитации Хорндейки [31]. В рамках данной теории и модели мы исследовали трехточечную функцию и биспектр, предварительно получив необходимое действие третьего порядка по скалярным возмущениям метрики. Исследование и вычисление таких космологических параметров как наклон спектра, отношение амплитуд возмущений (скалярной к тензорной), и также биспектра и соответствующих негауссостей позволяет наложить на параметры теоретической

модели ограничения. В итоге указанная теоретическая модель ранней Вселенной оказалась жизнеспособной: можно так подобрать ее параметры, чтобы экспериментальные ограничения удовлетворялись. Тогда у нас в руках оказывается модель, которая согласуется с наблюдательными данными и подходит для дальнейших исследований, которые в результате улучшают наше понимание физики на ранних этапах эволюции Вселенной. Данные исследования биспектра в модели с отском были проделаны в работе [16].

15 Задача "Исследование модели двух массивных скалярных полей с разными скоростями звука"

Была исследована теория с несколькими (конкретно двумя) действительными скалярными полями с нестандартным дисперсионным соотношением методами аналитичности и унитарности. Такая модель может быть полезна во многих областях физики: от анизотропных магнитных полей в астрофизике, до анизотропии в кристаллах в моделях физики твердого тела. Так, рассматривались два массивных скалярных поля с ненулевыми, отличными от единицы и различающимися скоростями звука. В лагранжиан добавлено самодействие вида $(\phi_1^4 + \phi_2^4)$ и взаимодействие $(\phi_1^2 \phi_2^2)$.

Прежде всего было получено обобщение оптической теоремы (соотношения унитарности) для такой теории. Как и обычно, оптическая теорема выводится из сохранения полной вероятности и унитарности S-матрицы. Однако, теперь в нее явно входят скорости звука полей и модифицированное дисперсионное соотношение, связывающее 3-импульс, энергию, скорость звука и массу. Все кинематические расчёты проводятся в системе центра масс, а амплитуды записываются в терминах парциальных волн, где оптическая теорема имеет простой вид.

Были рассмотрены два случая для процессов $(2 \rightarrow 2)$:

1. в промежуточном состоянии присутствуют различимые частицы (одно ϕ_1 и одно ϕ_2);
2. частицы неразличимы.

Нормировочные коэффициенты в этих случаях различаются вдвое, что согласуется с известными результатами для безмассового случая или при единичных скоростях звука. На основе модифицированной оптической теоремы было получено унитарное ограничение – ограничение на действительную часть парциальной амплитуды. В низшем порядке по константам связи оптическая теорема проверена на конкретном примере: отдельно найдены древесные амплитуды и мнимая часть однопетлевых матричных элементов. Все коэффициенты полностью совпали с полученной формой оптической теоремы.

Как уже было сказано, унитарные ограничения оказываются полезными при анализе применимости теории, например в космологических моделях для оценки области энергий/времен, где модель остается слабо связанный (отсутствует проблема сильной связи). Аналогично модифицированная оптическая теорема и унитарные границы могут использоваться в физике конденсированных сред, моделях с нарушением лоренц-инвариантности, в задачах астрофизики с магнитными полями и т.д. В предельных случаях (безмассовый предел и/или скорости звука равны нулю) результаты сводятся к известным из литературы.

Далее была изучена перенормировка теории с несколькими массивными полями и нетривиальными скоростями звука. Методом фонового поля получены однопетлевой эффективный потенциал и бета-функции для соответствующих констант связи (также в однопетлевом приближении).

16 Задача "Построение моделей ранней Вселенной, альтернативных инфляционным, с модифицированным гравитационным сектором Хорндейси. Возмущения над сферически-симметричным фоном в скалярно-тензорных теориях"

Скалярно-тензорные теории гравитации, в частности теория Хорндейси и её расширения, представляют собой широкий класс теорий поля для описания модифицированной гравитации. Такие теории допускают нарушение изотропного условия энергодоминантности и позволяют строить несингулярные космологические модели и экзотические компактные объекты, в которых отсутствуют патологические степени свободы на линеаризованном уровне, такие как духи и градиентные неустойчивости. В то же время наблюдения таких событий как GW170817/GRB170817A, накладывают крайне жесткие ограничения на относительную скорость распространения гравитационных и электромагнитных волн и тем самым существенно ограничивают множество скалярно-тензорных теорий при условии минимальной связи фотона с метрикой.

В этом контексте в рамках проекта изучаются линейные возмущения над зависящим от времени сферически-симметричных фоном наиболее общего вида в трёх тесно связанных классах теорий: кубическом ($L_2 + L_3$) подклассе теории Хорндейси, в расширенных теориях Хорндейси, совместимых со световой скоростью гравитационных волн, а также в скалярно-векторно-тензорных теориях с неминимально связанным электромагнитной полем, полученных при компактификации Калузы-Клейна пятимерной теории Хорндейси. Центральными задачами являются: (i) анализ устойчивости высокоэнергетических мол над такими динамическими фонами, (ii) исследование структуры и общности теорем, запрещающих существование несингулярных

решений и (iii) изучение устойчивости равенства скоростей гравитационных и электромагнитных волн в сильно неоднородных режимах.

Общая цель работы — вывести квадратичные действия для соответствующих мод возмущений, сформулировать необходимые условия отсутствия духовых и градиентных неустойчивостей и выяснить, как эти условия согласуются с (возможной) запрещающей теоремой и ограничениями на скорость гравитационных волн в единой постановке для зависящих от времени сферически-симметричных решений в скалярно-тензорных и скалярно-векторно-тензорных теориях.

17 Задача "Скалярно-векторно-тензорные теории со старшими производными в действии" Наблюдения таких событий как GW170817/GRB170817A и ограничения на относительную скорость распространения гравитационных и электромагнитных волн простилировали исследование скалярно-векторно-тензорных теорий. Модификация векторного сектора, который обычно ассоциируют с электромагнитным полем, позволяет расширить феноменологически допустимый класс теорий при построении моделей темной энергии. Таким образом интересными задачами являются: (i) построение максимально общей скалярно-векторно-тензорной теории, (ii) исследование возмущений и определение подкласса со световыми скоростями гравитона, (iii) анализ возможных феноменологических ограничений на скалярно-векторно-тензорную теорию применительно к построению модели темной энергии.

Таким образом, цель работы - найти лагранжиан скалярно-векторно-тензорной теории общего вида, построить квадратичное действие и наложить ограничения на скорости возмущений, а также учесть условие на нераспад гравитона.

18 Задача "Проверка моделей с лёгкими гипотетическими частицами на действующих планируемых установках с фиксированной мишенью. Учёт вкладов ЭФ Паули в рождение тёмных фотонов в процессе неупругого тормозного излучения"

Совокупность имеющихся экспериментальных данных по осцилляциям нейтрино, измерения анизотропии реликтового излучения и астрономические наблюдения за движением вещества в галактиках убедительно демонстрируют неполноту Стандартной модели (СМ) и необходимость её расширения. Одним из способов расширения СМ, популярных в современной литературе [32], является добавление в теорию новых частиц-медиаторов: тёмных фотонов, тёмных скаляров, тяжёлых нейтральных лептонов и аксионов.

В данном проекте изучалось рождение тёмных фотонов массой 0.4–1.8 ГэВ в процессе неупругого тормозного излучения. Ранее этот процесс в качестве канала рождения тёмного фотона рассматривался в квазиреальном приближении в работах [33, 34], однако авторы исследовали часть амплитуды тормозного излучения,

связанную исключительно с вкладом ЭФ Дирака. По-видимому, это было сделано по аналогии с классическими работами [35, 36], в которых в 70-х годах прошлого века была проведена аналогичная процедура факторизации для рождения фотона СМ в процессе тормозного излучения электрона.

Поскольку в интересной нам области квадрата переданного импульса для протонов ЭФ Паули имеет тот же порядок величины, что и ЭФ Дирака, а иногда и превышает его, нами была проведена работа по уточнению сечения неупругого тормозного излучения и впервые были получены функции расщепления протона, связанные с ЭФ Паули.

19 Задача "Численный анализ таяния доменных стенок и образования ими гравитационных волн"

Космические доменные стенки – макроскопические структуры скалярного поля, разделяющие участки пространства с различными вакуумами, предсказываемыми в моделях с нарушенной дискретной симметрией. Нелинейная динамика скалярного поля приводит к возникновению масштабируемого решения, при котором внутри объёма характерного размера космологического горизонта всегда присутствует одинаковое количество бесконечных (для данного объёма) стенок. Это опасная для космологии система, поскольку стенки начинают доминировать что на радиационной, что на материальной стадии расширения Вселенной. Поэтому модели физики частиц со спонтанно нарушенной дискретной симметрией, допускающие образование стабильных космических доменных стенок, запрещены. В то же время, представляют значительный интерес модели, в которых стенки, пропадают спустя некоторое время после образования, чем не противоречат космологии. Пропасть они могут в ходе обратного фазового перехода, восстанавливающего дискретную симметрию при уменьшении температуры плазмы. В таких моделях скалярное поле может претендовать на роль тёмной материи. А особый интерес вызван возможностью экспериментальных проверок таких моделей за счёт образования доменными стенками гравитационных волн, доживающих до наших дней. Обнаружение гравитационных волн со специфическим спектром может указывать на соответствующие модели частиц тёмной материи и механизм их образования в ходе обратного фазового перехода. Соответствующие аналитические оценки спектров планировалось проверить в работе [37], поскольку они очень близко совпали с параметрами спектра гравитационных волн, объяснившими бы аномальные запаздывания сигналов пульсаров, обнаруженные в 2024 году.

20 Задача "Изучение образования и аннигиляции доменных стенок в моделях со слабо нарушенной дискретной симметрией"

Другая возможность разрушить образовавшиеся доменные стенки – явно нарушить дискретную симметрию, например за счёт дополнительного слагаемого в скалярном потенциале, приводящим к тому, что вакуумы теории перестают быть вырожденными. Система при этом стремится перейти в истинный вакуум, части которого постепенно заполняют всё больше и больше пространства. Площадь доменных стенок естественно сокращается в этом процессе, пока они совсем не пропадают. Тем не менее, времени существования конфигураций доменных стенок до их окончательного распада вполне хватает для образования гравитационных волн, которые в современной Вселенной могут свидетельствовать о нетривиальной динамики скалярных полей в ранней Вселенной. Время существования конфигурации, а значит и спектр гравитационных волн, зависит от степени вырождения вакуумов. Задача работы [38] состояла в проверке этой зависимости, аналитические оценки которой приписывают Зельдовичу.

21 Задача "Построение моделей рождения и распространения излучения, согласующихся с результатами астрофизических экспериментов. Поиск фотонной линии от аннигиляции тёмной материи с массой кэВ-диапазоне с помощью NuSTAR: ограничения на $\langle\sigma v\rangle$ по итогам 11 лет наблюдений"

Многочисленные проявления тёмной материи (ТМ) в астрофизике и космологии требуют либо модификации гравитации, либо привлечения новой физики частиц. Последний вариант подразумевает расширение Стандартной модели физики элементарных частиц, в рамках которого в ранней Вселенной формируется достаточное количество нерелятивистской, электрически нейтральной и космологически стабильной материи задолго до того, как температура космической плазмы опускается ниже 1 эВ. Такая материя может состоять из макроскопических объектов, например первичных чёрных дыр, Q-шаров, или же из новых фундаментальных частиц. В последнем случае соответствующие модели могут быть в общем виде проверены как прямыми, так и непрямыми методами поиска таких частиц. В настоящей работе мы рассматриваем орбитальный рентгеновский телескоп NuSTAR в качестве чувствительного инструмента для проверки моделей с частицами тёмной материи килоэлектронвольтного масштаба масс.

22 Задача "Ограничения на нарушение Лоренц-инвариантности нейтрино"

Лоренц-инвариантность является фундаментальным принципом современной физики, лежащим в основе специальной теории относительности. Однако многие теории квантовой гравитации предсказывают возможные малые нарушения этого принципа при экстремально высоких энергиях. Обнаружение таких нарушений стало бы

важным шагом в развитии фундаментальной физики. Особый интерес представляют исследования в нейтринном секторе, поскольку нейтрино могут достигать ультравысоких энергий в астрофизических процессах. Недавно коллаборацией KM3NeT был зарегистрирован нейтринный событие KM3-230213A с рекордной энергией около 220 ПэВ, что почти на два порядка превышает энергию предыдущих регистраций. Это событие открывает уникальную возможность проверить гипотезу нарушения Лоренц-инвариантности на беспрецедентном уровне.

23 Задача "Новый галоскоп для поиска аксионной темной материи"

Темная материя составляет около 85% всей материи во Вселенной, однако ее природа остается одной из фундаментальных нерешенных проблем современной физики. Среди многочисленных кандидатов на роль темной материи особое место занимают аксионы и аксионоподобные частицы - гипотетические легкие псевдоскалярные частицы, предсказываемые расширениями Стандартной модели. Эти частицы изначально были предложены для решения проблемы сильной СР-инвариантности в квантовой хромодинамике. Важнейшим свойством аксионов является их чрезвычайно слабое взаимодействие с обычной материей, что делает их перспективными кандидатами в холодную темную материю, но одновременно значительно затрудняет их экспериментальное обнаружение. Существующие экспериментальные методы поиска аксионов сталкиваются с ограничениями квантового шума и недостаточной чувствительностью, особенно в определенных диапазонах масс.

Предложен новый эксперимент CASH (Cosmological Axion Sarov Haloscope) для поиска аксионной темной материи в массовом диапазоне 38-54 мкэВ, не покрытом другими проектами. Основное преимущество установки - использование однофотонных детекторов на основе джозефсоновских переходов, которые существенно преодолевают стандартный квантовый предел. Детекторы характеризуются ультранизким уровнем шума (не более одного ложного срабатывания в 100 секунд) при температурах 10-20 мК. В рамках проекта планируется двухэтапная реализация: CASH-I с фиксированной частотой и CASH-II с перестраиваемым резонатором. Ожидаемая чувствительность к константе связи аксион-фотон достигает $g_{a\gamma\gamma} \leq (10^{-14} - 10^{-15}) \text{ ГэВ}^{-1}$, что позволит проверить основные теоретические модели аксионов Печчеи-Квинна всего за один год измерений.

24 Задача "Резонансная генерация стерильных нейтрино в ранней Вселенной с ненулевой лептонной асимметрией"

Проблема тёмной материи остаётся центральной в современном понимании космологии и физики частиц. Среди возможных кандидатов стерильные нейтрино с массами от 1 кэВ до 100 кэВ. Их рождение в ранней Вселенной происходит за счёт осцилляций активных нейтрино в плазме, где ненулевая лептонная асимметрия спо-

собна усилить вероятность перехода по MSW-подобному резонансу [39]. Это делает асимметрию ключевым параметром, определяющим как итоговое количество тёмной материи, так и форму её спектра.

Однако простые сценарии с асимметрией в одном аромате упираются в ограничения BBN на величину асимметрии [40, 41]. Исследование направлено на более глубокое изучение этих ограничений. Ключевая идея: при определенной начальной структуре асимметрии последующие осцилляции активных нейтрино (при $T < 20$ МэВ) способны почти полностью её обнулить, снимая ограничения BBN, но при этом до уничтожения асимметрии стерильные нейтрино успевают родиться с нужной плотностью. Кроме того, исчезновение асимметрии в середине процесса приводит к более «холодному» спектру тёмной материи и, следовательно, к ослаблению ограничений со стороны наблюдений за малыми структурами ($Ly - \alpha$, карликовые галактики). Это открывает возможность изучать меньшие углы смешивания и более лёгкие стерильные нейтрино.

25 Задача "Построение квазиклассических методов описания непертурбативных процессов в Бозе звездах. Самоподобная гравитационная конденсация Бозе–Эйнштейна"

Мы изучаем перенаселенный газ гравитационно взаимодействующих бозонов, окружающих каплю конденсата Бозе–Эйнштейна — Бозе–звезду. Мы демонстрируем, что распределение частиц этого газа притягивается со временем к самоподобному решению кинетического уравнения, являющемуся динамическим аттрактором. Даже если масштабная симметрия кинетического уравнения нарушена внешними условиями, решение-аттрактор все равно достигается, и оно является приблизительно самоподобным. Но в этом случае конформная размерность масштабного решения медленно зависит от времени. Такой новый режим приблизительного (адиабатического) самоподобия может описывать рост Бозе–звезд из аксионоподобной (легкой бозонной) темной материи в некоторых космологических моделях.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню. Они могут быть использованы для предсказания распределения Бозе–звезд в современной Вселенной и для получения ограничений на аксионоподобную темную материю на основе этого распределения. Результаты работы опубликованы в работе [42].

Численное моделирование образования космологических структур показывает, что самые маленькие сгустки легкой бозонной (аксионоподобной) темной материи выглядят необычно. Помимо вириализованного темного газа они включают в себя Бозе–звезды — гравитационно–связанные капли темного конденсата Бозе–Эйнштейна. Если темные бозоны являются аксионами КХД, то такой вид имеют аксионные миникластеры астероидной массы, а если эти частицы сверхлегкие (расплывчатые),

то Бозе–звезды играют роль гигантских солитоноподобных ядер карликовых галактик. В обоих сценариях конденсация Бозе–Эйнштейна происходит за счет громадной фазовой плотности (перенаселенности) темной материи и ее частичной термализации под действием дальнодействующих гравитационных сил. Действительно, рождение Бозе–звезд в симуляциях занимает время, сравнимое с временем релаксации за счет гравитационного рассеяния. В данной задаче мы изучаем, как эти объекты растут кинетически за счет конденсации темных бозонов.

26 Задача "Новая физика в широких атмосферных ливнях"

Новая физика может проявиться в текущих и будущих экспериментах по физике элементарных частиц в виде новых (суб)ГэВных очень слабо взаимодействующих частиц. Существует множество сценариев за пределами Стандартной модели (СМ), которые предсказывают существование такого типа частиц, включая модели с тёмной материией, новыми калибровочными бозонами, тёмными фотонами, аксионоподобными частицами, тяжёлыми нейтральными лептонами, а также суперсимметричными моделями. В настоящее время наблюдается большой интерес к (суб)ГэВной физике, отчасти потому, что до сих пор не было получено значимых доказательств существования новых тяжёлых частиц в крупнейших экспериментах на LHC, таких как ATLAS и CMS. Слабость взаимодействий гипотетических новых лёгких частиц с частицами СМ часто подразумевает их достаточно большое время жизни. Большая экспериментальная программа, направленная на поиск сценариев с лёгкими долгоживущими частицами, в настоящее время реализуется и продолжает развиваться [43, 44].

Механизмы образования новых лёгких частиц зависят от моделей, и во многих сценариях основным из них являются взаимодействия с мезонами, которые в большом количестве рождаются при столкновениях протонов. В последнее время наблюдается большой интерес к изучению возможности использования космических лучей в качестве пучка частиц, а атмосфера — в качестве мишени. В этом случае долгоживущие частицы могут образовываться при распадах мезонов, распространяющихся в атмосфере, или в смещивании с ними, достигать детектора и давать в нём сигнал. Перспективы такого поиска для нескольких типов моделей были изучены в работах [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51]. В нашей работе мы изучили несколько новых сценариев в этом контексте: суперсимметричные модели с легким сектором, ответственным за спонтанное нарушение суперсимметрии и модели с легкими аксионоподобными частицами.

27 Задача "Нетопологические солитоны в эффективной теории поля"

В эффективной теории поля, можно описать локализацию электромагнитного поля на векторном нетопологическом солитоне. Для этого в $(3 + 1)$ измерениях рассматривается $U(1)$ теория с калибровочной кинетической связью $F^{\mu\nu}$ с комплексным нейтральным полем Прока. Модель обладает единым энергетическим масштабом, задаваемым массой векторного бозона. На примере сферически симметричных стационарных конфигураций были изучены колебательные моды поля Прока на фоне векторного солитона.

Релятивистские степени свободы в теории поля можно отынтегрировать и получить нерелятивистскую ЭТ. Среди симметрий в нерелятивистских теориях с нелинейностями выделяется случай когда остаются ненарушенными все симметрии из полной группы Шрёдингера. Тогда присутствие масштабной инвариантности и нерелятивистской конформной симметрии приводит к отсутствию в теории характерного масштаба длины. В $(1 + 1)$ и $(2 + 1)$ измерениях были изучены свойства нетопологических солитонов (Q -шаров и Q -трубок) в нелинейных теориях с полной группой Шрёдингера.

28 Задача "EMC-эффект в ядрах ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ из данных эксперимента MARATHON"

EMC-эффект известен как обозначение значительного подавления структурных функций (СФ) глубоконеупротого рассеяния (ГНР) ядер по сравнению с СФ нуклона в области валентных夸арков, т.е. в интервале $0.3 < x < 0.7$ для бъеркеновской переменной x . Этот эффект был открыт Европейской мюонной коллаборацией (EMC) в рассеянии на ядрах железа [52] и экспериментально изучен для различных ядерных мишеней в экспериментах в SLAC [53, 54], CERN [55] и JLab [56]. В качестве количественной характеристики эффекта используют отношение сечений рассеяния на ядре A и дейтроне D , $R_A = \sigma_A/\sigma_D$, нормированное на число нуклонов в ядре. В области валентных夸арков $0.3 < x < 0.6$, R_A является приблизительно линейной функцией x и не зависит от инвариантного переданного импульса Q . Наклон dR_A/dx в этой области зависит от ядерной мишени и увеличивается с ростом массового числа A . Ключевым моментом для выяснения природы наблюдаемого эффекта являются прецизионные измерения отношений R_A для легких трехнуклонных ядер трития (${}^3\text{H}$) и гелия-3 (${}^3\text{He}$) и дейтерия (${}^2\text{H}$). Недавно, эксперимент MARATHON в JLab опубликовал результаты измерения отношений ГНР сечений для трехчастичных ядер $R({}^3\text{He}/{}^3\text{H})$ и использовал эту величину для определения отношения СФ нейтрона и протона, F_2^n/F_2^p [57]. В данной работе докладываются результаты измерения EMC-эффекта на зеркальных трехнуклонных ядрах в эксперименте MARATHON и проводится сравнение экспериментальных данных с предсказаниями теоретических моделей.

29 Задача "Корреляция между ядерными поправками и высшими твистами в глобальном КХД-анализе"

Работа посвящена анализу модификаций партонных функциях распределения (ПФР) связанных нуклонов, известных как EMC-эффект. В феноменологии ПФР, использование ГНР-данных на ядерных мишениях с различным содержанием протонов и нейтронов в глобальном КХД-анализе позволяет получить представление о физических механизмах, ответственных за модификации связанных нуклонов в ядерной среде, точнее определить ПФР нейтрона, а также проверить зарядовую симметрию нуклонов. Большая часть ГНР данных получена при значениях квадрата переданного четырехимпульса Q^2 порядка нескольких ГэВ². По этой причине, последовательная КХД-феноменология ПФР требует учета степенных по $1/Q^2$ поправок (ВТ). При включении в глобальный КХД-фит ядерных данных возникают корреляции между ВТ и функциями определяющими ядерные поправки. В проведенной работе анализируется эта проблема. С этой целью мы рассматриваем две разные феноменологические модели параметризации поправок твиста-4 в КХД-анализе и изучаем их корреляции с d/u отношением ПФР кварков, отношением СФ F_2^n/F_2^p и функций описывающих аналитическое продолжение СФ связанных нуклонов вне массовой оболочки.

30 Задача "Изучение физических процессов и нелинейных структур в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности разного типа"

Одним из перспективных и активно развивающихся методов для изучения состояния газа в космологическую эпоху Темных веков (до реионизации Вселенной) служит наблюдение поглощения реликтового излучения в линии 21 см [58] в процессе переходов между уровнями сверхтонкого расщепления в атомах нейтрального водорода. УФ-излучение первых звезд за счет эффекта Баутхейзена–Филда влияет на спиновую температуру газа и, соответственно, на поглощение в линии 21 см. В рамках данной темы указанный метод применен для изучения начального спектра космологических возмущений плотности, из которых рождаются первые гало темной материи (ТМ), содержащие первые звезды. Космический телескоп им. Дж. Уэбба обнаружил, что в конце эпохи Темных веков больших галактик имеется значительно больше, чем ожидалось. В ряде работ (например, в [59]) этот факт объясняется наличием дополнительного локального максимума (бампа) в спектре возмущений. В наших расчетах показано, что тот же бамп ведет к более активному образованию звезд в маломассивных гало, чем в обычной модели. Эти звезды производят дополнительное УФ-излучение, которое смещает положение на шкале частот (или, аналогично, на шкале красных смещений) “ямы поглощения” в линии 21 см.

Еще одной задачей стало исследование влияния ранних нелинейных структур в виде петель космических струн на наблюдаемые характеристики скоплений галактик. Космический телескоп им. Хаббла подтвердил существование темного ядра (без галактик) с массой $\sim 4 \times 10^{13} M_{\odot}$ и размером ~ 400 кпк между сталкивающимися скоплениями галактик Abell 520 при красном смещении $z = 0,201$ [60]. Это необычное разделение ТМ и галактик противоречит наблюдениям знаменитого скопления Bullet. Критический анализ данных наблюдений представлен в [61]. Было предложено несколько гипотез для объяснения темного ядра, включая выброс галактик, столкновение ТМ и нить из ТМ вдоль линии видимости. Все эти гипотезы имеют те или иные проблемы. В данной работе мы предложили новое объяснение необычной структуры скоплений галактик, основанное на наличии гигантских космических струн или их замкнутых петель в направлении на Abell 520.

31 Задача "Исследование первичных черных дыр в ранней Вселенной и в современную эпоху"

Гипотеза о возможности образования в ранней Вселенной первичных черных дыр (ПЧД) была высказана Я.Б. Зельдовичем и И.Д. Новиковым в работе [62]. ПЧД могут играть важную роль в ряде астрофизических процессов и в космологии. В частности, они могут образовывать гравитационно-связанные двойные системы, и слияния ПЧД в парах могут объяснять некоторую часть гравитационно-волновых событий, регистрируемых детекторами LIGO/Virgo/KAGRA. Если ПЧД составляют только малую часть темной материи (ТМ), то оставшаяся ТМ должна образовывать вокруг пар ПЧД гало из ТМ. В работе [63] было установлено, что поток ТМ из эволюционирующего гало существенно ускоряет процесс слияния ПЧД с массами 30 масс Солнца. В данной работе мы рассматриваем сверхмассивные ПЧД и показываем, что аналогичный эффект имеет место и в данном случае – эволюция общего гало ТМ ускоряет слияние пары сверхмассивных ПЧД. Для расчета потока ТМ через орбиту пары рассматривался последовательный пролет несферических слоев ТМ, составляющих гало вокруг двойной системы ПЧД, после их отщепления от космологического расширения и первого сжатия. Поскольку в каждом слое гало ТМ существуют направления с нулевым угловым моментом [64], слои ТМ принимают уплощенную форму и пролетают через центр гало до тех пор, пока происходит отщепление новых слоев (пока гало не стабилизируется). Пролет слоев приводит к ускоренному сжатию орбиты пары ПЧД.

32 Задача "Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучками мюонных нейтрино"

Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые могут появиться в пучках мюон-

ных (анти)нейтрино, в результате $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. Это дает возможность определить вероятность таких переходов, а следовательно, и угол смешивания θ_{13} , фазу нарушения СР-инвариантности в лептонном секторе, иерархию масс нейтринных состояний и проверить 3-х флейворную модель нейтринных осцилляций. Наблюдение нарушения СР-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夸克ов 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>.

33 Задача "Прецизионное измерение параметров редких распадов B -мезонов в эксперименте LHCb, прецизионное измерение параметров СР-нарушения"

Разработан новый алгоритм для определения аромата нейтральных B -мезонов в момент их рождения в pp -столкновениях, использующий все треки процесса адронизации. Алгоритм калибруется отдельно для мезонов B^0 и B_s^0 с использованием распадов $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ и $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ на данных pp -столкновений, собранных экспериментом LHCb при энергии в системе центра масс 13 ТэВ. Этот новый алгоритм увеличивает эффективность детектирования на 35% для мезонов B^0 и на 20% для мезонов B_s^0 по сравнению с суммарной эффективностью существующих алгоритмов детектирования ароматов на LHCb.

34 Задача "Изучение характеристик КФЭУ для адронного калориметра высокой гранулярности. Обработка и анализ данных, полученных в эксперименте CMS в 2024-2025 годах"

Одной из основных целей эксперимента CMS на БАК является поиск и исследование новой физики. Многие из возможных сигнатур новой физики требуют измерения адронных струй с поперечным импульсом вплоть до нескольких тераэлектронвольт. Для этого во время фазы I модернизации детектора была проведена замена системы считывания сигналов с адронного калориметра (HCAL – hadron calorimeter) на кремниевые фотоэлектронные умножители (КФЭУ). КФЭУ обладают высокой квантовой эффективностью, компактностью и нечувствительностью к магнитным полям. Их использование позволило значительно улучшить соотношение сигнал/шум при регистрации мюонов, что позволит проводить непрерывную калибровку HCAL CMS и сохранить требуемое разрешение в условиях значительных повреждений его сцинтиляционных элементов. Приборы КФЭУ зарекомендовали себя с наилучшей стороны и используются теперь как для модернизации существующих, так и при разработке новых детекторов CMS.

35 Задача "Разработка фотодетекторов и сцинтиляционных детекторов для проектируемых калориметров эксперимента CEPC"

CEPC — Большой международный научный проект по созданию кругового электрон-позитронного коллайдера. Периметр тоннелей коллайдера составит ~ 100 км. Планируется, что CEPC будет работать в трех модах: фабрика Хиггс-бозонов (240 ГэВ в системе центра масс), фабрика Z-бозонов (91 ГэВ в системе центра масс), фабрика W-бозонов со светимостями 3×10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$, 32×10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$ и 10×10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$ соответственно. Главная же задача проекта — это создание фабрики Хиггс-бозонов. Поэтому предполагается, что в первой моде CEPC будет работать 7 лет, произведя 1 миллион Хиггс-бозонов. Во второй моде (Супер Z-фабрика) CEPC будет оперировать в течение 2 лет создав один триллион Z-бозонов. В третьей моде (W-фабрика) в течение 1 года будет произведено 100 миллионов W-бозонов. Огромное количество b-кварков, c-кварков и тау-лептонов от распадов Z-бозонов сделает CEPC эффективной В-фабрикой и С-чарм фабрикой.

Создание CEPC откроет огромные возможности для прецизионных измерений и поиска физики за пределами Стандартной Модели.

После завершения проекта CEPC предполагается переход к созданию супер протон-протонного коллайдера — SPPC (Super Proton-Proton Collider) с энергией ~ 125 ТэВ в системе центра масс. Электромагнитные и адронные калориметры нового поколения будут несомненно играть ключевые роли в экспериментах на проектируемом коллайдере CEPC.

36 Задача "Разработка алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных, с целью улучшения эффективности отбора событий эксперимента по поиску 2К-захвата ^{124}Xe "

В подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900 [65] с 2014 года проводится эксперимент по поиску процесса двойного электронного захвата (2К-захват) на ядре изотопа ^{124}Xe [66]. Регистрация событий осуществляется с помощью пропорционального счетчика высокого давления, изготовленного из меди марки М1, с рабочим объемом 8,77 л. Для обеспечения высокой радиационной чистоты активной зоны внутренняя поверхность счетчика покрыта слоем особо чистой меди марки М01 толщиной 1,5 мм. Геометрические параметры детектора составляют: внутренний диаметр 137 мм, внешний диаметр 150 мм, длина чувствительной области 595 мм. Детектор заполнен ксеноном, обогащенным по изотопу ^{124}Xe (21%), до давления +5,8 атм. Перед вводом в детектор газ проходит очистку от электроотрицательных примесей на титановом геттере, прогреваемом до температуры 800°C . Для подавления фона от внешнего излучения счетчик окружен многослойной защитой, состоящей из 18 см меди, 15 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Аналоговые сигналы с детектора оцифровываются осциллографом Лан-10-12PCI, при этом полные формы импульсов записываются на жесткий диск для последующего онлайн-анализа. Такая методика позволяет применять алгоритмы отбора полезных событий по форме импульса, что в совокупности с другими процедурами селекции обеспечивает подавление фона в энергетической области интереса ($63,6 \pm 3,7\text{ кэВ}$) более чем в 2000 раз.

1 Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц

1.1 Аксионоподобные частицы и эволюция звёзд в шаровых скоплениях

Ключевая идея работы состоит в том, чтобы максимально эффективно использовать однородные данные Gaia DR3 по семи выбранным шаровым скоплениям. Для выделения членов скоплений применяются каталоги, основанные на параллаксах и собственных движениях, что существенно снижает вклад «фоновых» звёзд, проецирующихся на область скопления на небесной сфере. Далее строятся диаграммы цвет–величина и по ним выбираются красные гиганты и звёзды горизонтальной ветви.

Для TRGB автор определяет абсолютную болометрическую величину самой яркой красной гигантской звезды с учётом расстояния, межзвёздного поглощения и болометрической поправки, зависящей от металличности. Поскольку истинная вершина ветви может быть чуть ярче наблюдаемой самой яркой звезды, применяется статистическая поправка, рассчитанная по результатам моделирования эволюции звёзд с различными начальными параметрами. В результате для каждого скопления получается оценка величины M_{TRGB} и её ошибка.

Параметр R определяется как отношение числа звёзд на горизонтальной ветви к числу красных гигантов в определённом интервале светимостей. Для этого необходимо корректно отделить красные гиганты от звёзд на асимптотической гигантской ветви и очертить горизонтальную ветвь на диаграмме. Зависимость $R(g_{a\gamma})$ берётся из опубликованных расчётов эволюции звёзд с дополнительными потерями энергии, содержащих параметр связи ALP–фотон. Аналогично, влияние g_{ae} на M_{TRGB} задаётся табличными результатами моделирования, которые интерполируются по металличности.

В работе подробно учитываются различные источники неопределённостей: статистические (конечное число звёзд), ошибки расстояний, металличностей и цветовых поправок, а также теоретические неопределённости звёздных моделей. Всё это включено в функцию правдоподобия для совокупности скоплений, которая записывается в байесовской форме с плоскими приорами на константы связи. Для каждой из констант — g_{ae} и $g_{a\gamma}$ — строится одномерный профиль правдоподобия, из которого извлекаются максимум и доверительные интервалы.

Отдельно обсуждается влияние начальной массовой доли гелия Y , плохо измеряемой для большинства шаровых скоплений. Анализ проводится для консервативного примордиального значения Y и затем проверяется устойчивость результатов при

вариации этого параметра. Показано, что предел на g_{ae} устойчив к разумным изменениям Y , а предпочтаемое значение $g_{a\gamma}$ несколько смещается, но остаётся вблизи $10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$.

Наконец, полученные ограничения сравниваются с четырьмя основными классами существующих ограничений: (i) лабораторные эксперименты, (ii) детектирование астрофизических ALP в лаборатории, (iii) другие астрофизические оценки энергопотерь (включая белые карлики и AGB-звезды) и (iv) ограничения, основанные на конверсии фотон–ALP в космических магнитных полях. Обсуждается как согласие, так и существующие расхождения между разными методами.

1.2 Гипотетическое нарушение лоренц-инвариантности и “мюонная загадка” широких атмосферных ливней

Рассматриваются фотоны с сублюминальным дисперсионное соотношением вида $E^2 = p^2 - \frac{p^4}{M_{\text{LIV}}^2}$. Рассматривается влияние такого ЛИ-нарушения на ключевые процессы, определяющие развитие ШАЛ. Наибольшее внимание уделено процессу Бете–Гайтлера, ответственному за рождение электрон–позитронных пар при взаимодействии фотонов с атомными ядрами воздуха. В сублюминальном сценарии эффективный порог и сечение этого процесса меняются таким образом, что при очень высоких энергиях вероятность рождения пары резко падает. Это приводит к увеличению средней длины свободного пробега фотонов и к уменьшению числа электронов и фотонов в каскаде.

Модифицированные выражения для сечения реализованы в коде CORSIKA: вводится зависящий от энергии фактор подавления для Бете–Гайтлера и пересчитывается длина пробега и ветвление по каналам взаимодействия. Затем проводится серия монте-карло-симуляций вертикальных ливней на уровне моря для протонных и железных первичных частиц в широком диапазоне энергий. Для каждого значения M_{LIV} рассчитываются ожидаемые числа мюонов и электронов на уровне детектора, а также связанный с ними параметр, характеризующий относительное усиление мюонной компоненты.

Следующий шаг — статистическое сравнение с данными обсерватории имени Оже. Авторы используют объединённый анализ разных конфигураций установки (FD+SD и UMD+SD), где мюонная компонента измеряется наиболее надёжно, и формируют функцию правдоподобия в терминах одного свободного параметра M_{LIV} . Вводится величина $\chi^2(M_{\text{LIV}})$ или эквивалентный статистический критерий, позволяющий выделить наиболее предпочтительное значение и 95%-ю область допустимых значений. Показано, что слишком малые масштабы приводят к чрезмерному подавлению электромагнитной компоненты и конфликтуют с наблюдаемыми данными,

тогда как слишком большие масштабы практически неотличимы от ЛИ-предела и не решают мюонную загадку.

В заключении обсуждаются возможные независимые тесты предложенного механизма: измерение спектра мюонов на уровне земли, сравнение с ливнями, индуцированными первичными фотонами сверхвысоких энергий, и ограничения из космогенных фотонов.

1.3 Новая физика и гамма-всплеск GRB 221009A

Используемые наборы данных включают опубликованные результаты экспериментов. Для LHAASO берутся спектральные точки, измеренные с помощью инструментов WCDA и KM2A, а для Carpet-3 — обновлённая оценка потока в едином энергетическом бине, соответствующем зарегистрированному событию с энергией порядка 300 ТэВ. Поскольку события наблюдались в разные временные интервалы после всплеска и при разных конфигурациях поля зрения установок, строится оценка интегрального потока, учитывая эффективные площади и экспозиции каждой установки.

Для моделирования стандартного поглощения гамма-квантов используется конкретная модель фонового оптического и инфракрасного излучения (EBL), согласованная с анализами LHAASO и Carpet-3, и добавляется вклад реликтового излучения. На этой основе задаётся оптическая толщина $\tau(E)$ и вычисляется ожидаемый флюенс на Земле для заданного степенного спектра на источнике. Фит данных, измеренных WCDA в области энергий $\lesssim 10$ ТэВ показывает, что простая степенная форма с выбранным индексом хорошо описывает данные без привлечения новой физики, и именно этот спектр рассматривается как «внутренний» во всех последующих сценариях.

Сценарий ЛИ-нарушения реализован через модификацию порога процесса рождения e^+e^- и соответствующей оптической толщины; фактически вводится дополнительный параметр M_{LIV} , управляющий тем, насколько сильно сдвигается порог поглощения. Для каждого значения M_{LIV} пересчитывается спектр и строится функция правдоподобия. Показано, что ЛИ-нарушение в таком виде может несколько ослабить поглощение на самых высоких энергиях и тем самым облегчить объяснение события Carpet-3, но не создаёт структуры в области \sim нескольких ТэВ, наблюданной KM2A.

Сценарий с ALP существенно сложнее: учитываются смешивание фотон-ALP в магнитном поле галактики-хозяина и Млечного Пути, а также неопределенность положения источника внутри спирального рукава и ориентации магнитных полей. Для заданной пары $(m_a, g_{a\gamma})$ и случайно выбранных астрофизических параметров рассчи-

тывается матрица переноса, дающая вероятность конверсии фотон–ALP и обратной конверсии на пути от источника к наблюдателю. Авторы усредняют результаты по множеству реализаций этих случайных параметров, получая эффективный спектр для интегрального потока.

Статистический анализ проводится путём максимизации комбинированного правдоподобия, включающего вклад гауссовых ошибок WCDA и пуассоновских вероятностей для KM2A и Carpet-3 с учётом ожидаемого фонового вклада. В ALP-случае в параметрическом пространстве $(m_a, g_{a\gamma})$ строится карта значений статистики, из которой выделяются область наилучшего согласия и 68%-й доверительный контур. Для сценария ЛИ-нарушения строится зависимость статистики от M_{LIV} . ALP-сценарий даёт существенное снижение χ^2 по сравнению со стандартной моделью, тогда как выигрыш сценария ЛИ-нарушения скромен.

Полученные параметры сравниваются с другими ограничениями: эксперимент CAST по солнечным аксионам, оценки из эволюции звёзд (включая рассмотренную в первой статье данного отчёта) и поляриметрические ограничения из белых карликов. Показано, что лучшая область по GRB 221009A попадает в «окно», где пересекаются указания разных астрофизических методов, но частично заходит в область, оспариваемую поляриметрией.

2 Обработка и анализ данных детектора LVD (Гран Сакко, LNGS) по исследованию мюонов под землей и естественной радиоактивности, как фона в экспериментах по поиску редких событий

2.1 Описание детектора LVD и регистрация мюонов под землей

Детектор Большого Объема – Large Volume Detector (LVD), расположенный в подземной низкофоновой лаборатории LNGS, предназначен для поиска нейтрино от коллапсов звездных ядер [67]. Основной реакцией взаимодействия нейтрино в веществе детектора является реакция обратного бета-распада, в которой электронное антинейтрино взаимодействует с протоном, образуя позитрон и нейтрон

$$\nu_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (2.1)$$

Другие каналы взаимодействия нейтрино с веществом детектора также вносят свой вклад [?] Установка представляет собой железно-сцинтилляционный детектор, состоящий из 840 полуторакубовых ($1 \times 1.5 \times 1 \text{ м}^3$) модулей-счетчиков. LVD состоит из трех башен, каждая из которых содержит пять вертикальных колонн. Колонна, из семи уровней, включает в себя портатанки, в которых размещено по восемь сцинтилляционных счётчиков. Полностью установка LVD содержит 840 счетчиков. Первая башня LVD начала работать в 1992 году, 3 башни - в 2002 года.

Конструкция детектора, ее задачи и методика регистрации детально описана в работах [1]. Порог регистрации для импульсов-триггеров, кандидатов в нейтринные события, составляет 5 МэВ (после модернизации в 2004 г - 4 МэВ). Мюоны космических лучей, регистрируемые в LVD, имеют среднюю энергию 280 ГэВ. Это мюоны, имеющие минимальную пороговую энергию на поверхности около 2 ТэВ. Вертикальная интенсивность мюонов, измеренная в LVD за 24 года наблюдений, составляет $(3.31 \pm 0.03) \times 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Трековая система LVD состоит из вертикальных и горизонтальных плоскостей газоразрядных трубок, работающих в ограниченном стримерном режиме. Точность определения координат трека заряженной частицы составляет $\pm 3 \text{ см}$. Она определяется шириной стрипов плоскостей трековой системы (2 см) и их пространственным расположением относительно друг друга.

Событием LVD является последовательность импульсов от сцинтилляционных счетчиков в течение 1 мс. В событие входит также информация, поступающая от трековой системы. Она присоединяется к информации от сцинтилляционных счетчиков, а именно энерговыделению и времени срабатывания счетчика. Событие считается мюонным, если хотябы в двух счетчиках-модулях регистрируется энерговыделение не менее 110 МэВ в течении 250 нс.

В период с июня 1999 по сентябрь 2002 года трековая система работала на двух башнях LVD. За этот период было реконструировано 2424826 одиночных мюонов и 151090 мюонных групп. Программа и методика реконструкции мюонов по трековой системе подробно описана в [68].

Множества точек пересечения плоскостей стрипов детектора LVD объединяются в мюонные траектории с учетом условия параллельности траекторий в пучке. В основе алгоритма лежит метод поиска максимального числа областей, окружающих точки пересечения стрипов при повороте системы координат детектора, в плоскости перпендикулярной углу падения мюонов. Угол падения мюонов определяется методом минимизации области вокруг точек пересечения стрипов детектора при прохождении мюонов и определяется с точностью 0.5 градуса. Кроме этого, для коррекции числа мюонных траекторий используется соответствие распределений экспериментальных и расчетных энерговыделений в счетчиках установки, расположенных на реконструированной траектории мюона.

2.2 Характеристики реконструированных мюонов в детекторе LVD

Реконструкция треков мюонов позволяет получить такие характеристики мюонов как кратность мюонов в группе, направление прихода одиночного или группы мюонов (θ, φ), толщину грунта через которую прошел мюон, энерговыделение и количество сработавших счетчиков в событии. Распределение, реконструированных мюонных событий по кратности представлено на рисунке 2.1. Максимальная множественность реконструированной группы равна 33 мюонам. Ошибки на графике – статистические. В двойном логарифмическом масштабе гистограмму можно аппроксимировать функцией $f(x) = A \times x^{-k}$, где $k = 4.32 \pm 0.02$, которая впервые была предложена в работе [68].

Для каждого мюонного события, одиночного мюона или группы мюонов определялся азимутальный (φ) угол и зенитный (θ) угол. Зенитный угол отсчитывался от вертикали. Азимутальный, в системе координат, привязанной к ориентации установки в зале, отсчитывался от фронтальной плоскости первой башни к боковой плоскости против часовой стрелки.

Горный массив над детектором имеет сложную структуру. В соответствии с картами глубин каждому углу можно сопоставить глубину грунта с точностью до нескольких десятков метров. Распределение реконструированных мюонов по глубинам представлено на рисунке 2.2. Форма распределения на рисунке 2.2 для множественных и одиночных мюонов отличаются, начиная с глубин больше 7 км в.э. Эти глубины соответствуют выделенным направлениям в районе 70 и 180 градусов по φ . Принимая во внимание формы распределений числа событий по глубинам (рису-

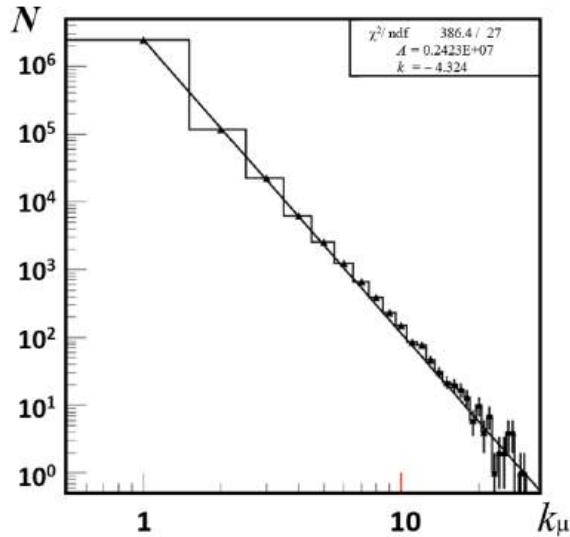


Рисунок 2.1 — Распределение числа событий по кратности реконструированных мюонов. Кривая — аппроксимация законом $f(x) = A \times x^{-k}$, $k = 4.32$

нок 2.2), можно сделать вывод, что число множественных мюонов по отношению к одиночным мюонам увеличивается с глубиной.

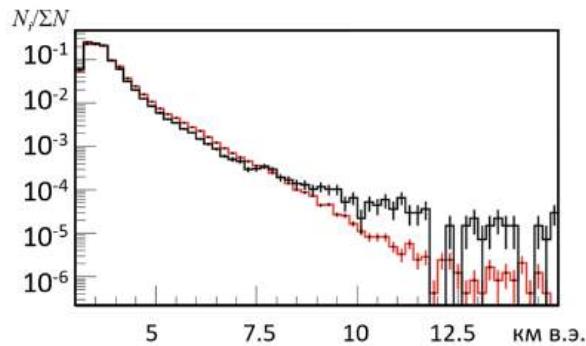


Рисунок 2.2 — Распределение реконструированных событий по толщинам грунта, пройденным одиночными мюонами (красная гистограмма) и группами мюонов (черная гистограмма). Гистограмма нормирована на суммарное число событий

Распределение удельных энергетических потерь (dE/dx) для одиночных и групп мюонов в сцинтилляторе, представлено на рисунке 2.3. Различие в средней величине dE/dx отражает разницу средней энергии мюонов, пришедших на установку. Для одиночных мюонов средние энергопотери составляют около $2,1 \text{ МэВ/г} \cdot \text{см}^{-2}$, для множественных мюонов — около $2,5 \text{ МэВ/г} \cdot \text{см}^{-2}$. В работе [69], с помощью спектрометров было получено, что средняя энергия одиночных мюонов около 280 ГэВ , и около 340 ГэВ для пар мюонов.

Зависимость экспериментальных характеристик реконструированных мюонов от толщины пройденного мюонами грунта представлено в таблицах 2.1 и 2.2 Для

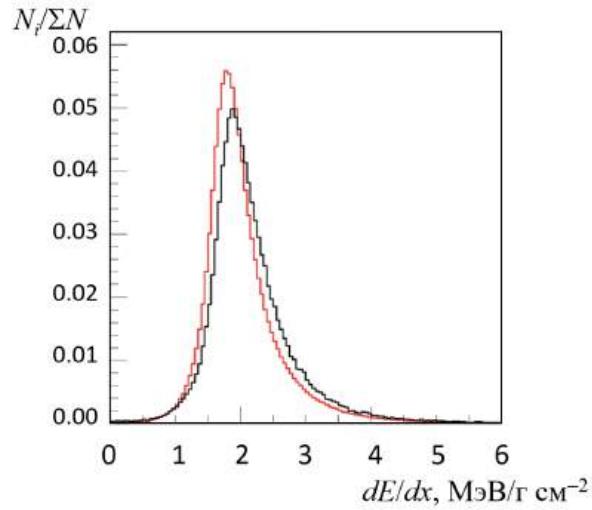


Рисунок 2.3 — Распределение удельных потерь в сцинтилляторе для одиночных мюонов (красная гистограмма) и групп мюонов (чёрная гистограмма). Гистограмма нормирована на суммарное число событий

каждого диапазона глубин приведены: число реконструированных событий, средняя величина удельных энергопотерь в событии на счетчик ($\Sigma E/N$), средняя величина удельных энергопотерь на единицу длины в г/см^2 ($(dE/dx)^{track}$ и $(dE/dx)^{tot}$), среднее значение зенитного угла $\langle\theta\rangle$ и расчетная средняя энергия мюонов E_μ . Энергии мюонов в зависимости от глубины грунта Гран Сассо, взяты из расчета В. А. Кудрявцева [70].

Таблица 2.1 — Данные реконструированных одиночных мюонов в зависимости от толщины грунта

H , км в.э.	Число событий	$\Sigma E/N$	$(dE/dx)^{track}$	$(dE/dx)^{tot}$	θ	E_μ , ГэВ
3-4	1956562	153	2.02	2.10	31	260
4-5	381912	149	2.03	2.11	52	280
5-6	56801	152	2.04	2.11	61	310
6-7	16210	151	2.04	2.12	66	325
>7	6771	152	2.03	2.14	71	>330

Таблица 2.2 — Данные реконструированных множественных мюонов в зависимости от толщины грунта

H , км в.э.	Число событий	$\Sigma E/N$	$(dE/dx)^{track}$	$(dE/dx)^{tot}$	θ	$\langle k_\mu \rangle$
3-4	114041	158	2.15	2.51	31	2.42
4-5	181014	155	2.18	2.58	49	2.37
5-6	2464	156	2.18	2.73	58	2.34
6-7	602	157	2.25	3.14	64	2.32
>7	468	157	2.21	4.04	74	2.36

$(dE/dx)^{track}$ - величина удельных потерь по треку мюонов рассчитанная для реконструированных мюонов только для счетчиков в которых прошел мюон.

$(dE/dx)^{tot}$ - величина удельных потерь, включая счетчики в которых было энерговыделение от частиц мюонного сопровождения (в соседних счетчиках вне траектории).

Средняя величина суммарных энергопотерь, приведенная на число сработавших счетчиков ($\Sigma E/N$) для одиночных мюонов составляет 152 ± 1 МэВ/счетчик, для множественных мюонов - 157 ± 2 МэВ/счетчик. На рисунке 2.4 представлено распределение $\Sigma E/N$ для одиночных и множественных мюонов. Получено, что $(\Sigma E/N)$ не зависит от толщины пройденного грунта (см. колонку 3 таблиц 2.1 и 2.2). Ошибки в величинах энергопотерь для одного мюона, включающие ошибки в энергетических калибровках, неоднородности светосбора, расчета длины трека в счетчике-модуле, составляют меньше 2%.

Для групп с разной множественностью величина $\Sigma E/N$ изменяется от 157 МэВ/счетчик для пар мюонов до 188 МэВ/счетчик для групп с множественностью $k_\mu > 10$.

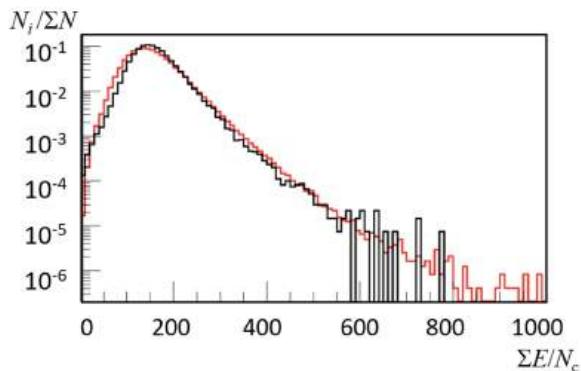


Рисунок 2.4—Распределение суммарных энергопотерь в сцинтилляторе, деленных на суммарное число счетчиков в событии для одиночных мюонов (красная гистограмма) и групп мюонов (чёрная гистограмма). Гистограмма нормирована на суммарное число событий

Детектор LVD является хорошим инструментом для исследований мюонов космических лучей, приходящих на глубину от 3 до 15 км в.э. По архивным данным зарегистрированных мюонов на детекторе LVD с 1999 по 2002 год исследовались характеристики множественных мюонных событий такие как величина суммарных энергетических потерь и их удельная величина на 1 счетчик в зависимости от угла и глубины грунта пройденного мюоном до регистрации в детекторе. Получено, что при увеличении множественности мюонов в группе растет средняя величина суммарных энергетических потерь мюонов в детекторе, приведенная на один счетчик. Распреде-

ление множественных мюонов по глубинам получено впервые. Число множественных мюонов по отношению к одиночным мюонам увеличивается с глубиной.

2.3 Фон от естественной радиоактивности. Анализ скорости счета гамма-квантов в подземных залах LVD и LSD

Во всех подземных лабораториях, в которых проводятся исследования по физике нейтрино, поиска темной материи и редких распадов, изучаются вариации радиоактивного фона, например в Баксанской Нейтринной Обсерватории ИЯИ РАН, или в лаборатории Янъян (Yangyang Underground Laboratory). Итальянская Лаборатория Гран Сассо (LNGS), специально была построена в низкофоновом грунте для экспериментов по физике частиц и нейтринной астрофизике. Однако же итальянский регион известен землетрясениями, поэтому мониторирование выхода радиоактивного радона актуально и с точки зрения геофизических наук. Ядерно-физические установки, сконструированные для непрерывного мониторирования различных потоков частиц, в том числе и гамма-квантов от радона и его дочерних продуктов распада, являются новыми приборами для исследований землетрясений.

Для регистрации нейтрино от сверхновых звезд в нашей галактике построены в подземных лабораториях большие сцинтилляционные детекторы - LSD и LVD. Установки LSD и LVD расположены в разных регионах Италии, в примерно 700 км друг от друга. Liquid Scintillation Detector (LSD) работал с 1984 по 1999 г.г. [71], находился в техническом помещении (гараже) автотранспортного туннеля под Монбланом, соединяющего Италию и Францию, в 3,8 км от въезда с итальянской стороны. Large Volume Detector (LVD) работает в подземной лаборатории Гран Сассо Института ядерной физики Италии (LNGS INFN) с 1992 г. по настоящее время [72]. Глубины расположения установок LSD и LVD 5200 и 3620 м в.э., соответственно.

Оба детектора имеют модульную структуру и состоят из одинаковых счетчиков размером $1 \times 1 \times 1,5 \text{ м}^3$ из нержавеющей стали, заполненных жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита (C_nH_{2n} , $n=9,6$). В настоящее время LVD состоит из 840 счетчиков и содержит 1008 тонн сцинтиллятора и 1020 тонн железа. В 1997 году количество счетчиков в LVD было в три раза меньше (280 штук). LSD в 1997 году состояла из 72 счетчиков, которые после окончания работы установки были перевезены и встроены в структуру LVD.

Детекторы имеют одинаковую систему регистрации. Основной реакцией взаимодействия в детекторах является реакция обратного бета-распада, взаимодействие антинейтрино с протонами сцинтиллятора. Порог регистрации позитрона 5 МэВ. Следующий за сигналом от p , через время захвата около 180 мкс, регистрируется сигнал от захвата нейтрона протоном ($E_\gamma = 2,2 \text{ МэВ.}$) или железом, входящим в структуру

установки ($E_{\gamma} \sim 7$ МэВ). Нижний порог регистрации гамма-квантов в LSD и LVD равен 0,5 МэВ. Фоном детекторов в энергетическом диапазоне (0,5 - 5) МэВ являются гамма-кванты от радиоактивности грунта и материалов детекторов. Установки регистрируют гамма-кванты от дочерних ядер ^{222}Rn , период полураспада которого 3,8 дня. Гамма-излучение создаётся, в основном, ядрами ^{214}Bi , за счёт бета-распада превращающимися в ^{218}Po с характерным временем 19,7 мин. Гамма-кванты имеют энергию от 0,6 до 2,5 МэВ. Переменная часть фона установок по нижнему порогу обусловлена изменением концентрации радона в подземных помещениях, где расположены детекторы.

Являясь одинаковыми по методу регистрации, установки LSD и LVD отличаются фоновыми условиями и количеством счетчиков, из которых они состоят. Данные, используемые для исследования фона низкоэнергетических импульсов, формируются следующим образом: каждые 10 минут все сцинтиляционные счётчики запускаются импульсом от генератора на регистрацию в течение 10 секунд. Темп счета установки усредняется по часу и нормируется на один счетчик в герцах. Подробно о методе регистрации, отборе счетчиков описано в работе [73]. Данные LVD и LSD приведены к единому формату, что дает возможность анализировать временные ряды скоростей счета гамма-квантов одинаковыми установками, находящимися в разных лабораториях.

Временные ряды LSD и LVD имеют одинаковый характер при среднем темпе счета LVD - 45 Гц/сч, LSD - 180 Гц/сч. На рисунке 2.5 представлены данные экспериментов за 1997 год. Выбросы (пики) во временных рядах связаны с увеличением скорости счета гамма-квантов от радона и его дочерних продуктов распада.

Применив метод наложения эпох, который хорошо себя показал в анализе временных рядов гамма-квантов, регистрируемых в LVD [74] были получены вариации скоростей счета гамма-квантов в детекторе LSD. В методе наложения эпох усреднялись скорости счета гамма-квантов, соответствующие одинаковым дням недели. Для обеих установок получены суточные и недельные вариации скорости счета гамма-квантов (рисунок 2.6). Суточный ход концентрации радона в помещениях LVD и LSD резко отличается. В помещении LSD ночью концентрация радона растет, а днем спадает. Это поведение практически одинаковое в рабочие и в выходные дни. За исключением воскресенья, когда наблюдается утреннее накопление радона.

В помещении LVD картина другая: в рабочие дни минимум концентрации радона достигается ночью, а с началом рабочего времени она начинает расти. В выходные дни отсутствуют выраженные максимумы и не наблюдается дневного увеличения скорости счета. В зале эксперимента LVD работает отдельная принудительная вентиляция в непрерывном режиме, подающая чистый воздух с поверхности. Благодаря

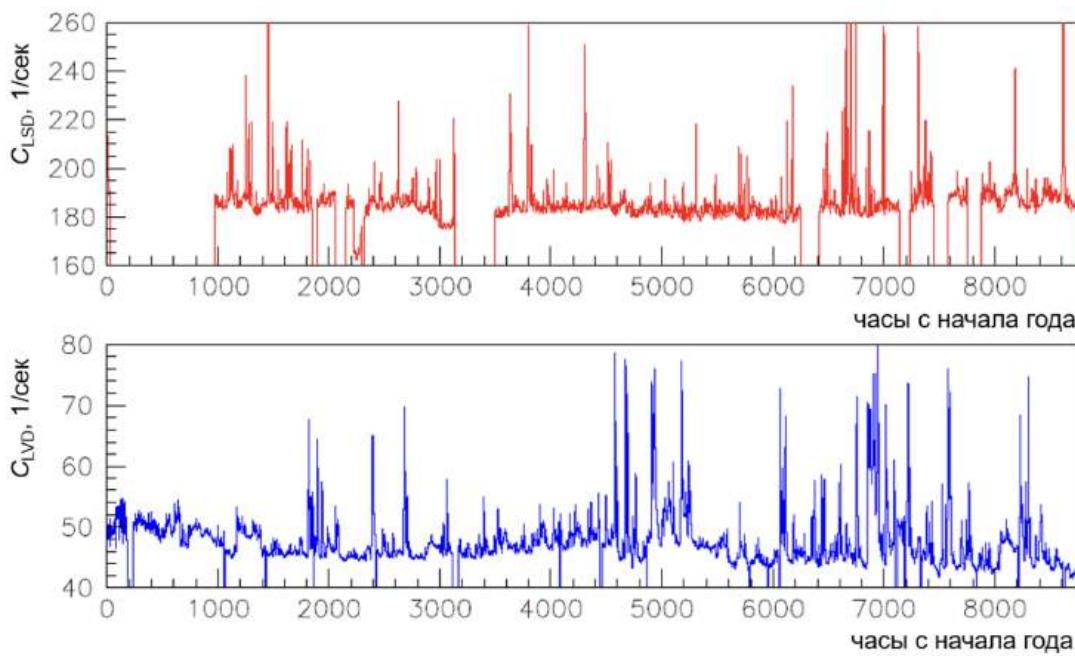


Рисунок 2.5 — Временные ряды скоростей счета гамма-квантов в часах с начала 1997 года, измеренных в эксперименте LSD (верхняя панель) и в эксперименте LVD (нижняя панель)

хорошей изоляции помещения и действию приточной вентиляции, при закрытых воротах концентрация радона в зале достаточно низкая и составляет $\sim 26 \text{ Bq/m}^3$. В прилегающих коридорах она больше в несколько раз. Днем в рабочее время открываются ворота, что приводит к увеличению концентрации радона в зале LVD, т.к. начинает поступать воздух из соседних помещений с повышенной концентрацией радона.

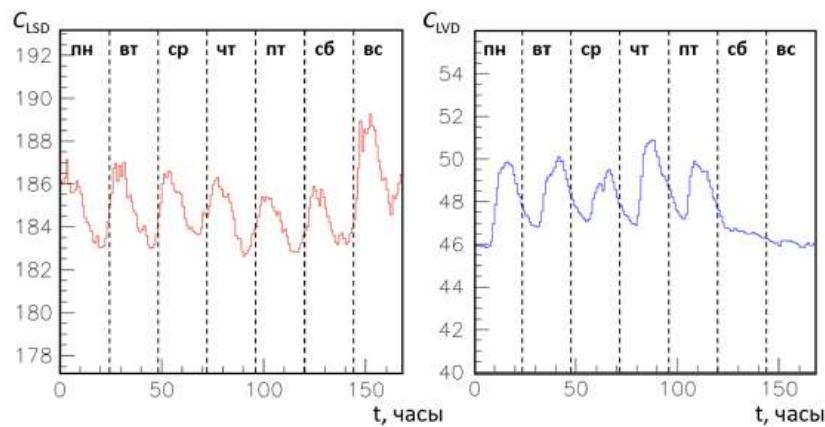


Рисунок 2.6 — Недельные вариации скоростей счета гамма-квантов, измеренных в детекторе LSD (слева) и LVD (справа)

Разницу в поведении накопления радона можно объяснить особенностями вентиляции лабораторий. Система воздухоснабжения подземных установок в Гран Сассо

является изолированной от транспортного туннеля и работает в непрерывном режиме, в то время как вентиляция помещения LSD обеспечивается туннельной вентиляцией, которая, в течение суток, зависит от интенсивности движения по туннелю. При детальном рассмотрении, отличаются и формы пиков LSD и LVD: показатель экспоненты вентиляционного спада радонового LSD - пика составляет 2 часа, что примерно на час меньше, чем было определено для LVD [75].

3 Анализ данных и моделирование различных фонов первого этапа проекта NEWSdm (Гран Сассо, LNGS) по поиску темной материи

3.1 Эксперимент NEWSdm

Модуль эксперимента NEWSdm состоит из 10-килограммового стека Nano Imaging Trackers (NIT), недавно разработанных ядерных эмульсий с размерами кристаллов AgBr до нескольких десятков нанометров. Для фиксирования направления траекторий частиц темной материи 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, WIMP-частицы будут приходить на детектор.

Относительно длинные треки отдачи, вызванные усиленной темной материи, 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 материи 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 кэВ/с² до 1 ГэВ/с² и значения сечения до 10⁻³⁰ см² с помощью направленного чувствительного поиска. В настоящее время прототип детектора установлен в зале Лаборатории Гран Сассо (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 — Фотография модуля детектора NEWSdm в экспериментальном зале Гран Сассо

3.2 Источники фона для поиска темной материи

Фоновыми источниками для поиска темной материи являются альфа- и бета-частицы, гамма-лучи и отдачи, вызванные нейтронами, в то время как ядерная эмульсия по существу нечувствительны к минимально ионизирующему частицам (МИР).

Основными источниками альфа-частиц являются радиоактивные цепи U и Th и радон. Альфа-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 отбрасывать в эмульсиях путем верхнего среза по длине трека. β -лучи, образующиеся при распаде ^{14}C , составляют немалый вклад в общий фоновый бюджет. Этот вид фона в любом случае менее критичен для эмульсии по сравнению с другими источниками: электроны можно отбрасывать, правильно регулируя отклик эмульсии с точки зрения количества сенсибилизированных кристаллов на единицу длины пути, посредством химической обработки самой эмульсии. Более того, возможного улучшения мощности отклонения можно достичь, используя реакцию β -лучей на поляризованное рассеяние света или выполняя криогенное воздействие и используя эффект фонона. 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.

На подземные эксперименты влияют три типа источников нейтронов: радиогенные нейтроны в диапазоне МэВ, образующиеся в (α, 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 (α, n) и реакцию спонтанного деления ^{238}U . Для оценки этого вклада активность U и Th в компонентах эмульсии была измерена с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и гамма-спектрометрии. Обнаруживаемый нейтронно-индукционный фон оценивается примерно в 0,06 в год на килограмм [76], что позволяет спроектировать детектор для экспозиции 10 кг·год без какой-либо дополнительной очистки.

3.3 Гамма фон от распада радиоактивных ядер в грунте Гран Сассо

Основным источником гамма-фона в области 0 - 5 МэВ являются радиоактивные элементы, содержащиеся в качестве примесей в железных конструкциях детектора и скального грунта. К таким элементам относятся ^{214}Bi с максимальной энергией распада 3,14 МэВ в ряду ^{238}U , ^{208}Tl с максимальной энергией распада 5,0 МэВ в ряду ^{232}Th и ^{40}K с энергией распада 1,505 МэВ.

Проведены расчёты, в которых использовались подробные схемы распада изотопов ^{208}Tl , ^{214}Bi и ^{40}K с учётом всех уровней возбуждения ядер из работы [77]. Бета распад ядра можно представить как случайный процесс. Тогда моделирование случайных процессов сводится к моделированию последовательностей случайных событий. В случае бета распада эту последовательность можно представить в виде цепи Маркова с конечным числом состояний. Существуют известные процедуры, (например, метод обратной функции) моделирования произвольного распределения случайной величины при помощи генератора случайных чисел, равномерно распределённых на отрезке (0 - 1). Трек гамма-кванта, можно представить в виде случайной последовательности событий: излучение, рассеяние, поглощение и регистрация. Полагая, что γ -кванты рождаются в одной и той же точке вещества с энергией и имеют равную вероятность двигаться в любом направлении. Сечения рассеяния и поглощения гамма кванта заданы в виде таблиц из работы [78]. Сечение образования пар мало и его можно не учитывать. Плотность вероятности распределения энергии гамма-кванта определяется формулой Клейна – Нишины – Тамма.

Концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в железных конструкциях окружающих детектор была взята из работы [79] (см. таблицу 3.1). Методом минимизации сравнения экспериментальных и расчетных спектров была определена истинная концентрация радиоактивных изотопов в материалах конструкции и защиты детектора.

Таблица 3.1 – Данные по концентрации изотопов в г/г изначальная по ранним измерениям и после коррекции методом минимизации

Материал	Tl-208	Bi-214	K-40
Сцинтиллятор (изначальная)	10^{-10}	10^{-10}	2×10^{-13}
Железо (изначальная)	2.9×10^{-8}	2.5×10^{-9}	1.2×10^{-9}
Сцинтиллятор (после коррекции)	1.77×10^{-11}	2.16×10^{-11}	1.45×10^{-13}
Железо (после коррекции)	1.1×10^{-9}	8.0×10^{-9}	0.75×10^{-9}

Концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в породе и бетоне Лаборатории Гран Сассо были измерены Миланской группой в 1985 г. [80]. Авторы пришли к выводу, что нормальная порода имеет очень низкую активность, но есть инфильтраты черной марнатической породы, которая содержит гораздо большую радиоактивность. Эти инфильтраты теперь скрыты под слоем бетона толщиной 5-30 см, покрывающим сте-

ны лаборатории. Чтобы найти возможную анизотропию или локальные аномалии в залах эксперимента, в 2004 г. впервые было измерено угловое распределение потока гамма-излучения с помощью детектора HPGe с коллиматором. В ходе реконструкции залов Лаборатории Гран Сассо в 2005-2006 годах пол зала был покрыт новым бетоном толщиной 30 см и слоем водостойкой смолы. Измерения показали, что активность нового бетона на порядок выше, чем у обычной породы LNGS. Поэтому в 2007 г. вновь были проведены новые измерения потока γ -квантов на площадке экспериментального зала А. Для этой работы и были взяты данные по потоку гамма-квантов от скального грунта из работы [81] таблица 3.2.

Сравнивая расчётные спектры с экспериментальными, мы можем скорректировать концентрации, получив более точный расчёт суммарных спектров (таблица 3.3).

Таблица 3.2 – Исходные данные для потока гамма-квантов от скального грунта в единицах $[1/(м^2/сек/стэр)]$

Поверхность зала	Tl-208	Bi-214	K-40
Потолок	54	12	112
правая стена	25	15	75
левая стена	25	15	75
Фронт (торец)	25	15	75
Фронт (открытая передняя часть)	4	1	10
Пол	29	8	97

Таблица 3.3 – Поток гамма-квантов в единицах $[1/(м^2/сек/стэр)]$ от источников скального грунта, полученный в результате минимизации среднеквадратичного отклонения от экспериментального спектра

Поверхность зала	Tl-208	Bi-214	K-40
Потолок	2	30	7
правая стена	10	81	23
левая стена	12	97	25
Фронт (торец)	15	168	38
Фронт (открытая передняя часть)	6	78	14
Пол	12	188	24

В результате моделирования получены распределения плотности вероятности для сигналов детектора от примесей изотопов Tl-208, Bi-214, и K-40 в железных конструкциях и в скальном грунте. Форма этих распределений не зависит от концентрации примесей. Эти распределения используется для определения суммарных спектров, которые зависят от соотношения этих концентраций. Суммарные спектры существенно зависят от концентрации изотопов, которые взяты из разных экспериментальных установок (LVD, Borexino, Gerda и др.). Получены результаты подроб-

ного расчёта в виде таблиц и рисунков спектров фона и вклад в эти спектры радона от скального грунта.

4 Поиск нарушения СР-инвариантности и измерение сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280 в ускорительном эксперименте с длинной базой T2K.

4.1 Продолжение набор статистики с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K при помощи 30 ГэВ-ного ускорителя J-PARC. Новые данные эксперимента T2K в 2025 г.

В 2025 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 СР-нарушающей фазы) и иерархии масс нейтрино [82].

В этом эксперименте, который начал набор статистики в 2010 г. и по планам 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-Камиоканда (SK), расположенного в 295 км к западу от Токая (*после осцилляций*).

Всего с начала 2010 г. по конец 2025 г. в T2K проведено 15 сеансов с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино (с небольшой примесью электронных нейтрино). В 2025 г. сеансы по набору статистики проходили в феврале-марте (сесанс №14), а также в ноябре-декабре (сесанс №15 - будет продолжен в 2026 г.), причем максимальная мощность протонного пучка J-PARC достигала 830 кВт. С 23.01.2010 г. по 04.03.2025 г. набрано $\sim 4.62 \times 10^{21}$ POT (протонов на мишени): 61.60 % в нейтринной моде и 38.38% в антинейтринной. Ожидается, что в ноябре-декабре 2025 г. (в сесансе №15) добавится новый объем данных в нейтринной моде (около месяца работы ускорителя), а в январе-марте 2026 г. T2K будет работать в обеих модах. Важно отметить, что во время набора данных в 2024-2025 гг. впервые работала вся обновленная детекторная система ND280, включая SFGD, HTPC и ToF, кроме того, фокусирующая система нейтринной мишени успешно функционировала при импульсном токе 320 кА, что позволило увеличить интенсивность и плотность нейтринных событий.

4.2 Анализ данных по поиску нарушения СР-инвариантности в эксперименте T2K.

В 2025 г. анализ данных, набранных в сеансах №№1-11, был проведен с использованием улучшенных методик для подавления систематических погрешностей.

В 2025 г. в журнале Nature был опубликован [83] результат совместного анализа двух ускорительных экспериментов – T2K и NOvA [84], – которые являются взаимодополняемыми благодаря тому, что имеют разную пролетную базу (295 км и 810 км, соответственно), различные диапазоны нейтриных энергий (пиковые значения ~ 0.6 ГэВ в T2K и ~ 2.0 ГэВ в NOvA), различные типы ближних/дальних детекторов, различные систематические ошибки.

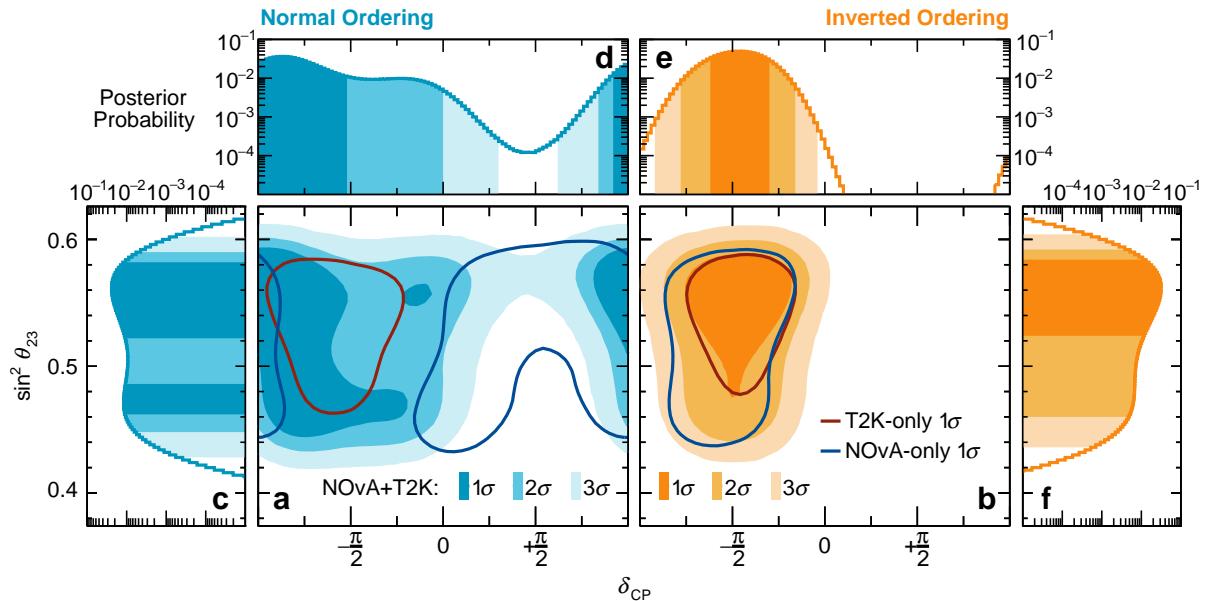


Рисунок 4.1 – Ограничения на параметры $\sin^2 \theta_{23}$ и δ_{CP} . На рисунке показаны двумерные контуры и одномерные проекции Байесовских доверительных областей и маргинализованные апостериорные вероятности параметров $\sin^2 \theta_{23}$ и δ_{CP} , полученных в экспериментах T2K и NOvA. Слева: в случае нормальной (голубые линии), а справа – в случае обратной (оранжевые линии) иерархии масс нейтрино с учетом ограничений реакторных экспериментов. Заштрихованные области соответствуют доверительным областям, соответствующим статистической значимости в 1σ , 2σ , и 3σ .

В результате совместного анализа данных T2K и NOvA получен 3σ интервал для величины СР-нарушающей фазы δ_{CP} (рис. 4.1): $[-1.38\pi, 0.30\pi]$ для *нормальной* иерархии масс и $[-0.92\pi, -0.04\pi]$ для *обратной* иерархии масс нейтрино. Кроме того, получены следующие значения разности квадратов масс Δm_{32}^2 : $(2.43^{+0.04}_{-0.03}) \times 10^{-3}$ эВ² для *нормальной* иерархии и $(-2.48^{+0.03}_{-0.04}) \times 10^{-3}$ эВ² для *обратной* иерархии масс нейтрино (см. рис. 4.2, где показаны результаты для обратной иерархии масс различных экспериментов). Следует отметить, что полученные данные пока не дают

четкого предпочтения той или иной иерархии масс, но, если предположить, что истинной является обратная иерархия масс в рамках парадигмы смешивания трех семейств нейтрино, то эти результаты могли бы служить *доказательством* нарушения CP-симметрии в лептонном секторе [83].

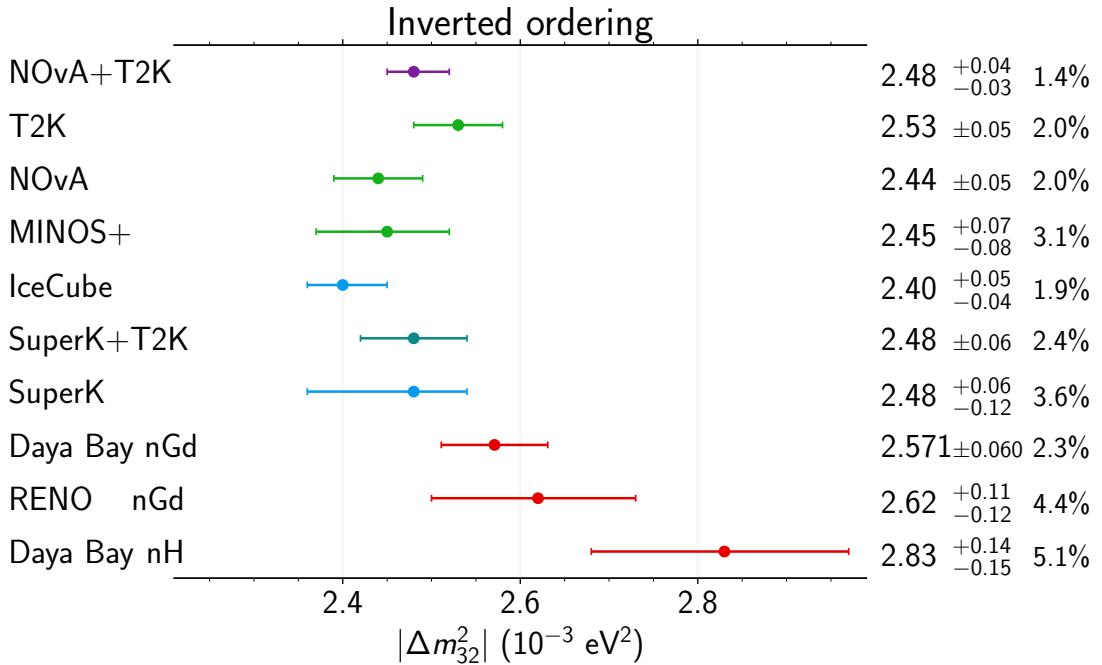


Рисунок 4.2 — Результаты измерения $|\Delta m_{32}^2|$ различными экспериментами, в том числе при совместном анализе NOvA+T2K. Здесь показаны результаты анализа в предположении обратной иерархии масс нейтрино.

В 2025 г. продолжился анализ собственно данных эксперимента T2K, в частности, были измерены следующие осцилляционные параметры матрицы PMNS: Δm_{32}^2 , $\sin^2 \theta_{13}$, $\sin^2 \theta_{23}$, δ_{CP} , J_{CP} и иерархия масс для статистики 3.6×10^{21} РОТ. В ходе анализа был использован новый набор данных в детекторе SK, события $\nu_\mu CC1\pi^\pm$, которые позволили увеличить статистику μ -подобных событий в нейтринной моде на 42.5%. Кроме того, были использованы события в модернизированном ближнем детекторе ND280 и значительные улучшения в моделировании нейтринного пучка и нейтринных взаимодействий в веществе ND280. Результаты соответствуют предыдущим результатам T2K, показывающим слабое предпочтение нормальной иерархии масс и верхнему октанту $\sin^2 \theta_{23}$ со следующими наилучшими значениями параметров: $\sin^2 \theta_{23} = 0.559^{+0.018}_{-0.078}$ и $\Delta m_{32}^2 = (2.506^{+0.039}_{-0.052}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$. Одно из CP-сохраняющихся значений фазы $\delta_{CP} = 0$ исключается на уровне достоверности 90%, а наилучшая оценка равна $\delta_{CP} = -2.18^{+1.22}_{-0.47}$ для нормальной иерархии масс с использованием ограничений на угол смешивания θ_{13} из реакторных экспериментов [85].

Для проверки устойчивости полученных результатов к априорным распределениям параметров, которые используются в Байесовском анализе T2K, было про-

ведено специальное исследование с помощью параметризации Тэйта-Брайна, примененной к матрице смешивания лептонов. Было установлено, что результаты по измерению СР-нарушения (через инвариант Ярлског, например) не показывают значительных изменений в зависимости от выбора априорных распределений, в то время как легкое предпочтение верхнего октанта $\sin^2 \theta_{23}$ чувствительно к этому выбору, но эту зависимость можно подавить с помощью специальных ограничений [86].

4.3 Измерение сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280.

Для уменьшения систематических погрешностей измеряемых параметров осцилляций нейтрино необходимо с высокой точностью знать сечения взаимодействия нейтрино с веществом детекторов эксперимента T2K.

В 2025 г. была проделана большая работа по измерению сечений взаимодействия мюонных и электронных нейтрино с атомами воды, углерода, кислорода как через заряженные (charged-current, или CC), так и через нейтральные (neutral-current, или NC) токи, как в ближнем модернизированном детекторе ND280, так и в дальнем водном черенковском детекторе SK.

Приведем опубликованные в 2025 г. результаты по измерениям различных сечений взаимодействий нейтрино:

1) В веществе ближнего детектора WAGASCI-BabyMIND (вода и углеводород), расположенного под углом 1.5° по отношению к направлению протонного пучка, получены усредненные значения полного сечения взаимодействия *мюонных* нейтрино с водой (H_2O) 1.44 ± 0.21 (стат.+систем.) $\times 10^{-39}$ см 2 /нуклон и углеводородом (CH) 1.26 ± 0.18 (стат.+систем.) $\times 10^{-39}$ см 2 /нуклон. Эти результаты хорошо согласуются с предсказаниями моделей-генераторов нейтринных взаимодействий (NEUT и GENIE), которые используются при осцилляционном анализе [87].

2) Было измерено сечение взаимодействия *электронных* нейтрино с углеродом посредством заряженных токов с положительным пионом в конечном состоянии ($\nu_e CC\pi^+$) в ограниченном кинематическом фазовом пространстве: $[2.52 \pm 0.52$ (стат.) ± 0.30 (систем.)] $\times 10^{-39}$ см 2 нуклон $^{-1}$, причем это значение, также как и значения дифференциальных сечений, оказываются несколько ниже (в пределах 0.5 – 1.6σ) предсказаний нейтринных моделей-генераторов (NEUT, GENIE, NuWro), что необходимо проверить с большей статистикой [88].

3) Измерения двойного дифференциального сечения взаимодействия мюонных нейтрино посредством нейтральных токов с одним положительным пионом в конечном состоянии (NC1 π^+) на ядрах углеводорода (CH) дали следующий результат:

$(6.07 \pm 1.22) \times 10^{-41}$ см²/нуклон, что примерно на 35% выше предсказания модели NEUT (1.3 σ статистическая значимость данной разницы) [89, 90].

4) Еще одним важным результатом является первое измерение множественности нейтронного захвата при квазиупруго-подобных взаимодействиях нейтрино с кислородом воды (с растворенными солями гадолиния) черенковского детектора SK ($\nu - {}^{16}\text{O}$ NCQE-подобные взаимодействия) : 1.37 ± 0.33 (стат.) $^{+0.17}_{-0.27}$ (систем.). Эти измерения были проведены на данных, соответствующих 1.76×10^{20} РОТ, при этом в SK всего было отобрано 30 таких кандидатов. Полученная величина множественности (1.37) несколько ниже предсказаний различных моделей (NEUT и др.), что указывает на необходимость дальнейшего изучения этих процессов с большей статистикой. Тем не менее, уже этот результат может быть использован при сравнении потоков атмосферных нейтрино и ускорительных нейтрино T2K, и, кроме того, эта информация может быть полезна для больших водных черенковских детекторов при изучении диффузного фона нейтрино от взрывов реликтовых сверхновых [91].

5 Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино).

5.1 Эксперимент NA62.

В течение 2025 года в рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) был продолжен анализ данных, набранных в сеансах 2023–2024 гг., по измерению вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Предложены различные улучшения методики анализа данных. Новая реконструкция каонных треков на основе моделей машинного обучения была встроена в текущий анализ данных. Ожидается улучшение эффективности восстановления треков по сравнению с предыдущей версией анализа данных. В данный момент проводится количественное изучение эффектов новой реконструкции на ожидаемое количество сигнальных событий. Также улучшена система идентификации продуктов распада каона для еще более лучшего отделения пионов от мюонов. Предложена новая модель использования фотонного вето, которая позволит уменьшить "случайное-вето из-за высокой интенсивности пучка, что позволит в целом выделить больше кандидатов в сигнальный процесс. Данный анализ находится в завершающей стадии и в используемом наборе данных ожидается 23.3 ± 0.11 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ событий, учитывая вероятность распада Стандартной модели. В свою очередь фоновых событий ожидается $18.9^{+5.3}_{-4.7}$. Таким образом, ожидается около 42 кандидатов событий, что сравнимо с количеством кандидатов (51), полученных на данных 2016–2018 + 2021–2022 гг.

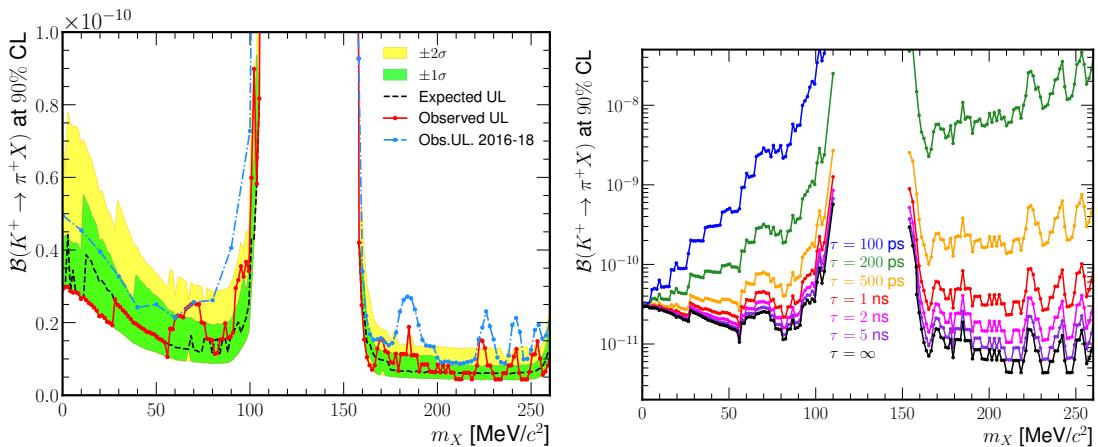


Рисунок 5.1—Модельно независимые ограничения на вероятность распада $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ для бесконечного времени жизни частицы X (слева). Модельно независимые ограничения на вероятность распада $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ для различных времен жизни частицы X (справа).

Также проведена реинтерпретация результатов анализа $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в рамках поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^+ X$. Получены новые модельно независимые верхние преде-

лы на вероятность распада $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ в диапазоне масс $0 < m_X < 110 \text{ МэВ}/c^2$ и $150 < m_X < 260 \text{ МэВ}/c^2$ (рис. 5.1).

Получены новые ограничения на параметры различных расширений Стандартной модели. Результаты приняты к публикации в JHEP 20 октября 2025 [92].

5.2 Эксперимент ОКА (Протвино)

В 2025 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. Продолжается анализ данных для различных мод распада положительных каонов.

6 Проведение физического пуска эксперимента JUNO, настройка и отладка его детекторных элементов.

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 ~ 650 м (глубина потолка подземной лаборатории) находится на расстоянии ~ 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.

Поток мюонов космических лучей на глубине эксперимента (~ 1800 м.в.э.) составляет $4,1 \times 10^{-3}$ см $^{-2}$ 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 99,9%. Кроме этого, верхняя часть водного черенковского детектора вето ($\sim 60\%$ площади) покрыта пластиковым трековым сцинтилляционным детектором вето (31744 сцинтилляционных стрипов ($6,86$ м \times $26,4$ мм \times $10,6$ мм), считывание сцинтилляционного сигнала производится с помощью спектротомещающих оптоволокон и многоанодных (8×8 каналов) фотоумножителей H7546 (Hamamatsu Photonics), общее число таких фотоумножителей — ~ 500 штук), определяющим направление прихода мюонов с точностью 0,2 градуса. Центральный детектор — это 20 кт 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. Сцинтиллятор обладает высокой прозрачностью — длина ослабления сцинтилляционного света превышает 20 м. Центральный детектор помещается в бак диаметром 43,5 м и высотой 44 м, наполненный ультра чистой водой. Жидкий сцинтиллятор просматривается 17596 крупногабаритными (20-дюймовыми) фотоумножителями (MCP-PMT производства NNVT Co., Китай, и R12860 производства Hamamatsu Photonics, Япония) и ~ 25600 малогабаритными (3-дюймовыми) фотоумножителями (XP72B22 производства HZC Photonics, Китай). Такая “двойная калориметрия” на основе двух систем фотоумножителей позволяет получить средний световой выход детектора ~ 1345 фотоэлектронов на 1 МэВ при среднем уровне покрытия детектора фотокатодами $\sim 78\%$. При таком световом выходе достигается рекордное энергетическое разрешение эксперимента $\leq 3\%/\text{МэВ}$, необходимое для решения задачи определения иерархии масс нейтрино. Центральный детектор окружен водным черенковским детектором вето (~ 40 килотонн ультра чистой воды, ~ 2500 крупногабаритных 20-ти дюймовых фото-

умножителей (MCP-PMT производства NNVT)). Детектор OSIRIS — это 20-тонный жидкосцинтилляционный детектор контроля в режиме онлайн во время осуществления заливки жидкого сцинтиллятора в центральный детектор внутренней радиоактивности сцинтиллятора. В этом детекторе используется ~ 76 крупногабаритных фотоумножителей (Hamamatsu R12860 и NNVT MCP-PMT).

Ближний детектор ТАО, который располагается в непосредственной близости (~ 44 м) от одного из реакторов комплекса Тайшань, полностью смонтирован и находится в предпусковом состоянии.

Основные результаты, полученные в 2025 году:

Успешно выполнен физический пуск эксперимента JUNO. Все детекторы (Центральный детектор, Водный черенковский детектор вето, Пластиковый сцинтилляционный детектор вето TT (Top Tracker), детектор OSIRIS), составляющие эксперимент JUNO, функционируют в полном объеме, с высокой эффективностью и стабильностью.

Проведен полный цикл калибровочных измерений всех детекторов эксперимента. Эффективность регистрации мюонов системой детекторов вето составляет 99,98%. В водном черенковском детекторе вето удалось достичь высокой прозрачности воды — длина ослабления света составляет ~ 75 м.

За первые 60 дней экспозиции в эксперименте измерены с рекордной точностью параметры нейтринных осцилляций θ_{12} и Δm_{21}^2 :

$$\sin^2 \theta_{12} = 0,3092 \pm 0,0087; \quad \Delta m_{21}^2 = (7,50 \pm 0,12) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

7 Поиск двойного безнейтринного бета распада ${}^{76}\text{Ge}$ в составе международной коллаборации GERDA

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 2025 году получены следующие результаты.

1. Бета-распад изотопов ${}^{77}\text{Ge}$ и ${}^{77}\text{mGe}$, происходящий в результате захвата нейтронов на ${}^{76}\text{Ge}$, является потенциальным фоном для экспериментов по поиску двойного бета-распада на основе германия, таких как GERDA или эксперимент LEGEND. Коллаборация GERDA в 2025 году опубликовала [93] результаты поиска распадов ${}^{77}\text{Ge}$ в полном наборе данных GERDA Phase II. Метод отложенных совпадений был использован для идентификации распада ${}^{77}\text{Ge}$ по изомерному состоянию ${}^{77}\text{As}$ ($9/2^+$, 475 кэВ/с, $T_{1/2} = 144\text{мкс}$, ${}^{77}\text{mAs}$). Для отбора и анализа наложенных сигналов были использованы новые методы цифровой обработки сигналов. Был установлен верхний предел скорости образования $< 0.216 \text{ ядер}/(\text{кг}\cdot\text{год})$ (90% CL). Это соответствует общей скорости образования ${}^{77}\text{Ge}$ и ${}^{77}\text{mGe}$ $< 0.38 \text{ ядер}/(\text{кг}\cdot\text{год})$ (90% CL), при условии равных скоростей образования. В предыдущем исследовании методом Монте-Карло было предсказано значение для скорости образования ${}^{77}\text{Ge}$ и ${}^{77}\text{mGe}$ равной ($0.21+/-0.07$) ядер/(\text{кг}\cdot\text{год}) $, и это предсказание теперь дополнительно подтверждается полученным экспериментальным пределом. Более того, маркировка изомерного состояния ${}^{77}\text{mAs}$ может быть использована для дальнейшего подавления фона ${}^{77}\text{Ge}$. Учитывая схожие экспериментальные конфигурации LEGEND-1000 и GERDA, космогенный фон в LEGEND-1000 на LNGS, по оценкам, остается на субдоминантном уровне.$

2. Коллаборация LEGEND, основываясь на ключевых технологических инновациях GERDA и демонстраторе MAJORANA, на этапе LEGEND-200 выполнила первый поиск распада $0\nu\beta\beta$ на основе данных объемом 61,0 кг в год [94]. Более половины статистики поступила от самых эффективных детекторов, включая недавно разработанные инвертно-коаксиальные детекторы, и характеризуется фоновым уровнем $0.5+0.3- 0.2/$ (кэВ кг/год) в области сигнала распада $0\nu\beta\beta$. Комбинированный анализ данных GERDA, ДЕМОНСТРАТОРА MAJORANA и LEGEND-200, характеризуемый возможностью исключить период полураспада $0\nu\beta\beta$ $2.8\cdot10^{26}$ лет с 90%-ной степенью достоверности, не выявил признаков наличия сигнала и установил новый наблюдаемый нижний предел (90%-ный уровень достоверности) $T_{0\nu} > 1.9\cdot10^{26}$ в год. Предполагая, что распад опосредован майорановскими нейтрино, этот предел соот-

ветствует верхнему пределу эффективной майорановской массы в диапазоне $m_{\beta\beta} < 75 \div 200$ МэВ, зависящему от используемого матричного элемента.

3. Радиоактивный изотоп ^{85}Kr содержится в атмосфере в значительных количествах, в основном, благодаря ядерной промышленности. Его бета - распад с периодом полураспада 10,7 лет и $Q = 687$ кэВ является опасным источником фона для низко-пороговых детекторов благородных газов и жидкостей, в которых детекторная среда отделяется от воздуха. В эксперименте Gerda использовались детекторы из германия высокой чистоты, погруженные в ванну с чистым жидким аргоном глубоко под землей, для поиска двойного бета-распада без излучения нейтрино с беспрецедентной чувствительностью. Было определено [95], что удельная активность ^{85}Kr в жидким аргоне в начале второго этапа эксперимента составляет 0.36 ± 0.03 мБк/кг на основе анализа всего последующего набора данных, что демонстрирует превосходные возможности спектроскопии Gerda.

8 Увеличение точности измерения угла смешивания тэта-13 осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz. - Использование антинейтринных спектров, полученных в эксперименте Double Chooz, для отработки метода вычисления антинейтринных спектров для реакторов с другим составом топлива.

8.1 Увеличение точности измерения угла смешивания тэта-13 осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz.

В коллаборации Double Chooz закончен анализ данных, полученных в ходе эксперимента, длившегося с 2010 по 2017 годы. Тщательно проанализированы источники фона. Погрешность измерения удалось уменьшить с 0.014 до 0.011. окончательный результат будет опубликован в ближайшее время. Были проанализированы данные, полученные во время остановки обоих ядерных реакторов АЭС. Обнаружен сигнал от долгоживущих изотопов, накапливающихся в активной зоне ядерного реактора. Сигнал поступает, как от самого остановленного реактора, так и от бассейна с отработанным топливом [96]. Зарегистрировано 106 ± 18 нейтринных событий, что находится в очень хорошем согласии с предсказанием 88 ± 7 . Статья отправлена в журнал Physical Review Letters.

8.2 Использование антинейтринных спектров, полученных в эксперименте Double Chooz, для отработки метода вычисления антинейтринных спектров для реакторов с другим составом топлива.

Данные Double Chooz эксперимента от ближнего детектора были использованы для получения спектров антинейтрино, испускаемых делящимися изотопами: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu . Для этого в расчете менялась форма спектров антинейтрино неизвестных осколков до совпадения с экспериментальным спектром [97]. Статья отправлена в журнал Известия Российской академии наук. Серия физическая.

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. Безоконный газовый источник трития, имеет огромные преимущества по сравнению с другими (с намороженным тритием или имплантированным в подложку) источниками за счёт отсутствия материала окна или подложки. Рабочий газ под низким давлением, менее 10^{-2} мбар, циркулирует по замкнутому контуру. Последовательная система из нескольких насосов предотвращает проникновение газа в объём спектрометра. Электроны, образованные в результате распада трития в трубе спектрометра длиной порядка 3 метров, захватываются сильным магнитным полем. Поле сформировано последовательностью сверхпроводящих соленоидов.

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, сканируется 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 коллaborации KATRIN (Карлсруэ, Германия), а также подпроекта TRISTAN (Мюнхен, Германия) [98].

Каждый пиксель представляет собой кремниевый дрейфовый детектор, характерной особенностью которого является крайне малая ёмкость регистрирующего анода — порядка 40 фемто-Фарад. Это обеспечивает сильное подавление шума, величина которого обратно пропорциональна корню из значения 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 увеличения сигнала в вольтах примерно на такую же величину. Считывающая электроника работает в режиме непрерывной оцифровки, которая требует оптимизации временного окна с целью минимизи-

ровать шум и улучшить энергетическое разрешение. АЦП с частотой дискредитации 125 МГц оцифровывает сигналы. Блок АЦП позволяет использовать быстрый цифровой фильтр в виде трапеции, который обрабатывает оцифрованные импульсы, что существенно подавляет шумы детектора и электроники.

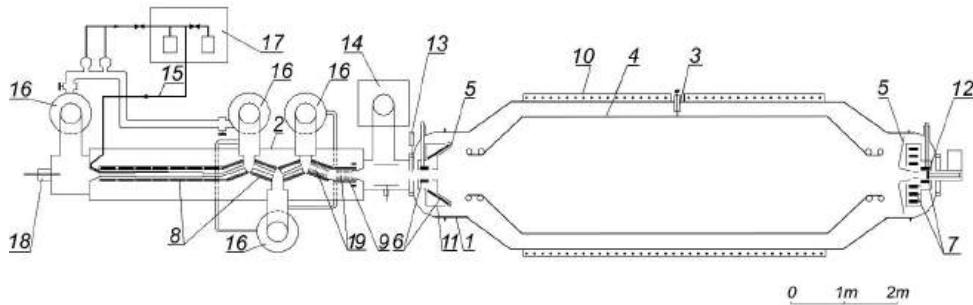


Рисунок 9.1 – Основные элементы установки, тритиевый источник расположен слева, спектрометр - справа: 8 – безоконный тритиевый источник, 15 – система замкнутой циркуляции трития, 10 – электростатический спектрометр, 12 – регистрирующий детектор

В состав установки также входит высоковольтная 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. Измерение и контроль напряжения осуществляется через высокоточный резисторный делитель. Такой вариант обеспечивает максимальную точность и стабильность.

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

9.2 Обработка экспериментальных данных

Как уже отмечалось во введении, в 2025 г. было проведено 2 сеанса полноценных измерений спектра электронов от распадов трития. Максимальная конечная энергия таких электронов около 18575 электрон вольт. Сканирование интегрального спектра проводилось пошаговым изменением потенциала спектрометра в диапазоне 11 - 18.6 кВ с шагом 50 вольт. На рисунке 9.2 приводится измеренный спектр в одном из наборов в зависимости от напряжения на спектрометре.

При обработке первичных данных необходимо провести ряд поправок. В первую очередь, это толщина источника, то есть, количество газа и вероятность рассения электронов на рабочем газе. Для этого дополнительно выполняются измере-

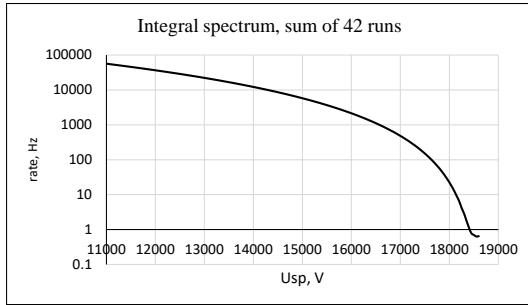


Рисунок 9.2 — Пример одного из набора данных интегрального спектра электронов.

По вертикальной оси скорость счёта детектора в конце спектрометра. По горизонтали - потенциал спектрометра

ния 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, ΔE . Функция пропускания, практически, плоская и составляет 100% для интервала ΔE ниже 6 кэВ. При более высокой разности функция пропускания начитает падать. Детально её поведение также измеряется с электронной пушкой. Значение этой функции сворачивается с теоретическим β -спектром. Неизбежной поправкой является учёт событий попадающих под порог электроники. Для этого плоский хвост событий амплитудного спектра слева от основного пика экстраполировался к нулю. Эта поправка не превышала 3-5% с консервативной оценкой систематической точности 50%. Тем не менее, оценки показали, что вклад неточности этой поправки существенно ниже статистической точности.

Далее вводится поправка на мёртвое время электроники и на долю случайных наложений. Мёртвое время электроники составляет примерно 400 нсек. Важно, что эта величина фиксирована и не зависит от интенсивности.

Случайные двойные и тройные наложения чётко выделяются в аналоговом спектре амплитуд в виде отдельных областях выше одиночных срабатываний. Поскольку это амплитуда от двух или трёх электронов, число таких событий удваивается или утраивается и прибавляется к скорости счёта одинарных событий.

Магнитные поля в источнике образуют магнитную ловушку для электронов с большими азимутальными углами относительно оси соленоидов, эффект трепинга

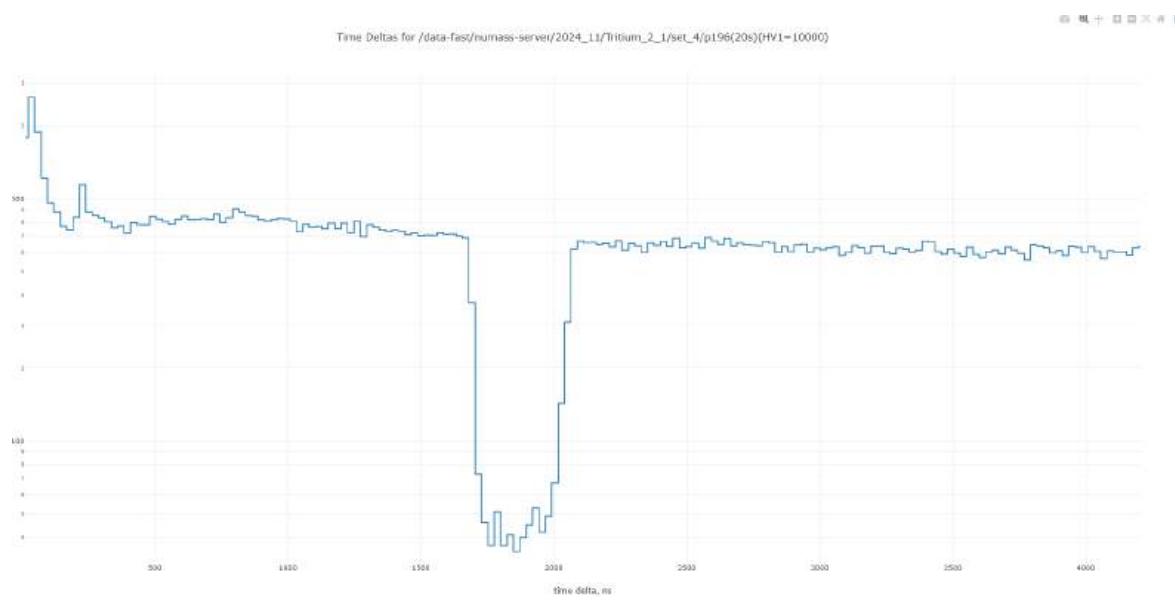


Рисунок 9.3 — Распределение времени между моментом срабатываний первого триггера и последующего события. Провал счёта на 400 нсек ниже отметки в 2000 нсек определяет мёртвое время считывания электроники

(запирание). 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 [99]. В 2025 году проведены заново расчёты вклада треппинга с большей статистикой розыгрыша и в более широком интервале потерянной энергии.

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 и достигнуть регистрирующего детектора. Этот эффект “задней стенки” может искажать спектр первичных электронов. Были проведены расчёты вероятности рассеяния электронов на задней стенке с учётом конфигурации магнитных и электростатических полей установки. Делается поправка на вклад таких электронов, который не превышает 2%. Часть расчётов собственно вероятности рассеяния проводилась в пакете программ GEANT.

Основной набор статистики был начат в 2024 г. и продолжен в 2025 г. За два года в итоге было проведено 4 полноценных сеанса измерений. Каждый из них обрабатывался отдельно для оценки проявления возможной компоненты стерильного нейтрино в спектрах. Далее эти значения усреднялись с учётом имеющихся статистических ошибок. Результат одного из промежуточных этапов обработки показан на рисунке 9.4.

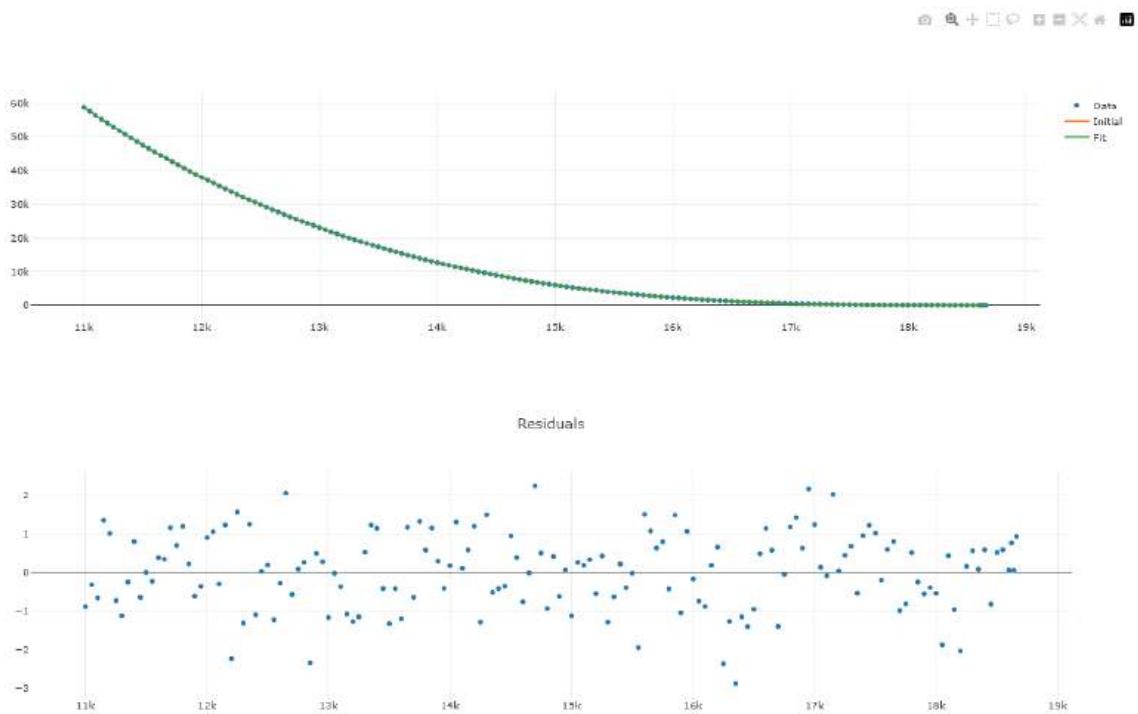


Рисунок 9.4 – Результаты фитирования экспериментальных точек расчётного спектра со всеми необходимыми поправками, сверху. Разность в единицах статистической ошибки между экспериментальными точками и полученной расчётной кривой, внизу. По горизонтали - потенциал спектрометра

Получены предварительные пределы на элемент матрицы смешивания электронного и стерильного нейтрино 9.5 в интервале масс ниже 7 кэВ. В большей части спектра можно установить только верхний предел, который находится на уровне 10^{-3} . В области примерно 5,5 кэВ наблюдается сигнал некоей примеси с низким уровнем достоверности существенно выше нуля, примерно в 10 ошибок. Поскольку данные сигнал является полной имитацией сигнала от стерильного нейтрино, изучается возможность аппаратного происхождения сигнала. На данном этапе идёт поиск возможного источника. Рассматривается вполне вероятным возникновение локаль-

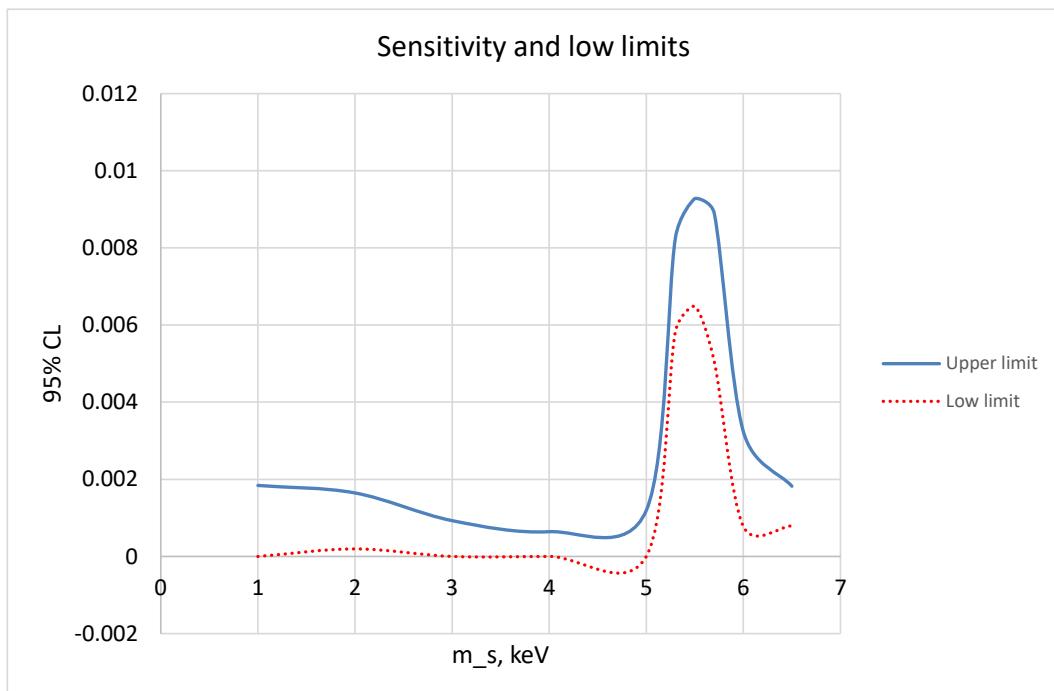


Рисунок 9.5 – Предварительные результаты обработки. Пределы на уровне 95% достоверности на элемент матрицы смешивания электронного и стерильного нейтрино в зависимости от массы последнего. Сплошная кривая – верхний предел. Кривая точками – нижний предел

ной магнитной ловушки на входе спектрометра, но вопрос остаётся открытым. Оценка всех систематических ошибок продолжается.

9.3 Работы над усовершенствованием и модернизацией криогенной системы

Вакуумные и криогенные системы являются важнейшими частями установки, обеспечивающие её функционирование. Проведен ремонт и частичная модернизация этих систем:

- модернизация системы циркуляции газового источника электронов. был заменён старый пара-ртутный насос в системе циркуляции рабочего газа. Установлен новый турбо-молекулярный насос (ТМН). Проведены испытания новой системы, которая, в итоге успешно работала в двух сеансах;
- подготовлена и проведёна техническая диагностика цистерн жидкого азота;

- монтаж «мягкого» газгольдера объёмом 20 метров кубических для аварийного сброса гелия;
- проведены ремонтные работы погрузчика с заменой электрического щита управления;
- выполнено конструирование и завершается изготовление деталей для вакуумной камеры анализатора содержания кислорода в гелии;
- проведен монтаж воздушного компрессора для пневматической системы гелиевого охлаждителя;
- изготовлен стенд для криогенных испытаний отдельных элементов и детекторов до температуры жидкого азота.

Выполнен ряд других профилактических работ по вакуумной и криогенной системах.

9.4 Расширение возможностей работы на вакуумных стендах

В ходе работы криогенной системы потребовалась модернизация контроля температур. Для контроля за температурами в криостатах установки «Троицк ню-масс» вплоть до температур жидкого гелия (4 Кельвина) был установлен прибор ПКТ-8 (8-канальный прибор криогенной термометрии) производства ОИЯИ, г. Дубна. Прибор представляет собой многоканальный 24-разрядный АЦП 9.6 с прецизионными опорными источниками тока и напряжения с использованием резисторов ТВО. К

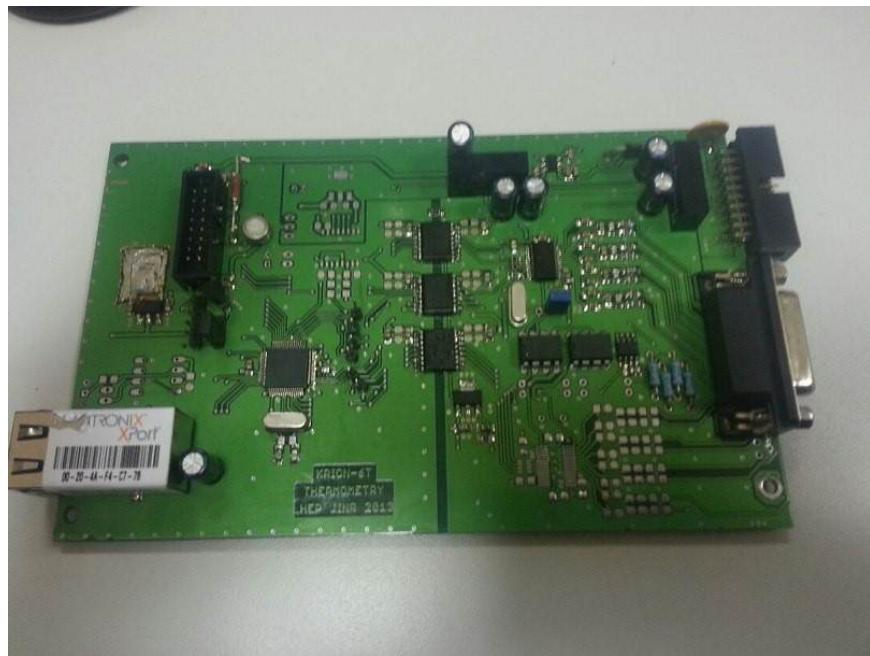


Рисунок 9.6 — Внешний вид платы термометрического модуля

прибору было написано собственное программное обеспечение, позволяющее интегрировать его в существующую систему управления гелиевым охлаждителем по сети

Ethernet. Полностью переделаны кабели и разъёмы, подходящие к криостатам. Пропроверено соответствие градуировочных таблиц и полиномов для датчиков. Предыдущая система была изготовлена на базе модулей КАМАК 1990-х годов и полностью устарела как морально, так и физически. Новая система хорошо показала себя в работе, однако для более точного управления установкой потребуется её масштабирование для подключения большего числа датчиков в газовом источнике электронов. Так же были приобретены два отдельных автономных переносных датчика для криостатов, произведена адаптация к нашим размерам.

Для проведения различных пуско-наладочных и калибровочных работ в распоряжении группы имеется два вакуумных стенда. Возникла необходимость обеспечить их непрерывным контролем величины вакуума и температуры. Для работ на вакуумном стенде была изготовлена отдельная небольшая система на базе модуля ОВЕН МВ-110-224.8А для мониторинга давления и температуры в лаборатории, написаны программы для опроса датчиков РТ-1000 через интерфейс RS-485. Пример работы этой системы в течение 4 суток представлен на рисунке 9.7. В данном случае вакуумный стенд непрерывно откачивался — верхний график, и непрерывно измерялась температура в комнате — нижний график. Видно изменение скорости откачки с вариацией температуры. В основном, это обусловлено ухудшением вакуума за счёт выделения остаточной воды со стенок камеры.

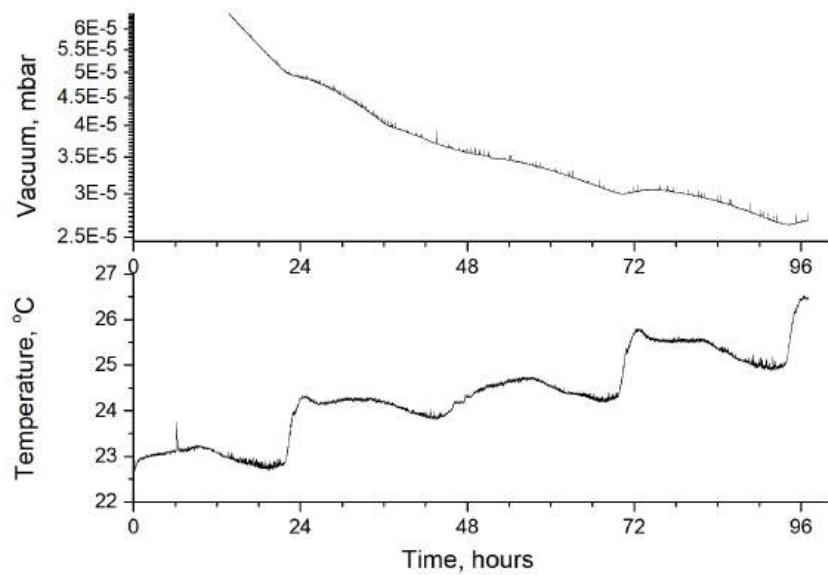


Рисунок 9.7 — Пример мониторинга температуры и давления

9.5 Развитие программного обеспечения

Разработан детекторный модуль системы сбора данных эксперимента «Троицк ню-масс» для цилиндра Фарадея. Создан модуль визуализации и первичного анализа данных в реальном времени. Проведена существенная модернизация модуля оператора системы «Троицк ню-масс» — полностью переписан на языке Go с максимальным сохранением привычного внешнего вида. Разработан модуль сигнализации, осуществляющий автоматическую проверку:

- превышения давлениями в системе откачки допустимых значений;
- корректности работы модуля высокого напряжения;
- наличия скачков высокого напряжения;
- факта простоя в наборе данных (контроль запуска измерений оператором).

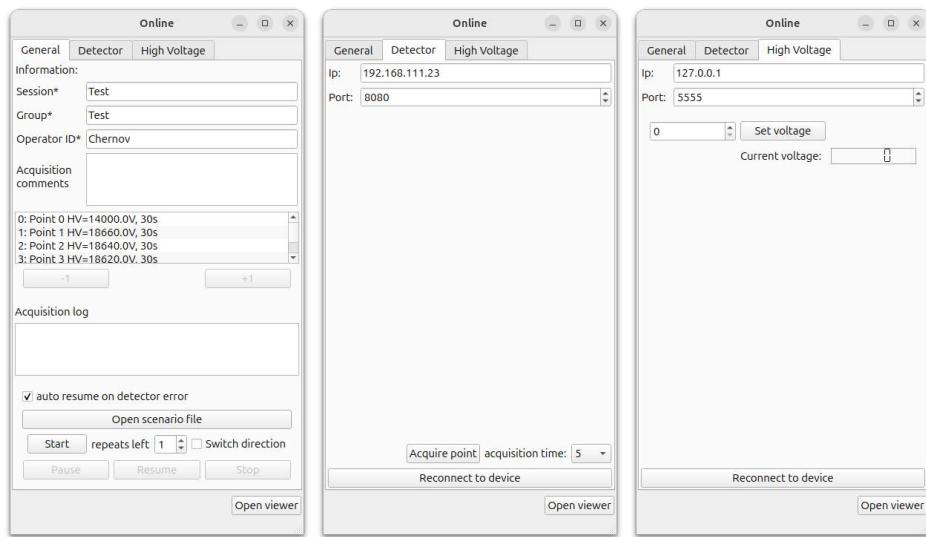


Рисунок 9.8 — Внешний вид модуля оператора

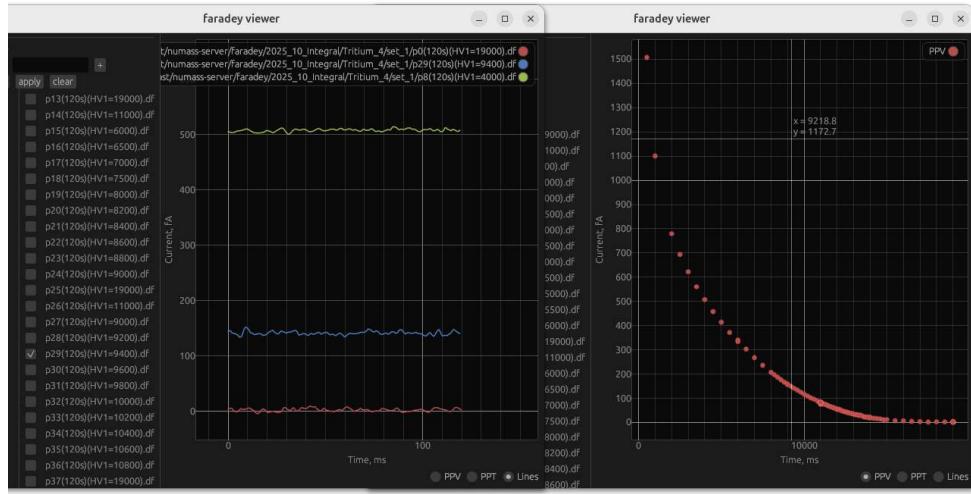


Рисунок 9.9 — Фрагменты модуля визуализации. Слева: режим вывода осциллографов единичных файлов, справа: визуализация всего прохода



Рисунок 9.10 — Внешний вид модуля сигнализации

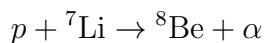
10 Поиск безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo в составе международной коллаборации AMoRE.

По программе эксперимента AMoRE в 2025 году были выполнены следующие работы:

Окончен анализ данных, полученных на этапе AMoRE-I. Обработка данных проводилась для 17 детектирующих кристаллов, включавших 13 образцов $^{48\text{depl}}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и 4 образца $^{nat}\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Суммарная экспозиция составила 8 кг·лет для XMoO₄ (по всем кристаллам), что соответствует 3.88 кг·лет для изотопа ^{100}Mo . На основе этих данных установлен нижний предел периода полураспада безнейтринного двойного бета-распада ^{100}Mo : $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 2,9 \cdot 10^{24}$ лет (90% У.Д.) [100]. Соответствующее ограничение на эффективную массу Майораны, оцененное с использованием ядерных матричных элементов в рамках ряда моделей (включая новейшие расчёты оболочечной модели), находится в интервале $m_{\beta\beta} < (210 - 610)$ мэВ. Настоящий результат является наиболее строгим ограничением для ^{100}Mo и превосходит предыдущий результат полученный коллаборацией CUPID-Mo - $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 1,8 \cdot 10^{24}$ лет (90% У.Д.) [101].

Параллельно с основной задачей поиска безнейтринного двойного бета-распада Mo-100 [100], изучается возможность использования набора данных AMoRE-I для поиска сигналов от солнечных аксионов, рожденных ядром лития-7 (^7Li).

Аксионы — это гипотетические элементарные частицы, которые могут служить кандидатом на роль темной материи. Одним из интересных процессов, связанных с аксионами, является их образование в результате термоядерных реакций в звездах, таких как Солнце. Одним из наиболее перспективных каналов генерации солнечных аксионов является ядерная реакция с участием изотопа ^7Li , рисунок 10.1:



Данный процесс представляет собой Примакофф-превращение, в котором аксион α эмитируется вместо реального фотона. Энергия рожденного аксиона определяется разностью масс ядер в начальном и конечном состояниях и для данной реакции составляет 477,6 кэВ. Этот канал является монохроматическим, что обеспечивает четкую сигнатуру для экспериментального поиска.

Поиск аксионов именно в этом канале представляет интерес по нескольким причинам:

Монохроматичность сигнала: Аксионы, рожденные в данной реакции, являются практически монохроматическими. Их энергия определяется разностью масс ядер в начальном и конечном состояниях и составляет примерно 477,6 кэВ. Это созда-

ет уникальную, узкую спектральную линию, которую крайне сложно воспроизвести фоновыми процессами, что значительно упрощает идентификацию сигнала на эксперименте.

Связь с проблемой солнечных нейтрино: Реакция $p + {}^7\text{Li}$ конкурирует с реакцией $p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$, которая является источником высокоэнергетических борных нейтрино (${}^8\text{B}$). Наличие канала с излучением аксиона уменьшает вероятность стандартного электромагнитного перехода и, как следствие, приводит к снижению потока нейтрино от распада ${}^8\text{B}$. Таким образом, обнаружение аксионов от ${}^7\text{Li}$ могло бы предложить элегантное объяснение наблюдаемым небольшим отклонениям потоков солнечных нейтрино от предсказаний Стандартной солнечной модели, зафиксированным детектором Borexino.

Для поиска событий резонансного поглощения аксионов на ядрах ${}^7\text{Li}$ используются пять модулей детектора AMoRE-I с кристаллами ${}^{nat}\text{Li}_2{}^{100}\text{MoO}_4$. Эти пять кристаллов имеют общую массу 1,610 кг и содержат приблизительно $1,03 \cdot 10^{25}$ ядер ${}^7\text{Li}$. Суммарный спектр за 333 дня с выделенной областью интересов ($477,6 \pm 8,7$) кэВ показан на рисунке 10.2.

При ожидаемой энергии 478 кэВ не было обнаружено статистически значимого превышения сигнала. В результате было предварительная оценка на верхнюю границу для массы аксиона (чувствительность), полученную методом резонансного поглощения на ядрах ${}^7\text{Li}$ на установке AMoRE-I:

$$m_\alpha < 7,4 \text{ кэВ} \quad (90\% \text{ У.Д.})$$

Проведен детальный анализ всех возможных источников фона, который может имитировать сигнал $0\nu\beta\beta$ в области интереса (ROI) вокруг $Q_{\beta\beta} \approx 3034$ кэВ в эксперименте AMoRE-II. Проведено тщательное моделирование с использованием методов Монте-Карло, учитывающее следующие компоненты:

Внутренний фон: обусловлен остаточными радиоактивными примесями (U/Th цепочек, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{210}\text{Pb}$) в самих кристаллах, держателях детекторов и фотодетекторах.

Цепочки распада Урана (${}^{238}\text{U}$) и Тория (${}^{232}\text{Th}$): Вклад в ROI: Основной вклад дают высокоэнергетические гамма-кванты от переходов в дочерних ядрах (например, ${}^{208}\text{Tl}$ из цепочки Th с энергией 2615 кэВ). Однако благодаря использованию отбора по форме импульса (тепло+свет) и высокому энергетическому разрешению, большинство подобных событий успешно идентифицируются и отсекаются. Целевые уровни радиоактивной чистоты: для достижения фона на уровне 10^{-5} событий/кэВ/кг/год требуются уровни загрязнения в самих кристаллах ${}^{48}{}^{dep}\text{Ca}{}^{100}\text{MoO}_4$ и ${}^{nat}\text{Li}_2{}^{100}\text{MoO}_4$

на уровне: $^{232}\text{Th} < (1 - 10) \text{ мкБк/кг}$, $^{238}\text{U} < (1 - 10) \text{ мкБк/кг}$. Ожидается, что при соблюдении этих условий суммарный вклад от U/Th цепочек в ROI оценивается как $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ событий/кэВ/кг/год.

Изотоп ^{210}Pb (продукт распада ^{222}Rn) является критически влияющим источником радиоактивного загрязнения (фона). Он осаждается на поверхностях детекторов и материалов. Его распад приводит к испусканию электронов с непрерывным спектром, который может простираться до области $0\nu\beta\beta$. Даже при очень низком уровне загрязнения ($\sim 0,1 \text{ мБк/кг}$ на держателях сцинтилляционных кристаллов) вклад ^{210}Pb может быть значительным. Моделирование показывает ожидаемый вклад порядка $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ событий/кэВ/кг/год. Условия снижения загрязнения поверхности конструкционных материалов требует сборки детекторов в атмосфере чистого аргона для исключения осаждения ^{222}Rn и его дочерних продуктов распада.

Изотоп ^{226}Ra может находиться в неравновесии с цепочкой ^{238}U . Его дочерний изотоп ^{214}Bi дает высокоэнергетический бета-спектр. Его вклад оценивается как незначительный, менее $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ событий/кэВ/кг/год.

Внешний фон: создаётся космическими мюонами и гамма-излучением от окружающих конструкций лаборатории и самой установки. Для его подавления в AMoRE-II используется многослойная система защиты:

Пассивная защита из свинца (обычный и низкофоновый), меди (очищенная от радиоактивности) и борированного полиэтилена для поглощения гамма- и нейтронного излучения. Благодаря такой системе защиты вклад внешнего гамма-фона (гамма-кванты от цепочек U/Th и ^{40}K) в ROI ожидается на уровне $3 \cdot 10^{-5}$ событий/кэВ/кг/год. Активная защита: Сцинтилляционный пластиковый детектор (мюонное вето), который позволяет идентифицировать и отсекать события, связанные с прохождением мюонов. Мюоны, проходящие через установку, могут генерировать вторичные частицы (например, нейтроны) в результате ядерных реакций. После применения всех методов подавления вклад мюон-индуцированных событий в ROI ожидается пренебрежимо малым, оцениваемым менее $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ событий/кэВ/кг/год. Фон от реакций с нейтронами: (α, n) -реакции от альфа-распада U/Th в окружающих материалах, а также космогенные нейтроны, рожденные мюонами. Нейтроны могут создавать фон в ROI через неупругое рассеяние на ядрах Mo или других реакциях. Моделирование показывает, что их суммарный вклад также очень мал, порядка $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ событий/кэВ/кг/год.

Фон от двойного двухнейтринного бета-распада ($2\nu\beta\beta$): Это неотъемлемый, не подавляемый фон, так как это реальный распад исходного изотопа ^{100}Mo . Он создает непрерывный спектр, правый хвост которого заходит под пик $0\nu\beta\beta$. Благодаря высокому энергетическому разрешению ($\sim 7 \text{ кэВ FWHM}$ при 3 МэВ), которое

позволяет четко отделить монохроматический пик $0\nu\beta\beta$ от непрерывного спектра $2\nu\beta\beta$, его вклад в узкую ROI может быть контролируемым. Он оценивается на уровне $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ событий/кэВ/кг/год.

Ниже представлена таблица 10.1 суммирующая вклад каждой компоненты ожидаемого фона AMoRE-II.

На основе смоделированного уровня фона, планового времени измерения (5–10 лет) и общей массы детектирующего вещества (~ 200 кг кристаллов $^{48}Ca^{dep} Ca^{100}MoO_4$ и $^{nat}Li_2^{100}MoO_4$) была определена чувствительность AMoRE-II к периоду полураспада $0\nu\beta\beta$. Ожидается, что эксперимент AMoRE-II сможет установить нижний предел на период полураспада $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 1 \cdot 10^{27}$ лет (90% У.Д.). В случае, если распад будет обнаружен, измеренное значение будет находиться в этом диапазоне. Эта чувствительность на 2–3 порядка превышает текущие лучшие результаты для ^{100}Mo .

При этом чувствительность к эффективной Майорановской массе будет лежать в диапазоне от 9 до 21 мэВ. Этот диапазон полностью покрывает так называемую «инвертированную область» иерархии масс нейтрино и частично затрагивает область нормальной иерархии, что делает эксперимент одним из самых перспективных в мире в этой области исследований.

На основе полученных данных была подготовлена публикация “Projected background and sensitivity of AMoRE-II” [102]

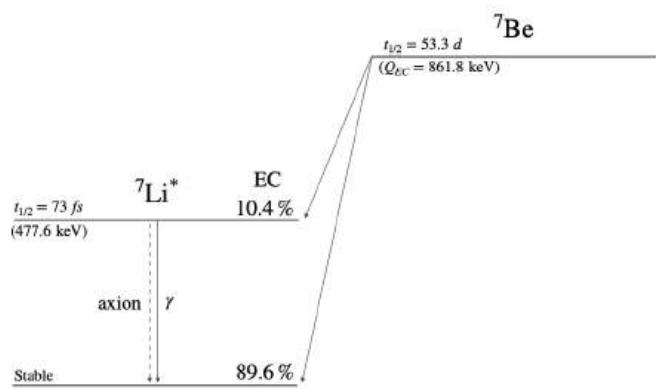


Рисунок 10.1 — Схема распада ${}^7\text{Be}$, показывающая образование возбужденного ${}^7\text{Li}^*$ посредством захвата электрона и последующее снятие возбуждения ядра ${}^7\text{Li}^*$ посредством испускания гамма-кванта или аксиона.

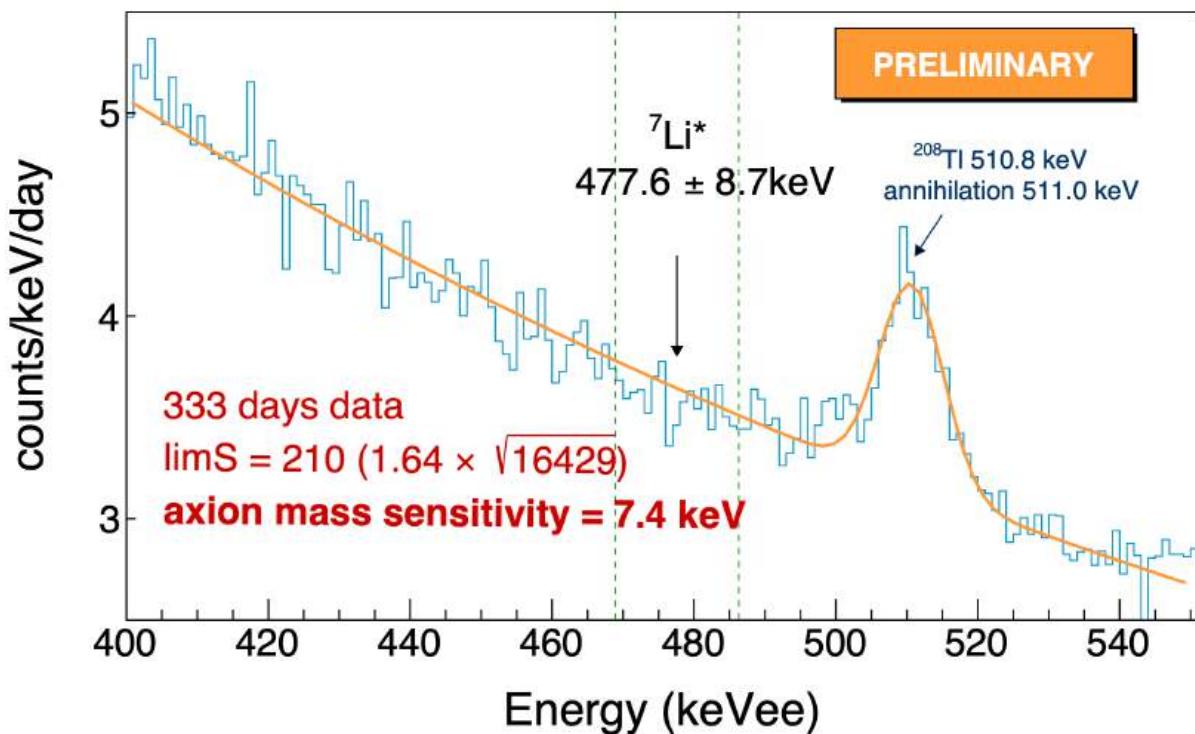


Рисунок 10.2 — Суммарный спектр пяти кристаллов $^{nat}\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ с отмеченной областью ожидаемых сигналов от аксионов ^7Li .

Таблица 10.1 — Компоненты фона и методы их подавления

Компонент фона	Ожидаемый вклад (событий/кэВ/кг/год)	Основной метод подавления
Внутренний (U/Th в кристаллах)	2.0×10^{-5}	Чистота материалов, двойное прочтение (PSD)
Внутренний (^{210}Pb на поверхности)	$\sim 1.0 \times 10^{-5}$	Чистота сборки, отсечение по форме сигнала
Внешний гамма-фон	$\sim 3.0 \times 10^{-5}$	Многослойная пассивная защита (Pb, Cu)
Фон от $2\nu\beta\beta$ -распада	$\sim 3.0 \times 10^{-5}$	Высокое энергетическое разрешение
Фон от нейтронов	$\sim 1.0 \times 10^{-6}$	Замедлители и поглотители (полиэтилен, бор)
Фон от мюонов	$\sim 1.0 \times 10^{-6}$	Подземное расположение, активное вето
Общий ожидаемый фон	$< 1.0 \times 10^{-4}$	Совместное действие всех методов

11 Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика.

11.1 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. [103], [104], [105] как расширение электродинамики. Привлекательность этой идеи заключается в том, что в силу предполагаемого кинетического смешивания скрытый фотон может проявлять себя как обычный фотон с энергией, равной массе скрытого фотона. Константа χ кинетического смешивания, определяющая вероятность этого процесса, наряду с новым постулируемым полем A' и массой скрытого фотона $m_{\gamma'}$ входит в соответствующий Лагранжиан:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}A'_{\mu}A'^{\mu} \quad (11.1)$$

где $F_{\mu\nu}$ и $F'_{\mu\nu}$ – соответствующие тензоры напряженности поля,

A_{μ} и A'_{μ} – поля фотона и скрытого фотона.

Возможной природе скрытого фотона посвящено много теоретических изысканий. В работах [106] – [107] 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 [108], [109], [110]. Нами разработан 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 [111], здесь мы остановимся на основных моментах. В качестве детектора темных фотонов используется пропорциональный счетчик с достаточно большой поверхностью катода с высоким коэффициентом газового усиления. С помощью такого счетчика измеряется скорость счета одиночных электронов, эмитируемых с поверхности металлического катода при конверсии темных фотонов на его поверхности. Мощность, поглощаемая катодом мультикатодного счетчика, в этом случае может быть описана выражением (здесь было принято $c = 1$)

$$P = 2\alpha^2\chi^2\rho_{CDM}A_{cath} \quad (11.2)$$

где $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle$ – среднее по всей поверхности катода значение $\cos^2 \theta$, θ – угол между вектором электрического поля темных фотонов и нормалью к поверхности катода, ρ_{CDM} – плотность энергии темной материи, которая здесь была принята равной $(0,55 \pm 0,12) \text{ ГэВ/см}^3$ [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

$$P = m_{\gamma'} \cdot R_{MCC} / \eta \quad (11.3)$$

где R_{MCC} – скорость эмиссии одиночных электронов, η – выход одиночных электронов на один фотон, который здесь принят равным выходу для реального фотона с энергией, равной массе скрытого фотона. Объединяя (11.2) и (11.3), получим выражение для чувствительности этого метода:

$$\chi_{\text{sens}} = 2.9 \cdot 10^{-12} \left(\frac{R_{MCC}}{\eta \cdot 1 \text{Hz}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m_{\gamma'}}{1 \text{eV}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.55 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{CDM}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 \text{m}^2}{A_{MCC}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right) \quad (11.4)$$

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 28.1 представлены кривые выхода фотоэлектронов на один фотон по результатам работы [112], 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 11.2 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 являются треки ионизирующих частиц на краях счетчика, которые имитируют оди-

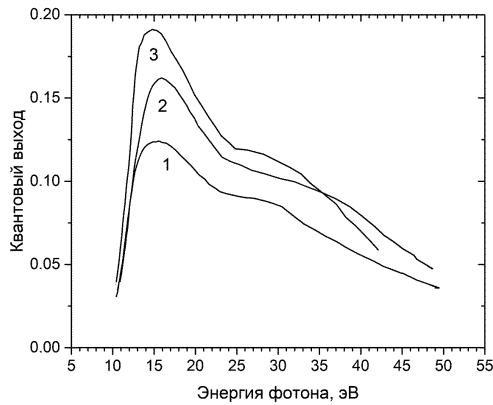


Рисунок 11.1 — Выход фотоэлектронов в зависимости от энергии фотона для разных металлов: сплав Cu (1), Zn (2) и Al + 4% Mg (3)

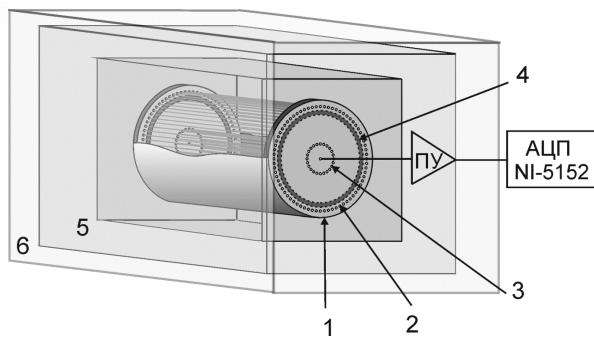


Рисунок 11.2 — Упрощенная схема мультикатодного счетчика: 1 — первый катод, 2 — второй катод, 3 — катод центрального счетчика, 4 — охранный электрод, 5 — защита из борированного полиэтилена, 6 — стальная защита

ночные электроны и электроны термоэмиссии с поверхности катодов. Для вычитания этого фона нами была разработана специальная конструкция счетчика с тремя катодами — мультикатодный счетчик [113]. 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 никромовых 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 никромовых нитей толщиной 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 11.3. 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.

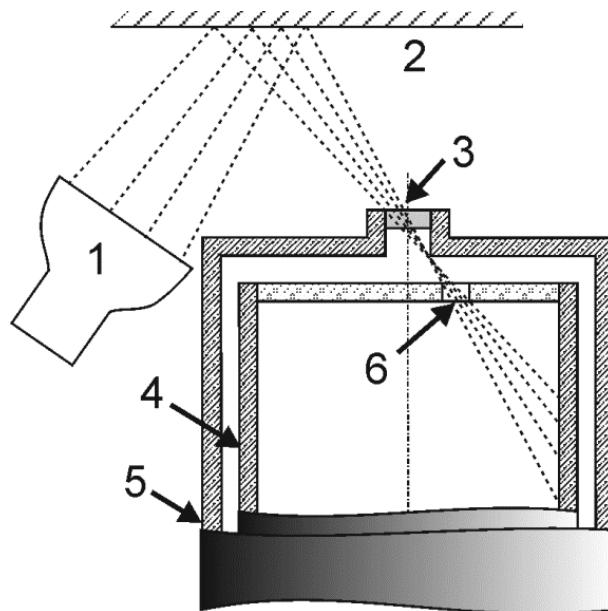


Рисунок 11.3 – Схема облучения катода счетчика ультрафиолетовым излучением при калибровке: 1 – источник УФ-излучения, 2 – алюминиевая фольга, 3 – кварцевое окно, 4 – катод, 5 – корпус детектора, 6 – калибровочное отверстие

На 11.4 показаны два импульса: один – от мюона, пролетевшего через счетчик, и второй – от одиночного электрона.

Из рисунка видно, что для надежного выделения полезных импульсов от одиночных электронов на фоне импульсов от мюонов амплитуда находится путем ап-

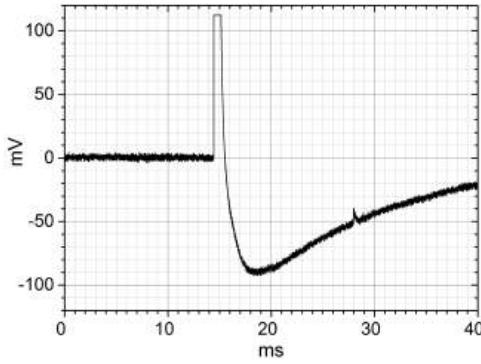


Рисунок 11.4 — Импульсы большой амплитуды от мюона (слева) и малой амплитуды от одиночного электрона (справа)

проксимации 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 11.5 приведен амплитудный спектр импульсов от одиночных электронов. Этот спектр хорошо согласуется с распределением Полиа, которое описывается выражением

$$P(A) = C \left(\frac{A}{\bar{A}} \right)^\theta e^{-(1+\theta) \frac{A}{\bar{A}}} \quad (11.5)$$

где C — нормировочная константа, A — амплитуда импульса, \bar{A} — средняя амплитуда импульса, θ — параметр Полиа. При пороге 5 мВ для амплитуд импульсов менее 50 мВ эффективность счета одиночных электронов составляет примерно 60%.

На 11.6 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.

11.2 Результаты измерений

На 11.7 приведены экспериментальные данные, полученные после обработки в оффлайн 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.

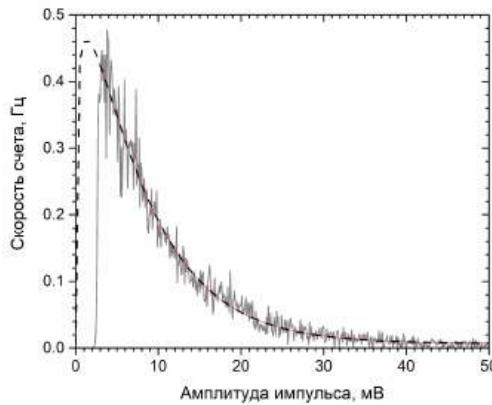


Рисунок 11.5 — Амплитудный спектр одиночных электронов и его аппроксимация по распределению Полиа

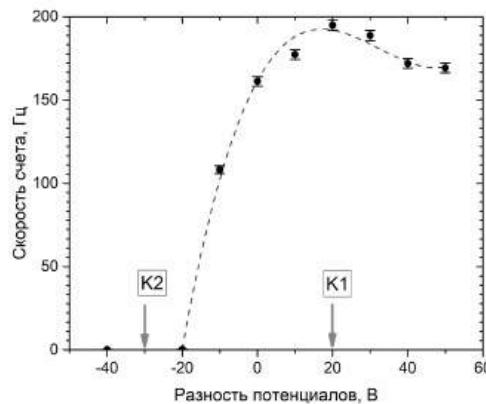


Рисунок 11.6 — Зависимость скорости счета одиночных электронов при калибровке от разности потенциалов между первым и вторым катодами. K1 и K2 — разности потенциалов для конфигураций 1 и 2

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 (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 (11.5) 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].

На 11.8 приведены результаты, полученные в последующих измерениях с большей статистикой: по 871 точкам каждое в интервале 12 ч ночь и день. Верхний

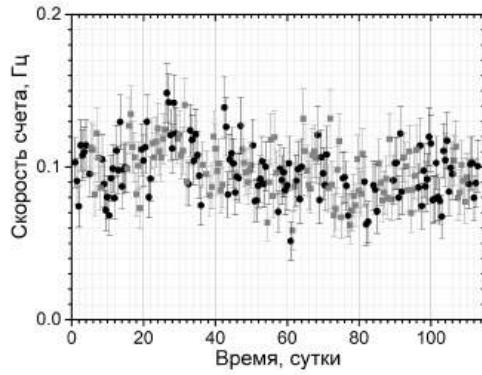


Рисунок 11.7 — Скорости счета, полученные по результатам измерений серии с 200 точками, каждая в интервале 12 ч, темные кружки — конфигурация 1, светлые квадратики — конфигурация 2

предел на константу кинетического смещивания удалось существенно улучшить по результатам этих измерений: $< 3 \times 10^{-12}$, как это представлено 11.9 [116].

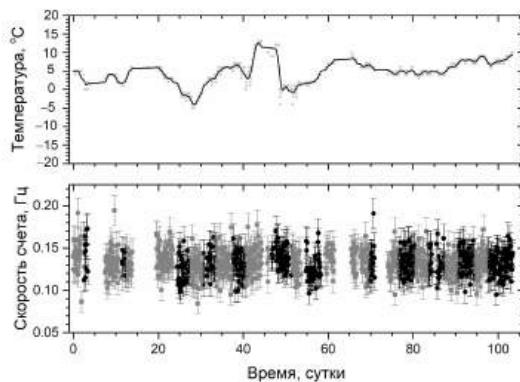


Рисунок 11.8 — Результаты измерений по 871 точкам. Вверху — температура счетчика, внизу — скорости счета (каждая точка соответствует измерению в интервале 12 ч), темные кружки — конфигурация 1, светлые квадратики — конфигурация 2

На 11.10 приведены верхние пределы на константу кинетического смещивания, полученные в разных экспериментах. Видно, что достигнут существенный прогресс при переходе от смеси Ar – CH₄ (10%) к смеси Ne – CH₄ (10%). Считаем важным подчеркнуть еще раз, что в нашем эксперименте мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла, в то время как в других 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.

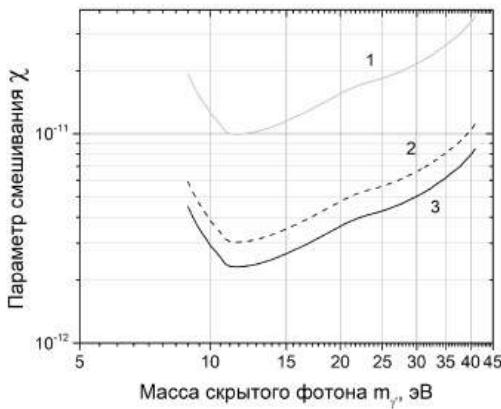


Рисунок 11.9 — Верхние пределы на константу кинетического смешивания, полученные по трем сериям измерений. 1 — счетчик со смесью Ar – CH₄ (10%), 2 — счетчик со смесью Ne + CH₄ (10%) по 200 точкам измерений, 3 — то же, но по 871 точкам измерений

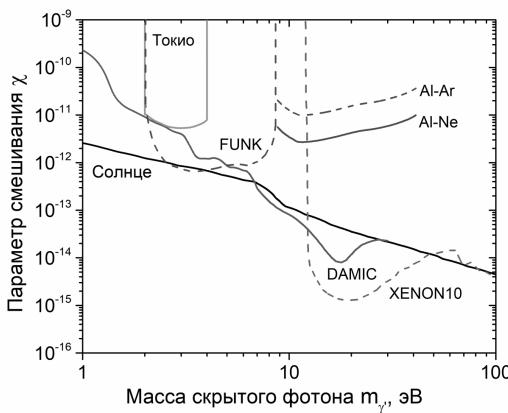


Рисунок 11.10 — Верхние пределы на константу кинетического смешивания, полученные в различных экспериментах

11.3 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 (11.2), если вектор электрического поля направлен вдоль оси счетчика, ожидаемый эффект равен нулю. Если вектор направлен перпендикулярно оси счетчика, ожидаемый эффект максимальен. 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 элек-

тромагнитных 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 [117], [118]. 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 как 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. Открытие суточных вариаций в этом эксперименте стало бы доказательством, что наблюдаемый эффект действительно обязан темным фотонам [117], [118], [119]. Это является уникальной особенностью данного метода. Результат, полученный нами [120] включен в мировую компиляцию данных по свойствам элементарных частиц (Particle Data Group) [116].

В прошлом нами были обработаны результаты измерений первых двух серий из четырех ранов измерений, каждый ран длительностью примерно 50–60 суток. В этом году были получены и обработаны данные третьей серии из четырех ранов измерений, на этот раз помимо счетчика с железным катодом использовался еще счетчик с алюминиевым катодом. В каждой серии измеренные скорости счета одиночных электронов группировались в пределах каждого из двухчасовых интервалов, соответственно, в звездной и солнечной системах координат. Для каждого временного интервала находились средние величины скоростей счета и далее строились временные распределения. На 11.11 представлены данные первой серии для звездной системы координат, на 11.12 соответственно для солнечной системы [121]. На 11.13 представлены данные второй серии для звездной системы координат, на 11.14 соответственно для солнечной системы [122].

Как видно из 11.11 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 флюктуации находится из выражения

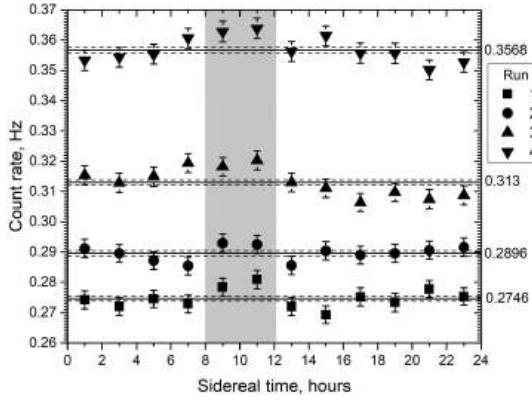


Рисунок 11.11 – Суточные вариации скорости счета одиночных электронов в четырех ранах первой серии измерений в звездной системе координат. Во всех четырех ранах наблюдается избыток в интервале с 8–00 до 12–00 звездных суток.

$$p = 12 \prod_{i=1}^{2n} \left(0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{x_i}{\sqrt{2}} \right) \right) \quad (11.6)$$

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 6σ . Для второй серии измерений $p = 9.1 \times 10^{-6}$, что соответствует достоверности более 4σ . 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 текущем году мы подготовили к работе второй мультикатодный счетчик с алюминиевым катодом и подключили его к измерениям. С конца октября 2024 года по конец июня 2025 года нами проведена третья серия измерений по 4 рана с двумя счетчиками.

Как видно из рисунков 11.15 – 11.18 в третьей серии не наблюдался избыток ни в звездных, ни в солнечных сутках в обоих детекторах, что доказывает, что избыток, наблюдавшийся в первых двух сериях, нельзя объяснить чисто инструментальным эффектом [123]. Данные, полученные в третьей серии, показывают, что выбранный нами критерий (наблюдение избытка во всех четырех ранах в одном и том же временном интервале в звездной системе и его отсутствие в солнечной системе) является действительно сильным, тем самым подтверждается надежность выбранной методики. Результаты трех серий согласуются с гипотезой о пространственной

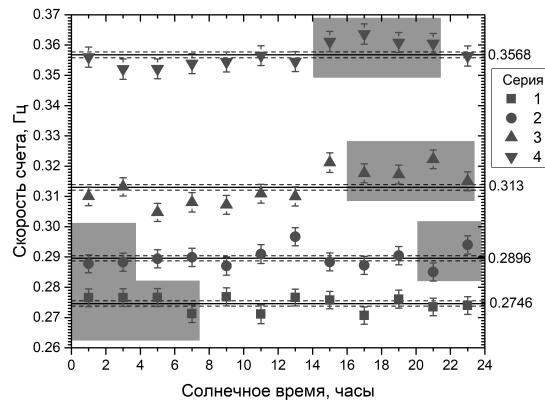


Рисунок 11.12 — Суточные вариации скорости счета одиночных электронов в четырех ранах первой серии измерений в солнечной системе координат. Серым цветом для каждой серии измерений обозначены временные зоны, которые дали вклад соответственно для каждой серии во временной интервал с 8–00 до 12–00 звездных суток, представленный на рисунке 11.11.

«грануляции» темной материи, приводящей к эпизодическому появлению предсказанного направленного сигнала по мере движения Солнца в Галактике. Различие во времени избытка между первой и второй сериями также поддерживает эту идею. Для подтверждения или опровержения данной гипотезы необходимо продолжать измерения.

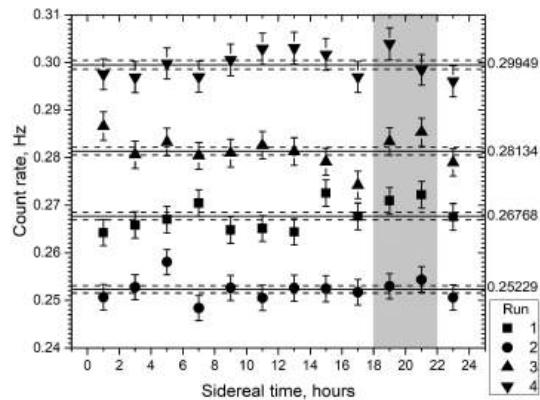


Рисунок 11.13 — . Суточные вариации скорости счета одиночных электронов в четырех ранах второй серии измерений в звездной системе координат. Во всех четырех ранах наблюдается во временном интервале с 18–00 до 22–00 звездных суток.

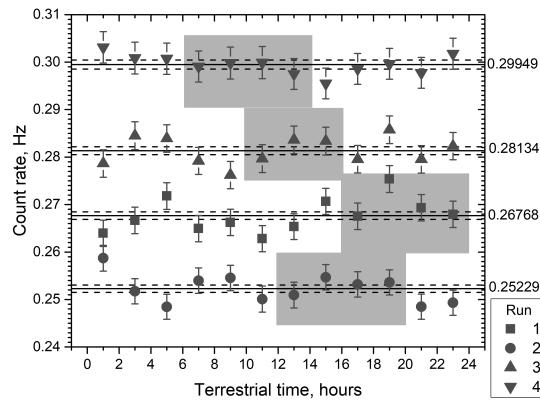


Рисунок 11.14 — Суточные вариации скорости счета одиночных электронов в четырех ранах второй серии измерений в солнечной системе координат. Серым цветом для каждой серии измерений обозначены временные зоны, которые дали вклад соответственно для каждой серии во временной интервал с 18–00 до 22–00 звездных суток, представленный на рисунке 11.13

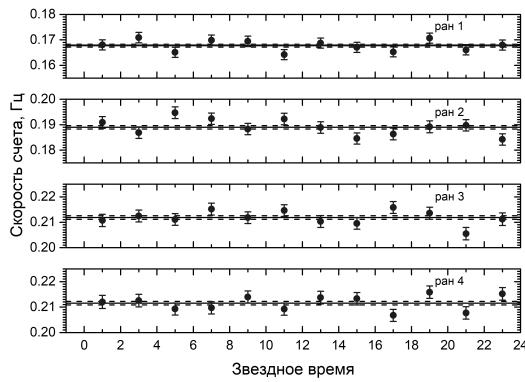


Рисунок 11.15 – Скорости счета в звездных сутках для счетчика с железным катодом

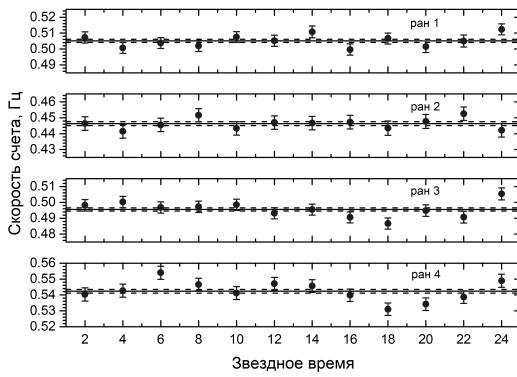


Рисунок 11.16 – Скорости счета в звездных сутках для счетчика с алюминиевым катодом

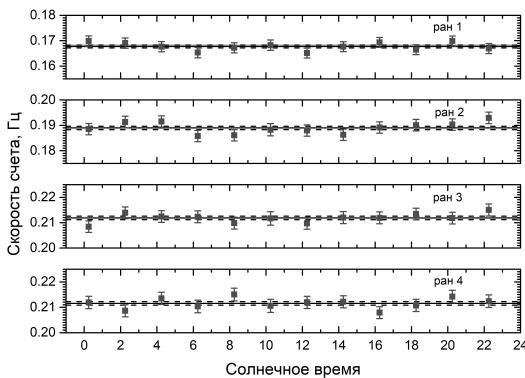


Рисунок 11.17 – Скорости счета в солнечных сутках для счетчика с железным катодом

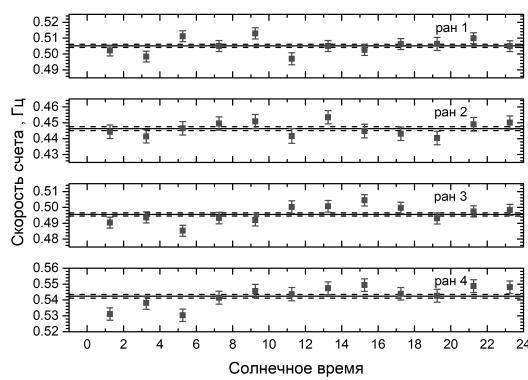


Рисунок 11.18 — Скорости счета в солнечных сутках для счетчика с алюминиевым катодом

12 Получение новых ограничений на легкую темную материю в эксперименте NA64

12.1 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. 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 ежеквартальном контролем со стороны официальных рецензентов проекта в ЦЕРН.

Ожидаемая чувствительность установки NA64 в 2025 гг. составила величину примерно вдвое выше, чем ранее достигнутая. Дальнейшие планы следующего этапа эксперимента в 2026 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 [124, 125, 126, 127, 128].

12.2 Проведение сеансов набора данных на электронном и мюонном пучке, для исследование возможности объяснения (g-2) мюонной аномалии за счет вклада новых частиц

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 Н4, установка NA64e), а другая - под измерения и поиски на мюонном пучке (канал М2, установка NA64 μ). На этих пучках, начиная с 2022 г., были успешно проведены тесты отдельных детекторов и модернизированных установок NA64e и NA64 μ в целом и затем начаты первые из-

мерения 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. Например, для объяснения мюонной ($g-2$) аномалии.

12.2.1 Результаты тестирования вето-калориметра VHCAL

Результаты тестирования прототипа VHCAL, анализ данных и сравнение с результатами моделирования были опубликованы в журнале NIM A [129]. VHCAL является частью модернизированной установки NA64, которая должна повысить ее чувствительность. Первый прототип VHCAL был установлен в нижней части экспериментальной установки в 2023 году (рисунок 12.1). Предполагалось, что детектор, изготовленный из слоев Cu-Sc, станет эффективным средством защиты от электробразования адронов с большими углами или фотоядерных взаимодействий, снижая фон от вторичных частиц, выходящих за пределы чувствительной части детектора. События со вторичными адронами, возникающие перед прототипом VHCAL, как показано на рисунке 12.2, характеризуются адронными ливнями как в VHCAL, так и в HCAL. Ожидается, что регистрация энергии будет происходить в основном в центральных ячейках VHCAL, в то время как в модуле HCAL она происходит во внешних ячейках. С помощью собранной статистики $4,4 \times 10^{11}$ электронов на ми-

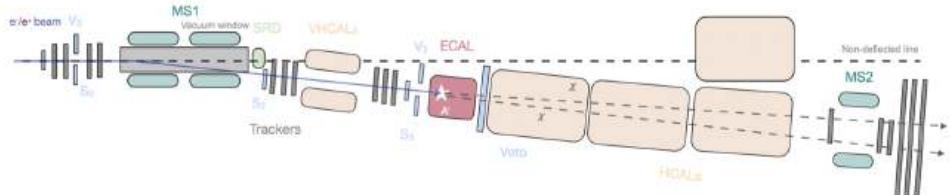


Рисунок 12.1 — Схема установки NA64 в 2023-24 гг. на электронном пучке канала H4

шени (ЕОТ) была продемонстрирована эффективность этого подхода, при этом фон уменьшился более чем на порядок. Эти данные были необходимы для подтверждения того, что МК-моделирование процессов на установке NA64 надежно воспроизводит электророждение адронов с большими углами или фотоядерные взаимодействия, и, следовательно, может быть использовано для надежного прогнозирования ожидаемого фона. Отличное соответствие экспериментальных и модельных данных позволило оптимизировать VHCAL. Результаты для трех различных конфигураций, показанных на рисунке 12.3, проиллюстрированы на рисунке 12.4: одна конфигурация без

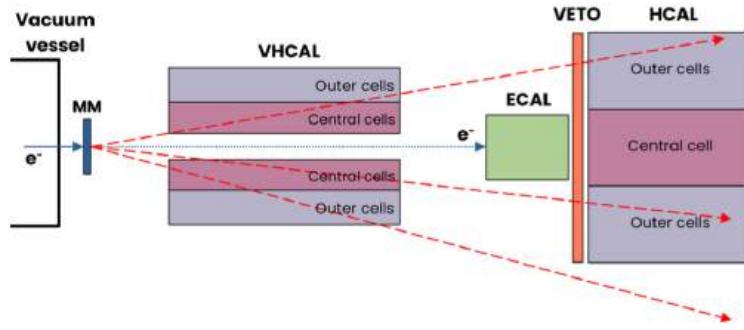


Рисунок 12.2 – Схема события с электророждением адронов в трекере MM, расположеннном между вакуумным резервуаром и VHCAL

VHCAL, вторая - с реалистичным прототипом VHCAL в том виде, в каком он был установлен в 2023 году, и третья - с полномасштабным VHCAL, охватывающим область ниже по пучку. В третьем случае размеры более крупного VHCAL составляют приблизительно $1000 \times 1000 \times 2000$ мм³, что удваивает длину каждой стороны и включает слои между трекерами, чтобы охватить всю нижележащую область. Такая конфигурация может быть достигнута за счет размещения датчиков внутри калориметра или размещения нескольких более коротких модулей между датчиками, что позволяет сохранить качество реконструкции трека. Как и ожидалось, установка без VHCAL не обеспечивает необходимого низкого фона. С другой стороны, как видно, существует значительный потенциал для подавления фона в случае полномасштабного VHCAL, который позволяет снизить ожидаемый фон электророждения адронов, по крайней мере, на порядок. Хвосты в спектрах ECAL, как видно из рисунка 12.4, отклоняются от экспоненциального поведения, так что вариант с одним VHCAL и повышенным порогом ECAL на 60 ГэВ не является оптимальным для максимизации чувствительности. Поэтому на основе анализа данных за 2025 год, объединенных с данными за 2023-2024, будет получена улучшенная фоновая модель для разработки полномасштабного, оптимизированного VHCAL, который продолжит работать во время четвертого запуска LHC, когда ожидается набрать 10^{13} EOT.

12.3 Результаты сеансов 2025 года

В апреле-июне 2025 года был проведен восьминедельный сеанс набора данных. Предварительные результаты анализа, проведенного ранее, послужили основанием для дальнейшей оптимизации установки за счет включения второго вето-калориметра VHCAL (рисунок 12.5). Кроме того, все детекторы на базе ФЭУ (калориметры, SRD-датчики и триггерные сцинтилляционные счетчики) были оснащены новым цифровым преобразователем faster waveboard для более быстрого считывания их сиг-

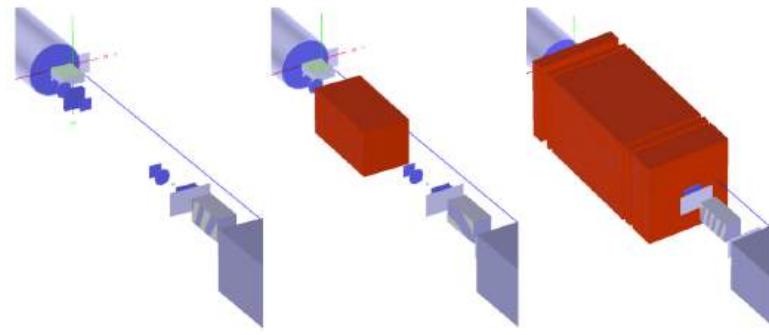


Рисунок 12.3 – Три варианта смоделированной геометрии установки: без вето-калориметра (слева), с одним модулем (в центре) и с полномасштабным вето-калориметром VHCAL (справа)

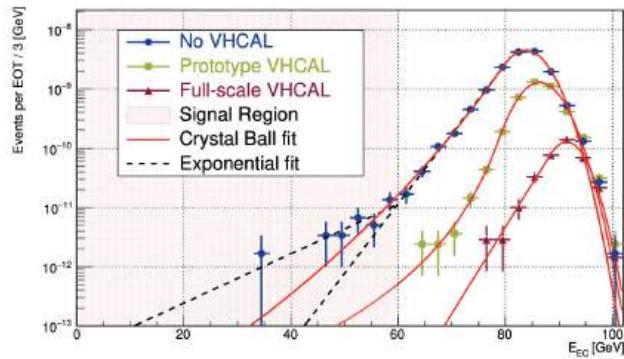


Рисунок 12.4 – Спектр событий в калориметре ECAL с энергией $E_{HC} < 1,5$ для трех вариантов смоделированной геометрии установки

налов. Наконец, во время этого сеанса был использован новый SRD-детектор на основе кристаллов LYSO для повышения чувствительности к более низким энергиям. Ввод в эксплуатацию и калибровка детекторов, настройка пучка и триггера заня-

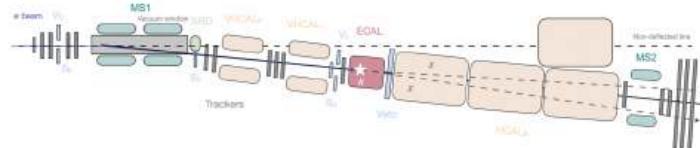


Рисунок 12.5 – Схема установки NA64 в сеансе 2025 года для поиска распад $A' \rightarrow \text{invisible}$ на электронном пуске канала H4

ли около десяти дней. Усовершенствованная оптика луча увеличила эффективность телескопа на 5% по сравнению с предыдущими годами (совпадение всех сцинтилляционных счетчиков составило 73%) и снижению частоты появления гало с 5% до 1%. В процессе последующего полуторамесечного набора данных было накоплено $5,9 \times 10^{11}$ электронов на мишени. Сводная информация о количестве сбросов пучка, накоплен-

ных за время сеанса, приведена на рисунке 12.6. Затем в течение недели пучок был переключен на позитроны с энергией 40 и 45 ГэВ, чтобы продемонстрировать возможность сканирования при различных начальных энергиях и оценки фона при более низких энергиях [130]. Общая собранная статистика составила $3,24 \times 10^9$ ($6,39 \times 10^9$) позитронов при энергии 45 ГэВ (40 ГэВ).

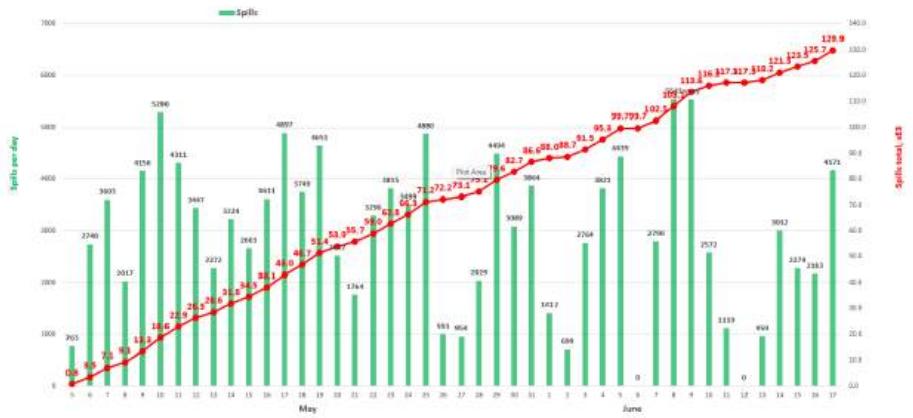


Рисунок 12.6 — Количество сбросов пучка по дням в сеансе 2025 года на электронном пучке канала H4

12.3.1 Предварительные результаты поиска распада $A' \rightarrow invisible$ с использованием электронов

Как и в предыдущих сеансах, целью сеанса 2025 года было увеличить статистику набора электронов на мишени при поиске распада $A' \rightarrow invisible$. Другой важной целью эксперимента 2025 года было изучение повышения уровня герметичности детектора и подавления фонового излучения путем установки дополнительного, второго модуля VHCAL, идентичного тому, который использовался в эксперименте 2023 года, и сравнение результатов с подробным МК-моделированием. Установка 2025 года, показанная на рисунке 12.5, в целом была аналогична той, которая использовалась в сеансах 2023-2024 годов. Помимо добавления второго модуля VHCAL, другими основными отличиями были использование нового SRD-детектора на основе кристаллов LYSO и новой электроники считывания. Второй модуль VHCAL1 был установлен сразу после первого, VHCAL0, для улучшения качества детектирования вторичных адронов. Предварительные результаты исследования были получены с помощью быстрого анализа данных с использованием критерии отбора, аналогичных критериям для исследования 2023 года, но без использования информации о трекере из-за ограниченного количества времени для анализа данных после завершения сеанса 2025 года. Предварительные результаты, показанные на рисунке 12.7, иллю-

стрируют сравнение распределений событий в плоскости ($E_{ECAL}; E_{HCAL}$), полученных после применения различных критериев отбора (указаны сверху рисунков). Как видно из рисунка 12.7, количество фоновых событий в области $E_{EC} \geq 60$, близкой к сигнальному окну, сильно зависит от количества модулей VHCAL, используемых при выборе события, и что в случае двух модулей VHCAL фоновый хвост значительно уменьшается по сравнению с вариантами без модуля и с одним модулем. Это также видно из рисунка 12.8, на котором представлено сравнение количества событий в спектрах ECAL и экстраполяции их распределения на область сигнала $E_{ECAL} \geq 60$. Такое поведение находится в качественном согласии с тем, что ожидалось при МК-моделировании, как показано на рисунке 12.8. Количественное сравнение будет продолжено путем уточнения анализа данных за 2025 год. В заключение можно сказать, что предварительные результаты сеанса 2025 года свидетельствуют о нашем правильном понимании основной природы фоновых событий в эксперименте. В сочетании с подробным моделированием и анализом выборки данных за 2023 год, это предварительное исследование показывает, что в сеансах после долгосрочной остановки LS3 установка NA64 может приблизиться к уровню фона, близкому к нулю.

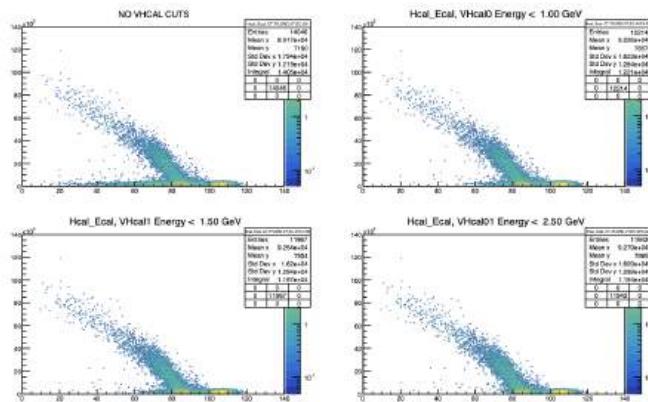


Рисунок 12.7 — Сравнение распределений событий в плоскости ($E_{ECAL}; E_{HCAL}$), полученных из данных 2025 года (наборы 12900-941), для разных критериев отбора (указаны сверху)

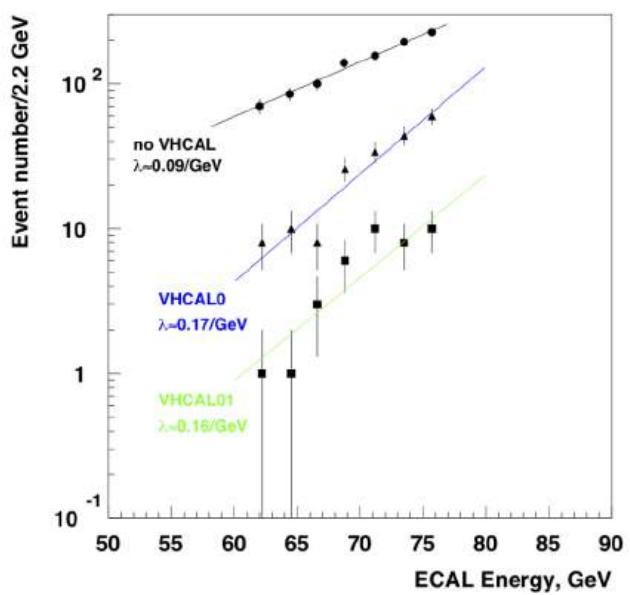


Рисунок 12.8 — Сравнение спектров ECAL в области $E_{ECAL} \leq 60$, полученных из распределений событий в плоскости $(E_{ECAL}; E_{HCAL})$

13 Усовершенствование математического аппарата многопетлевых вычислений в квантовой теории поля, и предложение представления ренорм-инвариантных величин в виде ряда теории возмущений. Альтернативный подход к перенормировкам в КТП

В работе [131] нами были исследованы неперенормируемые теории и применение метода КС к ним. Для этих целей нами сперва было получено обобщенное уравнение КС, которое формулируется для эффективного действия. Это уравнение объединяет все уравнения КС, т. е. порождает все необходимые дифференциальные уравнения для нахождения поправок к эффективному действию, эффективному потенциалу и также для любых корреляционных функций в любом порядке теории возмущений по \hbar . Данное уравнение позволяет исследовать любые массивные перенормируемые и неперенормируемые теории [132]. Исследования в части перенормируемых теорий изложены в работах [11], [12], [13]. А чтобы проиллюстрировать, как обобщенное уравнение КС работает в случае неперенормируемых теорий, мы выбрали конкретную достаточно простую неперенормируемую модель с взаимодействиями $\lambda\phi^4 + \frac{\phi^6}{M^2}$. Используя уравнение КС, мы сперва выписали в одной петле все необходимые дифференциальные уравнения для получения поправки к эффективному потенциалу, а также и уравнения для различных (2-, 4-, и 6-точечных) корреляционных функций; далее, решая эти уравнения, мы нашли однопетлевые поправки к этим величинам. Были также определены аномальные размерности и бета-функции в выбранной теории. По ходу вычислений мы нигде не сталкиваемся с какими-либо расходимостями. Кроме того, важно отметить, что поправки к массе скаляра m^2 не содержат вкладов, пропорциональных M^2 , что свидетельствует об отсутствии проблемы fine-tuning и проблемы иерархии в данном методе, что и отличает его от классических подходов к перенормировкам.

Кроме того, ранее в работах [11], [12], [13] и работе [131] уравнения Каллана-Симанчика были написаны на языке голых величин: поля, массы и т.д. Интересно получить эти уравнения на полностью перенормированном языке, посмотреть, что в них изменится. Оказывается, что форма уравнений остается точно такой же, но теперь в уравнения КС входят только перенормированные величины. Далее подробно обсуждается, как именно такой подход связан со стандартным ренорм групповым уравнением. Раз уравнения КС были получены на полностью перенормированном языке, то далее в такой формулировке было показано, что уравнения КС полностью эквивалентны стандартному уравнению ренорм группы, но в схеме перенормировки массы на массовой оболочке. Все это было сделано в работе [17].

14 Получение ограничений на параметры моделей ранней Вселенной из сравнения предсказаний с современными наблюдательными данными. Первичные негауссровости в модели ранней Вселенной со сжатием.

В работе [16] мы изучили негауссровость в новом несингулярном космологическом сценарии, предложенном в [133]. Эта космологическая модель представляет большой интерес из-за нескольких факторов. Прежде всего, она предлагает жизнеспособную альтернативу инфляции – сценарий сжатия Вселенной (с возможным последующим отскоком) с сильной гравитацией в прошлом. Этот сценарий построен в случае гравитации Хорндейки с членами G_2, G_3, G_4 , которые зависят от скалярного поля и его кинетического члена. Также сценарий [133] предсказывает правильные значения для r -отношения (отношение скалярной и тензорной амплитуд), наклона спектра n_S и амплитуды скалярных возмущений. Таким образом, выбранная модель полностью согласуется с современными экспериментальными данными, смотреть [23], [24]. Из недостатков модели можно назвать малое значение r -отношения за счет достаточно малой скорости звука у скалярных возмущений. Это может быть сигналом о том, что данная модель содержит такие негауссровости, которые несовместимы с экспериментальными ограничениями. Так, в работе [16] мы исследуем этот вопрос. Было обнаружено, что возможно удовлетворить ограничениям по каждому из параметров негауссровости для отдельно взятой конфигурации импульсов, выбрав соответствующие параметры модели. Допустимые значения основного параметра модели имеют узкий регион значений. Таким образом, сценарий отскока из [133] может дать правильное значение для всех типов f_{NL} (то есть для различных конфигураций импульсов) одновременно. В дальнейшем интересно также скоррелировать форму биспектра с данными Planck/BICEP/Keck [23], [24]. Это и даст окончательный ответ на вопрос о том, может ли сценарий сжимающейся Вселенной [133] с сильной гравитацией в прошлом быть жизнеспособным кандидатом в качестве альтернативы или дополнения к инфляции, либо же этот сценарий придется считать закрытым.

15 Исследование модели двух массивных скалярных полей с разными скоростями звука.

Было проведено исследование теории, которая включает в себя несколько (конкретно было рассмотрено два) скалярных действительных полей с нестандартным дисперсионным соотношением методами аналитичности и унитарности. А именно, были рассмотрены два массивных скалярных поля, у которых также есть не нулевые и не равные единице и различные для обоих полей скорости звука. Кроме того, в лагранжиан такой теории было добавлено самодействие полей типа $\langle\phi_1^4 + \phi_2^4\rangle$ и член взаимодействия этих полей $\langle\phi_1^2 * \phi_2^2\rangle$. (A) Первое, что было получено для такой теории — это обобщение оптической теоремы (или соотношения унитарности). Оптическая теорема как обычно была получена из принципа сохранения полной вероятности, что в свою очередь приводит к унитарности S-матрицы. Так, теперь (в указанной выше теории) в оптическую теорему непосредственно входят как скорости звука рассматриваемых полей, так и дисперсионное соотношение. Последнее связывает 3-импульс, энергию, скорость звука и массу скалярного поля. Под энергией и импульсом здесь подразумевается энергия и импульс системы центра масс, так как все кинематические вычисления проводятся как раз в данной системе. Кроме того, все вычисления проводятся в терминах так называемых парциальных амплитуд, поскольку именно в таких обозначениях оптическая теорема имеет наиболее простой вид. Были рассмотрены две возможности: 1) в промежуточном состоянии (для процессов рассеяния «2 в 2») есть различимые частицы (например, одно возмущение, соответствующее полю ϕ_1 и одно возмущение от поля ϕ_2 — такой случай действительно возможен в указанной теории с указанным взаимодействием); 2) в промежуточном состоянии частицы неразличимы. Нормировочный коэффициент в этих двух случаях отличается в два раза, что отлично сходится с известными ответами для безмассового случая или для случая единичных скоростей звука. Располагая модифицированной оптической теоремой, далее было получено такое соотношение, как унитарное ограничение, то есть ограничение на действительную часть парциальной амплитуды рассеяния. В низшем порядке по константам взаимодействия полученная оптическая теорема была проверена на примере конкретной выбранной теории. А именно, по отдельности были получены древесные амплитуды (входят в квадрате в правую часть соотношения унитарности), а также мнимая часть однопетлевых матричных элементов. Такое вычисление показало, что полученная формула для оптической теоремы правильная, все соответствующие коэффициенты в ходе проверки были получены и они полностью согласуются (а вернее — совпадают) с коэффициентами из оптической теоремы. Касательно унитарного ограничения следует сказать, что такие ограничения оказываются весьма полезными при анализе теории на ее применимость в той

или иной задаче. Так, подобные ограничения можно использовать, например, в космологических моделях для того, чтобы понять, а применима ли выбранная модель на указанных временах/энергетических масштабах или нет (проблема сильной связи)? Свое применение как модифицированная оптическая теорема, так и унитарное ограничение могут найти и в других областях современной физики (физика конденсированных сред, процессы с нарушением лоренц-инвариантности, магнитные поля в астрофизике и другие). Следует в заключении также сказать, что в предельных случаях (безмассовый и/или скорости звука равны нулю) полученные результаты сводятся к известным в литературе ответам. (Б) Помимо полученной оптической теоремы и ограничений далее была исследована перенормировка указанной теории с несколькими массивными полями и нетривиальными скоростями звука. Так, для этого методом фонового поля был получен однопетлевой эффективный потенциал и бета-функции для соответствующих констант связи (все также в одной петле).

16 Построение моделей ранней Вселенной, альтернативных инфляционным, с модифицированным гравитационным сектором Хорндески. Возмущения над сферически-симметричным фоном в скалярно-тензорных теориях.

В кубическом подклассе теории Хорндески в работе используется подход DPSV, позволяющий исключить возмущения метрики и получить эффективное квадратичное действие для скалярной моды над общим динамическим сферически-симметричным фоном. Коэффициенты кинетической матрицы $K_{00}, K_{rr}, K_{\Omega}, K_{tr}$ определяют дисперсионное соотношение и приводят к необходимым условиям устойчивости на больших импульсах: $K_{00} > 0, K_{\Omega} \geq 0$ и $K_{rr} \geq -(K_{tr})^2/(4K_{00})$, а также к анизотропным скоростям распространения в радиальном и угловом направлениях. На основе этих условий проводится обобщение известных статических и космологических запрещающих теорем для динамических, сферически-симметричных фоновых решений со слабой зависимостью либо от времени, либо от радиуса, а затем и на конфигурации, которые могут быть сведены к такому режиму с помощью подходящих координатных преобразований. Тем самым показывается, что асимптотически плоские компактные объекты или космологические решения в кубическом подклассе, как правило, несовместимы с полной устойчивостью, независимо от наличия или отсутствия сингулярностей в решении.

Для расширенной теории Хорндески рассматриваются аксиальные (нечётные) возмущения над зависящим от времени сферически-симметричным фоном общего вида. Используя разложение Редже–Уилера и метод множителя Лагранжа, удаётся выделить одну динамическую степень свободы и получить соответствующее квадратичное действие. Полученное квадратичное действие выражается через некоторые комбинации функций лагранжиана F, G, H, J , из которых выводятся простые условия отсутствия духовых и радиальных/угловых градиентных неустойчивостей: $F > 0, G > -(B/A)J^2F, H > 0$, а также явные выражения для скоростей распространений в радиальном и угловом направлении. Наложение стандартных, совместимых с GW170817, соотношений на функции в лагранжиане теории $G_5 = 0, F_4 = G_{4X}/(2X)$ обеспечивает совпадение этих скоростей со скоростью света над произвольными зависящими от времени сферически-симметричными фонами; предварительный анализ полярных (чётных) мод показывает, что одна из чётных мод имеет ту же радиальную скорость, что и аксиальная гравитационная мода.

Кроме этого, были исследованы скалярно-векторно-тензорные теории, возни-кающие при компактификации Калузы–Клейна пятимерной теории Хорндески, где скалярное поле, калибровочный $U(1)$ -вектор и дилатон взаимодействуют через производные, но соответствующие уравнения поля являются уравнениями второго поряд-

ка. Анализируются аксиальные возмущения метрики и векторного поля над общим зависящим от времени сферически-симметричным фоном, что приводит к связанным главным переменным для спин-2 и спин-1 секторов и к квадратичному действию с кинетической структурой, описываемой некоторыми комбинациями функций лагранжиана F, G, H и Z . Условия высокоэнергетической устойчивости совпадают с условиями в чистых теориях за пределами Хорндески: $F > 0, Z > 0, H > 0$. Выведенные дисперсионные соотношения показывают, что гравитационные и электромагнитные волны имеют одинаковые (в общем случае не равные единице) скорости распространения как в радиальном, так и в угловом направлении для произвольных потенциалов $G_4(\pi, X)$ и $G_5(\pi)$, без необходимости тонкой подстройки параметров модели.

В совокупности описанные три исследования формируют целостную картину: кубический подкласс теории Хорндески оказывается жёстко ограничен обобщёнными запрещающими теоремами для несингулярных асимптотически плоских решений, тогда как расширенные теории Хорндески и полученные компактификацией скалярно-векторно-тензорные модели потенциальными допускают динамически устойчивые, зависящие от времени сферически-симметричные фоны, совместимые с текущими наблюдательными ограничениями на скорость гравитационных волн — либо за счёт строгого светового распространения, либо за счёт синхронного изменения скоростей фотона и гравитона.

17 Скалярно-векторно-тензорные теории со старшими производными в действии.

Идея Калуцы для компактификации из пяти измерений в четыре позволила объединить общую теорию относительности и электромагнетизм. Иными словами, действие для $U(1)$ калибровочного векторного поля (теория Максвелла) получается при размерной редукции действия Гильберта-Эйнштейна. Применение размерной редукции для модифицированной теории гравитации позволяет получить модифицированную теорию векторного поля. Так, если пятимерная теория была теорией Хорндески, в которой помимо метрики есть скалярная степень свободы (скалярно-тензорная теория), то при редукции получается скалярно-векторно-тензорная теория. Более того, поскольку вектор при компактификации приходит из компонент пятимерной метрики, оказывается, что его вершины в лагранжиане и, соответственно, свойства очень похожи на свойства метрических степеней свободы. В частности, оказалось, что в довольно широком классе лагранжианов Хорндески скорости векторных и тензорных мод совпадают. То есть они равны друг другу, но не равны, вообще говоря, единице (скорость конформного поля или лоренцевский конус). Это свойство оказалось очень интересным в контексте наблюдения гравитационных волн одновременно с электромагнитным сигналом (событие GW170817) и постановки ограничений на разность их скоростей. Аналогичным образом, процедура компактификации была проведена и для расширенной теории Хорндески, и для общей вырожденной скалярно-тензорной теории; и во всех случаях получилось расширить пространство свободных функций теории при условии равенства векторной и тензорной скорости. Более общий класс теорий Хорндески со световыми гравитонами начал, в частности, включать в себя модели с селфтьюнингом - модели, решающие проблему космологической постоянной. Кроме того, в новых скалярно-векторно-тензорных теориях дополнительно удалось удовлетворить ограничениям на распад гравитона - условию малости кубического взаимодействия гравитона со скалярами.

В продолжении работы над скалярно-векторно-тензорными теориями была исследована возможность обобщить полученные с помощью редукции теории еще больше. Были выписаны всевозможные вершины взаимодействия и наложены условия сокращения старших производных в уравнениях движения. Как и ранее, в полученной теории был найден подкласс, удовлетворяющий условию равенства скоростей гравитации и векторного поля. На данный момент это максимально общий класс теорий, который удовлетворяет простейшим феноменологическим ограничениям в космологии современной Вселенной.

18 Проверка моделей с лёгкими гипотетическими частицами на действующих планируемых установках с фиксированной мишенью. Учёт вкладов ЭФ Паули в рождение тёмных фотонов в процессе неупругого тормозного излучения

Во время работы над проектом мы обнаружили, что в работе [34] при расчёте матричного элемента неупругого тормозного излучения протона $pp \rightarrow \gamma'X$ была учтёна только часть вершины $pp\gamma'$, связанная с вкладом ЭФ Дирака. В связи с этим для уточнения сечения рождения тёмного фотона была рассмотрена поправка к матричному элементу, пропорциональная ЭФ Паули. В квазиреальном приближении были получены две новые функции расщепления, отвечающие слагаемому с квадратом ЭФ Паули и интерференционному слагаемому [134].

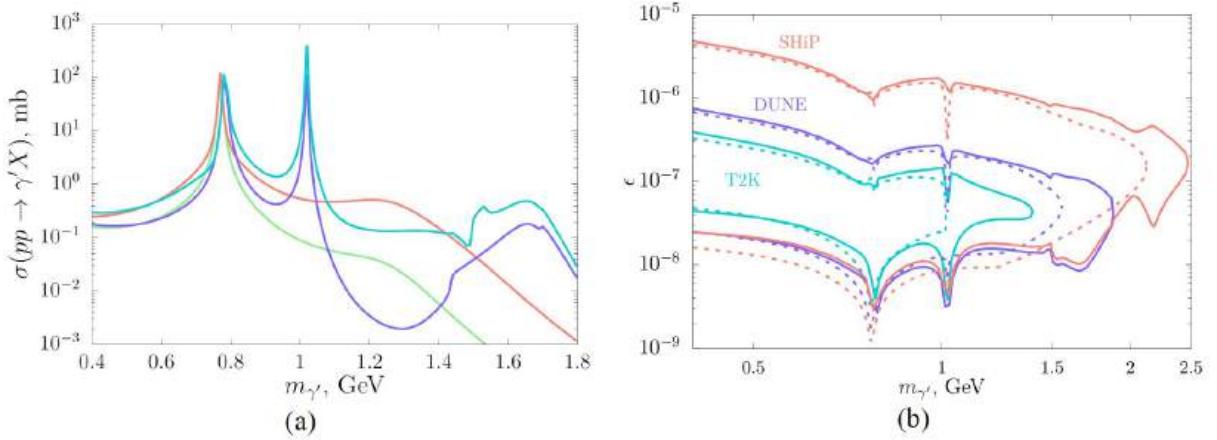


Рисунок 18.1 – а) Зависимость полного сечения неупругого тормозного излучения от массы тёмного фотона. б) Кривые чувствительности экспериментов T2K, DUNE и SHiP к видимым распадам тёмных фотонов.

Также были проведены численные оценки величины полного сечения. Для этого были использованы два фита ЭФ протона: консервативный [135] и обновлённый [136]. Значения ЭФ брались в нефизической времениподобной области, соответствующей квадрату массы тёмного фотона. На рис. 18.1 а зелёной и фиолетовой линиями изображены полные сечения неупругого тормозного излучения протона в зависимости от массы тёмного фотона, вычисленные с использованием только ЭФ Дирака [34] по консервативному и обновленному фитам соответственно. Красная и синяя линии представляют результаты данного проекта, учитывающие вклады обоих ЭФ по тем же фитам.

Кроме того, были обновлены кривые чувствительности экспериментов T2K, DUNE и SHiP к видимым распадам тёмных фотонов массой 0.4–1.8 ГэВ на 95% уровне достоверности, представленные на рис. 18.1 б сплошными линиями [137]. Пунктиром там же показаны чувствительности, полученные при рассмотрении только вклада ЭФ Дирака. Видно, что учёт вклада ЭФ Паули заметно изменяет контуры

потенциально исключаемых областей, что подчеркивает важность полученных по-
правок.

19 Численный анализ таяния доменных стенок и образования ими гравитационных волн

Для численных вычислений нелинейно эволюции скалярного поля в расширяющейся Вселенной был использован компьютерный код *CosmoLattice*. В него была включена ранее исследовавшаяся в работах сотрудников ТО модель скалярного поля с обратным фазовым переходом за счёт специфического слабого взаимодействия с частицами плазмы. Для проверки результатов проводились вычисления на решётках различных размеров, с различными начальными конфигурациями скалярных полей, а также с различными величинами шага решётки. Изучалась эволюция массового состава доменных стенок и строились спектры образуемых ими гравитационных волн. Особый интерес представлял инфракрасный хвост спектра, отсчитываемый от максимальной частоты, определяемой темпом расширения Вселенной в эпоху образования стенок.

20 Изучение образования и аннигиляции доменных стенок в моделях со слабо нарушенной дискретной симметрией

Для численных расчётов в работе [38] была выбрана простейшая модель с потенциалом четвёртого порядка по полю в виде двух симметричных ям, к которому было добавлено кубичное по полю слагаемое. Это привело к снятию вырождения между двумя вакуумами. В результат образующиеся доменные стенки в конце концов разрушались: во Вселенной побеждал вакуум с низким уровнем энергии. Время существования стенок зависит от степени вырождения. Теоретически ожидание указывало на то, что оно зависит как квадратный корень из относительной величины вырождения. Мы проводили вычисления для разных величин этого параметра, определяли время жизни конфигураций типа доменных стенок, а также строили спектры образуемых ими гравитационных волн.

21 Построение моделей рождения и распространения излучения, согласующихся с результатами астрофизических экспериментов. Поиск фотонной линии от аннигиляции тёмной материи с массой кэВ-диапазоне с помощью NuSTAR: ограничения на $\langle\sigma v\rangle$ по итогам 11 лет наблюдений

В данной работе выполнен поиск сигнатур аннигилирующей темной материи кэВного-масштаба по данным космической рентгеновской обсерватории NuSTAR за 11 лет работы. В работе использован полный архив миссии (2012 - 2024 гг.) с отбором наблюдений, свободных от ярких источников и вкладов Галактического излучения ($|b| > 3^\circ$), а также с дополнительной фильтрацией по фону. После процедур очистки и маскирования фокусированных источников получена совокупная выборка более чем из 5200 наблюдений, суммарная эффективная экспозиция которой составляет около 234 Mc при очень хорошем покрытии на средних и высоких галактических широтах. На основе этих данных построен усредненный спектр рассеянного рентгеновского излучения в диапазоне 3 - 20 кэВ. Спектр описан двухкомпонентной моделью астрофизического фона: вкладом космического рентгеновского фона с экспоненциальным вкладом и добавочной степенной компонентой, соответствующей рассеянному солнечному излучению. Проведен поиск узких монохроматических компонент, описываемых гауссовым профилем с шириной, соответствующей доплеровскому уширению для типичных скоростей частиц тёмной материи в гало. Статистически значимых отклонений от гладкой фоновой модели не обнаружено. Это позволило установить верхние пределы (95% доверительный интервал) на сечение s-волновой аннигиляции $\langle\sigma v\rangle$ в функцию от массы тёмной материи в диапазоне $\sim 3 - 20$ кэВ для набора различных распределений плотности темной материи в нашей галактике. Полученные ограничения достигают уровня порядка $10^{-33} - 10^{-34} \text{ cm}^3/\text{s}$ и являются на сегодняшний день наиболее строгими в рентгеновском диапазоне и дополняют результаты, полученные ранее по данным SRG/ART-XC.

22 Ограничения на нарушение Лоренц-инвариантности нейтрино.

Для анализа использовалась эффективная теория поля с добавкой к лагранжиану Стандартной модели, сохраняющей $SU(2)_L$ калибровочную симметрию. Рассматривались дисперсионные соотношения вида $E^2 = k^2 + k^{n+2}/\Lambda^n$ для сверхсветового случая. Основное внимание уделено процессу нейтринного расщепления, ширина которого вычислена в коллинеарном приближении: $\Gamma_{\nu \rightarrow \nu \nu \bar{\nu}} \approx G_F^2 E^5 (E/\Lambda)^{3n} c^{(\nu)}/6\pi^3$.

Условие метастабильности нейтрино требует, чтобы время распада превышало время пролета от источника: $\Gamma^{-1} > L/c$. На основе этого условия получены ограничения для трех сценариев происхождения нейтрино:

- Галактическое ($L = 10$ кпк): $\Lambda_{n=1} = 5.3 \times 10^{29}$ ГэВ, $\Lambda_{n=2} = 1.1 \times 10^{19}$ ГэВ
- Внегалактическое ($L = 10$ Мпк): $\Lambda_{n=1} = 5.3 \times 10^{30}$ ГэВ, $\Lambda_{n=2} = 3.4 \times 10^{19}$ ГэВ
- Космогенное ($L = 100$ Мпк): $\Lambda_{n=1} = 1.2 \times 10^{31}$ ГэВ, $\Lambda_{n=2} = 5.0 \times 10^{19}$ ГэВ

Также рассмотрены другие процессы: рождение электрон-позитронных пар и ограничения из распада пиона, которые оказались менее строгими.

23 Новый галоскоп для поиска аксионной темной материи.

Предложен новый эксперимент CASH (Cosmological Axion Sarov Haloscope) для поиска аксионной темной материи в массовом диапазоне 38-54 мкэВ, не покрытом другими проектами. Основное преимущество установки - использование однофотонных детекторов на основе джозефсоновских переходов, которые существенно преодолевают стандартный квантовый предел. Детекторы характеризуются ультранизким уровнем шума (не более одного ложного срабатывания в 100 секунд) при температурах 10-20 мК. В рамках проекта планируется двухэтапная реализация: CASH-I с фиксированной частотой и CASH-II с перестраиваемым резонатором. Ожидаемая чувствительность к константе связи аксион-фотон достигает $g_{a\gamma\gamma} \leq (10^{-14} - 10^{-15})$ ГэВ $^{-1}$, что позволит проверить основные теоретические модели аксионов Печчеи-Квинна всего за один год измерений.

Эксперимент основан на концепции галоскопа - резонансного преобразования аксионов темной материи в фотоны в сильном магнитном поле. Мощность сигнала описывается формулой: $P_a = (g_{a\gamma\gamma}^2/m_a^2\rho_a) \times (F(\beta)\omega_c B_0^2 V C_a Q_0)$, где ключевыми параметрами являются объем резонатора V , магнитное поле B_0 , форм-фактор C_a и добротность Q_0 .

На первом этапе (CASH-I) используется неперестраиваемый медный резонатор объемом 63.7 см 3 с магнитным полем 1.7 Тл. Расчетное время измерения для проверки моделей KSVZ и DFSZ составляет 6.5 минут и 2.5 часа соответственно.

На втором этапе (CASH-II) реализована перестройка частоты резонатора в диапазоне 38-54 мкэВ с помощью перемещения медного стержня внутри полости. Численное моделирование показывает, что фактор формы C_a остается высоким (0.57-0.77) во всем диапазоне перестройки. Оптимизация добротности Q_0 дает значение $\sim 8 \times 10^4$ для годового измерения.

Ключевой элемент - однофотонные детекторы на основе джозефсоновских переходов с темновым счетом ~ 0.01 Гц. Детекторы работают в режиме гистерезиса и обеспечивают время отклика порядка долей наносекунд.

24 Резонансная генерация стерильных нейтрино в ранней Вселенной с ненулевой лептонной асимметрией

Работа начиналась с построения и верификации численного решения уравнения Больцмана для генерации стерильных нейтрино. В модель была включена полная зависимость вероятности перехода $\nu_\alpha \rightarrow \nu_s$ от температуры, момента импульса, потенциалов взаимодействия и асимметрии. Для расчётов использовались и расширялись существующие коды dmphen и FortEPiNO.

Первый ключевой результат: подтверждение аналитического вывода, что резонансное рождение сначала захватывает наиболее холодные моды распределения ($y = p/T$), а при падении температуры постепенно смещается к более высоким y . Расчеты показывают, что максимум смещается вправо по мере эволюции Вселенной. Именно поэтому исчезновение асимметрии в середине процесса генерации стерильных нейтрино приводит к более холодному спектру: производство прекращается до того, как будут рождены стерильный нейтрино с большим y .

Далее был выполнен полный численный анализ того, как асимметрии перераспределяются осцилляциями активных нейтрино при $T < 20$ МэВ. Было показано, что при соотношении лептонных асимметрий $L_e = -L_\mu, L_\tau = 0$ можно исключить ограничения из нуклеосинтеза. В случае обратной иерархии лептонная асимметрия уничтожается более эффективно, чем в случае прямой иерархии масс нейтрино.

Текущая стадия проекта, основанная на этой работе, состоит в определении минимально возможного угла смешивания θ при различных паттернах исходных асимметрий и разных схемах иерархии масс нейтрино.

25 Построение квазиклассических методов описания непертурбативных процессов в Бозе звездах. Самоподобная гравитационная конденсация Бозе–Эйнштейна

В работе [42], расширяющей идеи письма [138], изучается кинетическая эволюция перенаселенного газа темных бозонов, окружающих каплю конденсата Бозе–Эйнштейна (Бозе–звезду), за счет двухчастичных гравитационных столкновений. Ключевое наблюдение работы состоит в том, что кинетическая эволюция газа вокруг Бозе–звезды является приблизительно самоподобной. А именно, функция распределения частиц газа изменяет со временем ширину и высоту, но сохраняет форму. Более того, ширина и высота распределения оказываются степенными функциями времени, характеризующимися одним параметром — конформной размерностью D .

В данной работе мы упрощаем кинетическое уравнение для газа бозонов: игнорируем его средние пространственные неоднородности и описываем двухчастичное гравитационное рассеяние в приближении Ландау. Мы учитываем обмен частицами и энергией с конденсатом, накладывая граничные условия поглощения (конденсации) низкоэнергетичных частиц и добавляя внешний источник, греющий газ.

Мы показываем, что упрощенное кинетическое уравнение имеет семейство автомодельных решений — аттракторов кинетической эволюции. Мы классифицируем все такие решения с конечными массами, энергиями и потоками.

Самое важное, мы показываем, что кинетическая эволюция остается приблизительно самоподобной даже если масштабная симметрия кинетического уравнения явно нарушена внешними условиями, например, произвольно выбранным источником энергии. В таком режиме адиабатического самоподобия временная эволюция все еще происходит за счет масштабирования функции распределения, но размерность $D = D(t)$ масштабирования медленно дрейфует со временем. Мы ожидаем, что все масштабно неинвариантные эффекты, даже те, которые мы не учли, приводят к медленному дрейфу параметров. Наконец, мы показываем, что адиабатическое самоподобие способно описать кинетический рост Бозе–звезд и таким образом устранить противоречие между различными законами роста, предложенными в литературе.

26 Новая физика в широких атмосферных ливнях

В нашей работе изучены перспективы поиска сигнала от легких долгоживущих частиц, образующихся в широких атмосферных ливнях, в моделях с легкими суперсимметричными частицами из сектора, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии и в моделях с легкими аксионо-подобными частицами.

Было рассмотрено несколько каналов рождения новых легких частиц: в распадах легких мезонов (в основном каонов), а также в смешивании с нейтральными псевдоскалярными мезонами. Оказалось, что в наиболее интересной для поисков области масс легких частиц 50–400 МэВ в рассмотренных моделях доминирующим каналом рождения является распады $K \rightarrow \pi + X$, где X – новая легкая частица, за исключением области масс близкой к массе нейтрального пиона, где канал рождения в смешивании с пионом может доминировать. Ограничения на параметры моделей и ожидаемые чувствительности для экспериментов Супер-Камиоканде и Гипер-Камиоканде были получены в предположении доминирующего распада новых частиц на два фотона. При этом фоном являются обычные атмосферные нейтрино. Было показано, что Супер-Камиоканде будет чувствителен к областям пространства параметров рассмотренных моделей, еще разрешенных прямыми поисками. Таким образом, поиски новых лёгких долгоживущих частиц, рождающихся в атмосфере, изученные в нашем исследовании, будут дополнять прямые поиски на будущих экспериментах, таких как MicroBooNE, JSNS², SBND и DUNE.

Результаты работы опубликованы в статье [139].

27 Нетопологические солитоны в эффективной теории поля

В рамках $(3 + 1)$ -мерной эффективной теории возможно описать взаимодействие калибровочного поля $F^{\mu\nu}$ с нейтральным комплексным полем Прока посредством неминимального взаимодействия. Данный подход позволяет отынтегрировать квадратичный в действии $F^{\mu\nu}$, используя классические уравнения движения. В получившейся упрощенной теории комплексного поля Прока на фоне нетопологического векторного солитона численным сканированием изучался спектр линейных возмущений на наличие колебательных мод. Был определен регион параметров теории в котором векторный солитон, а также локализованное на нем электромагнитное поле $F^{\mu\nu}$ линейно стабильны.

Нерелятивистская скалярная теория поля в $(d + 1)$ измерениях с нелинейностью вида $|\psi|^{2n}$ остается инвариантной по отношению к преобразованиям симметрий из группы Шрёдингера если выполняется соотношение $nd = d + 2$. В $(1 + 1)$ и $(2 + 1)$ измерениях были рассмотрены теории с соответствующими потенциалами самодействия притягивающего типа. Уравнения движения теорий позволяют найти решения в виде нетопологических солитонов: Q-шары аналитически в $(1 + 1)$ измерениях и Q-трубки численно в $(2 + 1)$ измерениях. Вследствие масштабной инвариантности из группы Шрёдингера решения не обладают характерным масштабом длины и энергии таких решений $H = 0$, а глобальный $U(1)$ заряд является константой. Численное сканирование спектра линейных возмущений над нерелятивистскими Q-шарами и Q-трубками показало, что нет ничего кроме нулевых мод. При учете релятивистских поправок, слабо нарушающих группу Шрёдингера, получилось численно проследить за тем как появившиеся экспоненциальные моды распада переходят к нулевые моды $U(1)$ симметрии в нерелятивистском пределе.

28 EMC-эффект в ядрах ^3H и ^3He из данных эксперимента MARATHON

В статье приводятся результаты измерения EMC-эффекта в зеркальных трехнуклонных ядрах трития (^3H) и гелия-3 (^3He) и проводится сравнение с предсказаниями теоретической модели [140]. ГНР сечения измерялись на электронном ускорителе JLab с энергией пучка 10.59 ГэВ. В измерениях использовались криогенные мишени газов дейтерия, трития и гелия-3 охлажденные до температуры 40 К и спектрометры высокого разрешения установленные в лаборатории Hall A. Данные получены для инвариантной массы конечного адронного состояния $W > 1.84$ ГэВ в интервале переменной Бьеркена $0.2 < x < 0.83$, что соответствует квадрату переданного четырехимпульса $2.7 < Q^2 < 12$ ГэВ². Измерения для трития проведены впервые, а данные на гелии-3 существенно дополняют и уточняют предыдущие измерения в DESY и JLab. Результаты измерений MARATHON сравниваются с предсказаниями теоретической модели [140, 141], полученными до проведения эксперимента. Микроскопическая модель [140] учитывает ряд ядерных эффектов включая эффект усреднения с импульсным распределением связанных нуклонов и их энергий связи, вклады мезонных обменных токов в ядрах, внемассовые поправки к нуклонным СФ [142, 143, 144, 140]. В этом подходе модификация СФ связанных нуклонов является следствием их аналитического продолжения во внемассовую область [144]. Соответствующие функции $\delta f^{p,n}(x)$ были определены из анализа измерений R_A отношений на большой совокупности ядерных мишеней [140].

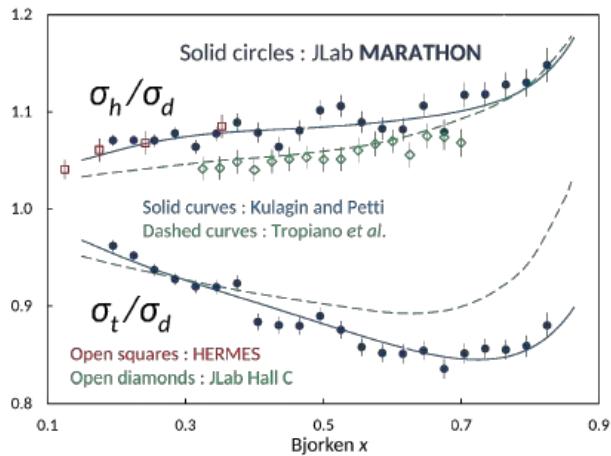


Рисунок 28.1 — Данные эксперимента MARATHON по EMC-эффекту в гелии-3 (h/d) и тритии (t/d) в зависимости от бьеркеновской переменной x . Сплошные кривые — предсказания модели [140, 141], пунктир — вычисления Tropiano et al. Показаны также данные экспериментов HERMES (DESY) и Jlab E03-103 на гелии-3.

29 Корреляция между ядерными поправками и высшими твистами в глобальном КХД-анализе

В работе проводится глобальный КХД-анализ ПФР с использованием ГНР-данных на на протоне и легких ядрах (дейтерий, тритий, гелий-3) из разных экспериментов, данных экспериментов по рождению $\mu^+\mu^-$ пар (процесс Дрелла-Яна) и W - и Z -бозонов в протон-протонных столкновениях. Анализ включает одновременное определение ПФР протона, вкладов ВТ и функций $\delta f^{p,n}(x)$, описывающих модификацию структурных функций связанных нуклонов. Для описания ядерных поправок использована микроскопическая модель [140], которая учитывает эффекты импульсного распределения связанных нуклонов и энергий связи, вклады мезонных обменных токов в ядрах, внемассовые поправки к нуклонным СФ [142, 143, 144, 140]. В этом подходе модификация ПФР в связанных нуклонах является следствием их аналитического продолжения во внемассовую область [144]. Рассмотрены две популярные модели параметризации вкладов ВТ: аддитивная модель (aHT), в которой ВТ члены рассматриваются как независимые аддитивные поправки к СФ нуклонов, и мультиплективная модель (mHT), в которой ВТ члены вводятся как факторы к СФ ведущего твиста. Показано, что aHT-модель хорошо согласуется с изоскалярностью функции $\delta f^p = \delta f^n$, в то время как mHT-модель приводит к ненулевой асимметрии $\delta f^p - \delta f^n$. Кроме этого, mHT-модель приводит к завышению отношения d/u ПФР кварков в протоне при больших x , что ухудшает описание данных MARATHON ($\chi^2/NDP = 34/22$ против $20/22$ для aHT). Подробно исследованы источники изоспиновой зависимости ядерных поправок в модели [140]. Рассчитаны относительные ядерные эффекты для u - и d -кварков в ^3H и ^3He и показана их зависимость от ядра и кваркового аромата даже если функция $\delta f(x)$ изоскалярна.

30 Изучение физических процессов и нелинейных структур в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности разного типа

В данной задаче мы исследовали влияние дополнительного локального максимума в спектре космологических возмущений плотности на профиль линии поглощения 21 см, формируемый в эпоху Темных веков. При расчете образования ранних гало темной материи (ТМ) мы предполагаем, что стандартный Λ CDM-спектр возмущений умножен на дополнительный множитель

$$1 + A \cdot \exp \left(-\frac{(\log(k) - \log(k_0))^2}{\sigma_0^2} \right), \quad (30.1)$$

где $A = 20$, $k_0 = 4,69 \text{ Мпк}^{-1}$, $\sigma_0 = 0,1$. Такой выбор позволяет объяснить наблюдаемый телескопом им. Дж. Уэбба избыток галактик на $z > 10$. Для исследования эволюции темной материи были выполнены три численных моделирования методом N -тел в кубе с объемом $(47 \text{ Мпк})^3$ и с 1024^3 частицами. Основной вклад в эффект Баутхайзена–Филда вносят звезды популяции II, которые уже в некоторой степени обогатились металлами. Темп образования звезд в простых моделях пропорционален темпу образования виреализованных (коллапсирующих) объектов из ТМ

$$\dot{\rho}_s = \bar{\rho}_b \cdot f_* \frac{df_{\text{coll}}(z)}{dt}, \quad (30.2)$$

где точка означает производную по времени, $\bar{\rho}_b$ – средняя плотность барионов во Вселенной, f_* – доля барионов в виреализованных гало, переходящая в звезды, $f_{\text{coll}}(z)$ – доля массы в составе виреализованных гало. Эта величина определяется по результатам указанного численного моделирования. Отбирались гало с виреальными температурами $> 10^4 \text{ K}$, в которых возможно эффективное охлаждение газа. В современной Вселенной доля массы барионов, переходящих в звезды, составляет $f_* \sim 0.1$. Однако величина f_* может расти с ростом z и зависеть от массы гало. В связи с имеющейся неопределенностью, мы рассмотрели несколько вариантов f_* . Отметим, что $f_{\text{coll}}(z)$, найденная из численного моделирования, заметно отличается от оценки, основанной на теории Пресса–Шехтера. Теория Пресса–Шехтера для моделей с барьером переоценивает число гало в несколько раз при малых красных смещениях, но недооценивает это число при больших красных смещениях, поэтому использование численного моделирования повышает надежность вычислений.

Глобальное (усредненное по всему небу) поглощение (сдвиг температуры) в линии 21 см в однородном газе рассчитывается по формуле [58]

$$\delta T_b \simeq 27(1-x) \left(1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_s(z)}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right) \text{ мК}, \quad (30.3)$$

где x – доля ионизованного водорода, T_γ – температура реликтового излучения, $T_s(z)$ – спиновая температура, зависящая от УФ-излучения первых звезд. Мы прослеживаем поведение функции $T_s(z)$ для двух случаев – при наличии и при отсутствии бампа – и вычисляем δT_b для обоих вариантов.

Спиновая температура и другие величины для физических условий в газе в поле УФ-излучения звезд выражается по известным соотношениям, приведенным в обзоре [58]. Светимость первых звезд в единице объема имеет вид

$$\varepsilon_*(z, \nu) = f_* n_H \varepsilon(\nu) \frac{df_{\text{coll}}}{dt}, \quad (30.4)$$

где $\varepsilon(\nu)$ – число излученных фотонов на один барион. Эффект Ваутхейзена–Филда мы учитываем стандартным методом – путем суммирования по лаймановским резонансам и интегрирования по красным смещениям излученных фотонов, длина волны которых уменьшилась в итоге до линии Ly α [145]. При этом спектр нормируется так, что число фотонов на атом водорода $N_\alpha = 9690$ для звезд популяции II, а “recycling fraction” берется из ряда предшествующих работ. Таким образом, фон УФ-фотонов записывается в виде

$$J_\alpha = \sum_2^{30} f_{\text{rec}}(n) \int_z^{z_{\text{max}(n)}} dz' \frac{(1+z)^2}{4\pi} \frac{c}{H(z)} \varepsilon_*(z', \nu'), \quad (30.5)$$

где $\nu' = \nu(1+z')/(1+z)$, $(1+z')/(1+z) = [1 - (n+1)^{-2}]/(1 - n^{-2})$ и $\text{max}(n) = 30$.

Эффект Ваутхейзена–Филда определяет границу ямы поглощения со стороны больших z , тогда как нагрев и ионизация газа определяет ее границу со стороны малых z . Нагрев и ионизация также определяются первыми звездами и галактиками, но эти процессы весьма хаотичны и пока еще не до конца прояснены. Поэтому в данной работе мы концентрируемся только на границе ямы со стороны больших z , а процессы при малых z учитываем приближенно. Эволюция степени ионизации x однородного газа рассчитывается по известной формуле

$$\frac{dx}{dt} = \zeta \frac{df_{\text{coll}}}{dt} - \alpha_r x^2 n_H, \quad (30.6)$$

где $\alpha_r = 4,2 \times 10^{-13}$ см³ с⁻¹ – коэффициент рекомбинации, $\zeta = A_{\text{He}} f_* f_{\text{esc}} N_{\text{ion}}$, A_{He} – доля гелия, $N_{\text{ion}} = 0,45 N_\alpha$ для звезд популяции II, f_{esc} – параметр выхода УФ-излучения. Величины, ответственные за ионизацию, пока нельзя достоверно фиксировать. В данной работе мы варьируем в некотором интервале величины f_{esc} и f_* . Результаты расчета ямы поглощения приведены на рисунках 30.1 и 30.2. Видно, что большие значения f_* противоречат наблюдениям, т.к. при этом эпоха реионизации сдвигается на красные смещения $z > 6,4$ (переход к нулевому поглощению соответствует $x = 1$ и $\delta T = 0$), причем эта проблема выражена сильнее в случае спектра возмущений с бампом. Но при малых f_* и f_{esc} можно получить удовлетворительное согласие с наблюдаемым положением эпохи реионизации как при наличии, так и при отсутствии бампа.

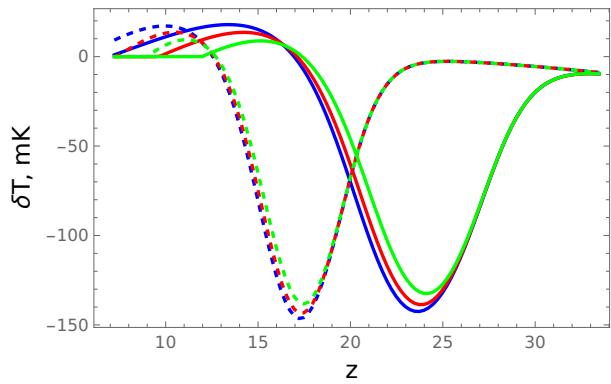


Рисунок 30.1 — Сдвиг температуры реликтового излучения вследствие поглощения в нейтральном водороде, сплошные линии – при наличии бампа с $A = 20$, $k_0 = 4,69 \text{ Mpc}^{-1}$ и $\sigma_0 = 0,1$, штрихованные кривые – без бампа (стандартная Λ CDM модель), параметр $f_{\text{esc}} = 0,025, 0,05$ и $0,1$ (синяя, красная и зеленая кривые, соответственно), во всех трех случаях $f_* = 0,1$

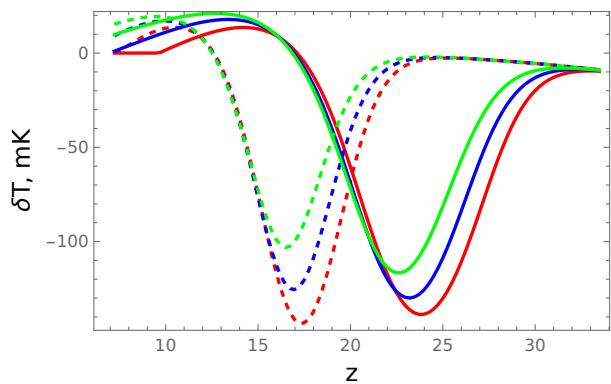


Рисунок 30.2 – То же, что на предыдущем рисунке, но для параметра $f_{\text{esc}} = 0,05$ и трех случаев: $f_* = 0,025, 0,05$ и $0,1$ (зеленая, синяя и красная кривые, соответственно)

Общим выводом данной работы, который может оказаться полезным в будущем по мере уточнения физики образования первых звезд и влияния их УФ-излу-

чения, является сдвиг положения ямы поглощения на большие красные смещения. Положения минимума вместо $z \sim 17$ при наличии бампа (с указанными выше параметрами) перемещается на $z \sim 24$, а граница ямы поглощения смещается на еще большие красные смещения. Это означает, что наблюдение данной особенности в спектре поглощения в линии 21 см потребует при наличии бампа радионаблюдений с несколько большими длинами волн и соответствующих антенных устройств и алгоритмов фильтрации шумов, что в подобных наблюдениях представляет собой очень сложную и нетривиальную задачу. Если наблюдения в метровом диапазоне надежно покажут наличие ямы поглощения с некоторым положение ее границ и глубины, это представит принципиальную возможность для независимого точного определения спектра возмущений на масштабе маломассивных галактик.

Результаты данного исследования опубликованы в работе [146].

Другой задачей в рамках данной темы стало исследование влияния космических струн – нелинейных объектов, образовавшихся до реионизации Вселенной, – на наблюдаемую структуру скоплений галактик. Хотя космические струны были исключены как основной источник космологических возмущений на основе данных о флюктуациях реликтового излучения, все еще существует вероятность того, что они могут быть ответственны за некоторые редкие явления. На примере скопления Abell 520 показано, что гигантские петли или сегменты длинных струн могут существенно искажать видимую картину распределения плотности в скоплениях. Струны рождаются с релятивистскими начальными скоростями, которые со временем уменьшаются из-за расширения Вселенной. Следовательно, наиболее вероятно, что на момент наблюдения струны имели большую остаточную скорость. ТМ не может накапливаться в значительных количествах вокруг быстро движущихся струн, поэтому вокруг струн не образуется большая концентрация ТМ и барионной материи. В то же время, движущиеся струны могут вызывать слабое гравитационное линзирование галактик. Эти два факта могут объяснить кажущуюся концентрацию массы в проекциях на скопление, но без галактик, т.е. движущаяся струна имитирует плотное массивное ядро ТМ. Мы рассматриваем три различные конфигурации струн, которые подходят для объяснения структуры Abell 520.

В первом возможном сценарии мы объясняем загадку объекта Abell 520, состоящего из двух сталкивающихся скоплений галактик, с помощью движущейся петли космической струны, которая случайно пролетела на луче зрения в эпоху столкновения. Мы предполагаем, что радиус петли имеет тот же порядок, что и радиус темного ядра в скоплении галактик. Следовательно, видимое ядро в данном случае является не частью скопления, а скорее массивным объектом, который случайно оказался в поле зрения. Преимущество этого сценария заключается в том, что галактики не мо-

гут эффективно группироваться вокруг быстро движущейся петли. Это именно то, что нужно, чтобы получить большой гравитационный потенциал (необходимый для слабого линзирования) без галактик. Радиус объекта (3-й пик на рисунке 4 в статье [60]) равен $r \sim 200$ кпк, поэтому длина струны в данном случае $l = 2\pi r$. Обозначим $\mu_{-8} \equiv G\mu/(10^{-8}c^2)$. Масса струны

$$M_l \sim 2\pi r\mu \simeq 2,6 \times 10^{13} \left(\frac{\mu_{-8}}{100} \right) \left(\frac{r}{200 \text{ кпк}} \right) M_\odot. \quad (30.7)$$

Следовательно, мы должны предположить, что $G\mu/c^2 \geq 1,5 \times 10^{-6}$, чтобы объяснить темное ядро массой $4 \times 10^{13} M_\odot$. Противоречие с известными ограничениями может быть устранено, если концентрация струн во Вселенной невелика. Мы предполагаем, что конфигурация Abell 520 представляет собой замкнутую петлю. Редкость таких петель является причиной их отсутствия, например, в проекции на скопление Bullet.

Время жизни петли

$$\tau \sim \frac{lc}{G\mu\Gamma} \simeq 8,2 \times 10^{10} \left(\frac{\mu_{-8}}{100} \right)^{-1} \left(\frac{r}{200 \text{ кпк}} \right) \text{ лет}, \quad (30.8)$$

где $\gamma \simeq 50$ - числовой коэффициент, соответствующий механизму распада петли за счет излучения гравитационных волн. Следовательно, петли с такими массами возникают вблизи эпохи их распада, и распады должны быть относительно вероятными событиями.

Время образования петли $t_i \sim l/(\alpha c)$. Если петля имела начальную скорость v_i , то ее скорость при красном смещении $z(t)$

$$v(z) \sim v_i g^{-1} \frac{a(t_i)}{a(t)} \sim 6 \times 10^3 \left(\frac{v_i/c}{0,63} \right) \left(\frac{g}{0,77} \right)^{-1} \left(\frac{1+z}{1,2} \right) \times \left(\frac{M_l}{2,6 \times 10^{13} M_\odot} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_{-8}}{100} \right)^{-2/3} \left(\frac{\alpha}{0,1} \right)^{-2/3} \text{ км/с}, \quad 30.9$$

где фактор Лоренца $g = \sqrt{1 - v_i^2/c^2}$. Предполагается среднее значение $\sigma_v^2 = \langle v_i^2 \rangle \simeq 0,4c^2$ [147]. Большая скорость означает, что аккреция галактик на движущуюся петлю неэффективна, поскольку гравитационное притяжение петли соответствует вироальной скорости $\simeq 10^3$ км с⁻¹. Галактики только возмущаются, но недерживаются гравитационной петлей. Однако быстро движущаяся петля не может быть ответственна за формирование Abell 520 или аналогичного кластера из-за нехватки времени.

Красное смещение $z = 0,201$ соответствует космологическому времени $t_z \simeq 1,1 \times 10^{10}$ лет. Обозначим $L_e \sim ct_z \sim 3,4$ Гпк. Вероятность того, что петля пролетит

через $R \sim 3,7$ Мпк (размер кластера), оценивается следующим образом

$$P_e \sim 0.21 \left(\frac{f}{10^{-3}} \right) \left(\frac{R}{3,7 \text{ Мпк}} \right)^2 \left(\frac{L_e}{3,4 \text{ Гпк}} \right) \left(\frac{M_l}{2,6 \times 10^{13} M_\odot} \right)^{-1}, \quad (30.10)$$

где f – доля струн в составе ТМ. Полученная в численном моделировании плотность числа петель [147] соответствует указанной в (30.10) достаточно большой вероятности наблюдения.

Во втором сценарии мы предполагаем, что движущийся сегмент длинной петли или изогнутой бесконечной струны проходит через изображение объекта Abell 520 в момент столкновения кластеров. Соответствующая конфигурация показана на рисунке 30.3. Оценим радиус R большой круглой петли, массивный сегмент которой $M_s \sim 4 \times 10^{13} M_\odot$ лежит в области $L \sim 200$ кпк вокруг 3-го пика. Из простой геометрии получаем

$$2L = R - R \cos \phi, \quad l = 2\phi R, \quad M_s = \mu l = 2\phi R \mu. \quad (30.11)$$

Из этих уравнений находим численно ϕ , R и общую массу петли $M_l = 2\pi R \mu$. Зависимость $M_l(\mu_{-8})$ показана на рисунке 30.4 для физически мотивированных значений $\mu_{-8} < 10^2$. Дополнительные ограничения для модели $t_i < t_z$ и $t_i + \tau > t_z$ показаны пунктирными линиями.

Движение сегмента позволяет нам объяснить отсутствие галактик в темном ядре. С точки зрения наблюдений, есть участки струны, которые расположены поперец луча зрения. Эти сегменты не наблюдались из-за меньшего суммарного гравитационного потенциала по сравнению с сегментом вдоль луча зрения. Данный сценарий может быть проверен с помощью будущих исследований слабого линзирования с использованием более крупной выборки галактик вокруг Abell 520.

В третьем сценарии мы предполагаем, что Abell 520 – это не пара сталкивающихся кластеров, а единый разорванный кластер. Он мог распасться на несколько частей при распаде петли. Сложность этого сценария заключается в том, что результирующие петли обычно летят с релятивистскими скоростями. Вместо этого мы должны предположить скорость $\simeq 10^3$ км/с для нескольких фрагментов, за исключением высокоскоростного фрагмента темного ядра, который, как и ранее, объясняет отсутствие галактик. Такая ситуация может реализоваться при наличии распределения петель по скоростям, но с очень малой вероятностью.

Результаты данного исследования опубликованы в работе [148].

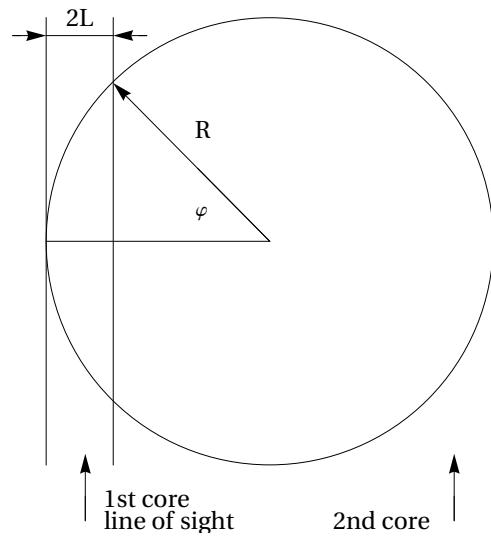


Рисунок 30.3 — Конфигурация петли относительно луча зрения

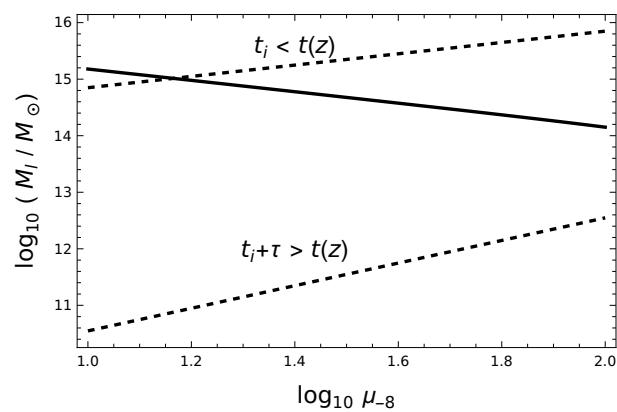


Рисунок 30.4 — Ограничения на общую массу петли, $t(z)$ — космологическое время, когда наблюдается петля, а $z = 0,201$ — красное смещение Abell 520, часть сплошной кривой между пунктирными кривыми показывает допустимые значения.

31 Исследование первичных черных дыр в ранней Вселенной и в современную эпоху

Рассмотрим модель, в которой сверхмассивные первичные черные дыры (ПЧД) составляют очень малую долю $f \ll 1$ от всей темной материи (ТМ). Основная часть ТМ должна в этом случае образовывать вокруг пары ПЧД массивное гало. Гало начинает эффективно нарастать вокруг пары ПЧД после момента t_{eq} перехода на пылевидную стадию эволюции Вселенной в процессе вторичной акреции. Рост гало заканчивается, когда на нелинейную стадию выходят окружающие возмущения плотности инфляционного происхождения. Обозначим через t_s – момент остановки расширения слоя сферического гало, а r_s – радиус слоя в этот момент. Динамику сжатия слоев можно проследить по известным сферическим моделям. Возмущение плотности в момент $t = t_{\text{eq}}$ в пределах сферы, содержащей массу M ТМ, $\delta_{\text{eq}} = 2M_{\text{PBH}}/M$. Рассмотрим слой, имеющий в момент остановки толщину δr_s . В момент $t_c \simeq 2t_s$ слой формально сжался бы в точку, но при наличии возмущающих сил, он принимает вытянутую форму, которую мы моделируем диском с радиусом r_t и толщиной δr_c . В распределении приливных сил всегда существует направление с нулевым угловым моментом частиц, вдоль которого слой проходит через центр, см. подробнее в [64]. Для плотности слоя получаем

$$\rho_c(t) = \rho_s(\tilde{t}) \frac{\delta r_s}{\delta r_c} \left(\frac{r_s(\tilde{t})}{r_t} \right)^2, \quad (31.1)$$

где $\tilde{t} \simeq t/2$ поскольку слой начал сжиматься раньше. Рассматривая динамику сжатия слоя, в (31.1) получаем $\delta r_c/\delta r_s = 9\pi/8 \approx 3,5$.

Величина r_t определяется влиянием на гало ТМ возмущений плотности инфляционного происхождения, создающих гравитационный потенциал $\phi(r, t)$. Во втором (нерадиальном) приближении

$$\frac{d^2 r_{t,i}}{dt^2} = -T_{ij}(t)r^j, \quad (31.2)$$

где вклад приливных сил $T_{ij} = \Phi_{ij} - (1/3)\Phi_{ll}\delta_{ij}$, $\Phi_{ij} = \partial^2\phi/(\partial r^i\partial r^j)$ и $T_{ij}(t) = T_{ij}(t_{\text{eq}})(t/t_{\text{eq}})^{-4/3}$. Результат расчета имеет вид

$$r_{t,in} = 2^{9/4}3^{-1/4}\sigma_{\text{eq}}(M)r_{\text{eq}} \left(\frac{5\delta_{\text{eq}}}{3} \right)^{-2} \varkappa(\delta_{\text{eq}}), \quad (31.3)$$

где, $r_{\text{eq}} = [3M/(4\pi\rho_{\text{eq}})]^{1/3}$, а функция $\varkappa(\delta_{\text{eq}}) \sim 1$. Величина $r_{t,in}/r_s$ показана на рисунке 31.1.

Рядом с парой ПЧД частица ТМ начинает гравитационно рассеиваться, поэтому характерное минимальное расстояние связано с “радиусом влияния” пары ПЧД $r_{\text{infl}} \simeq 2GM_{\text{PBH}}/v_c^2 \simeq r_s(z)M_{\text{PBH}}/M(z)$. Т.к. два фактора действуют независимо, то $r_t = \min \{r_s, (r_{t,\text{infl}}^2 + r_{\text{infl}}^2)^{1/2}\}$. Этот масштаб показан на рисунке 31.1. Подставляя r_t в (31.1), получаем плотность ТМ, пролетающей через центр гало, эта величина показана на рисунке 31.2.

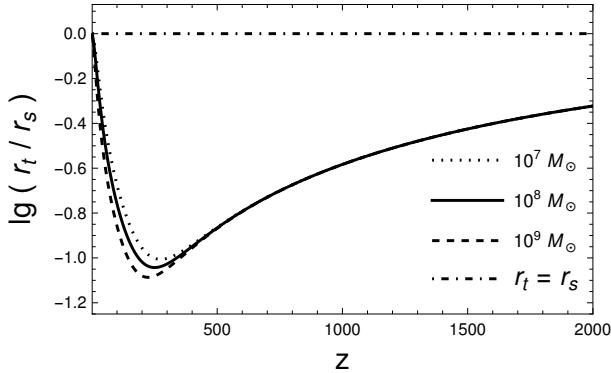


Рисунок 31.1 — Радиус слоя r_t по отношению к радиусу остановки r_s на красном смещении z , точечная, сплошная и штрихованная кривые соответствуют $M_{\text{PBH}} = 10^7 M_{\odot}$, $10^8 M_{\odot}$ и $10^9 M_{\odot}$

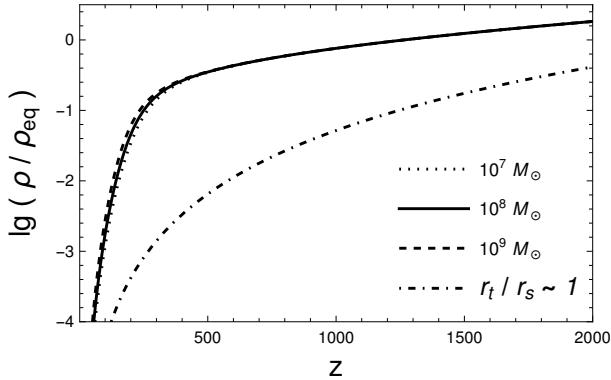


Рисунок 31.2 — Плотность в центре гало ТМ в зависимости от красного смещения для тех же масс ПЧД, что на предыдущем рисунке, нижняя штрих-пунктирная кривая показывает предельную плотность $\rho_c(t) = (\pi/2)\bar{\rho}(t)$

Затем мы показали, что существуют характерные начальные размеры пары ПЧД, при которых их слияние под действием пролета ТМ и излучения гравитационных волн происходит за хаббловское время. Расчет влияния пролетающей ТМ на эволюцию пары ПЧД мы выполнили по методу, разработанному в [149] для случая пролета звезд. Эволюция большой полуоси и эксцентриситета

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{a} \right) = H_1 \frac{G\rho}{v_c}, \quad \frac{de}{d \ln(1/a)} = K_1, \quad 31.4$$

где $H_1 \simeq 20$. По мере эволюции большой полуоси пары ПЧД достигает стадии, когда начинают преобладать потери энергии орбитального движения на излучение гравитационных волн. Начиная с этого момента, время эволюции до слияния пары составляет

$$t_c = \frac{3c^5}{170G^3 M_{\text{BH}}^3} a^4 (1 - e^2)^{7/2}. \quad (31.5)$$

Используя данный метод, можно найти время эволюции пары ПЧД для слияния в зависимости от начальных параметров их орбит. На рисунке 31.3 показаны границы области начальных параметров, при которых время эволюции до слияния меньше возраста Вселенной.

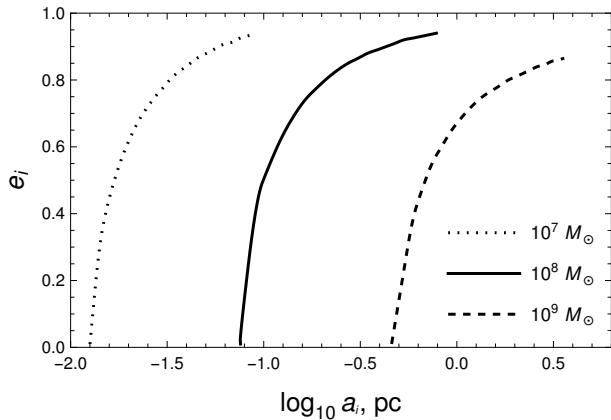


Рисунок 31.3 — Кривые в пространстве начального эксцентриситета и начальной большой полуоси, на которых полное время эволюции пары ПЧД равно современному возрасту Вселенной t_0 , для точек, находящихся выше этих кривых, слияние пар ПЧД происходит при $t < t_0$

Также была исследована модель двойных сверхмассивных ПЧД в гало ТМ с самовзаимодействием частиц. В этом случае слияние пар ПЧД заметно ускоряется.

В рамках данной работы также рассмотрен вопрос о том, может ли излучение гравитационных волн от слияний пар ПЧД объяснить стохастический гравитационно-волнового фона, недавно обнаруженный коллаборациями пульсарного тайминга (Nanograv и др.). Этот вопрос зависит от доли пар ПЧД среди всех ПЧД и в ограничениях на долю сверхмассивных ПЧД в составе ТМ. Нами показано, что при наличии детерминированного механизма образования пар можно объяснить наблюдения стохастического гравитационно-волнового фона Nanograv, если доля сверхмассивных ПЧД в составе ТМ составляет $f \sim 10^{-4}$, что близко к существующим ограничениям на их число при рассматриваемых массах.

Результаты данного исследования были представлены в докладе на Международной конференции “Физические интерпретации теории относительности” – 2025 (https://pirt.bmstu.ru/ru_ru/list_of_reports/). Статья с результатами исследования направлена в журнал.

32 Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучками мюонных нейтрино

32.1 Объединенный анализ нейтринных осцилляций в экспериментах T2K и NOvA

В работе [83] был проведен совместный анализ наборов данных NOvA [150] и T2K [151], двух действующих в настоящее время экспериментов по осцилляциям нейтрино с длинной базой (расстояние распространения нейтрино составляет сотни километров). На рисунке 32.1 показана взаимодополняемость экспериментов в упрощенном случае. Наборы овальных кривых показывают интегральные по энергии полные числа событий ν_e и $\bar{\nu}_e$, ожидаемые в дальних детекторах при различных сценариях упорядочения масс нейтрино и значениях фазы нарушения СР-инвариантности δ_{CP} при фиксированных значениях других параметров осцилляций. При нормальном упорядочении (иерархии) масс нейтрино $m_1 < m_2 < m_3$, где m_i массы собственных нейтринных состояний, а при обратной иерархии - $m_3 < m_1 < m_2$. Измеренные числа событий в NOvA и T2K показаны черными точками с погрешностями. Как показано на рисунке 32.1(а), для NOvA наблюдается более сильное разделение между овалами упорядочения масс, но поскольку данные NOvA лежат вблизи перекрытия эллипсов, может возникнуть неоднозначность относительно того какое упорядочение является правильным и какие значения δ_{CP} предпочтительны. Напротив, T2K менее чувствителен к иерархии масс, точки с близкими значениями δ_{CP} при каждой иерархии расположены близко друг к другу, и данные лежат ближе всего к $\delta_{CP} = -\pi/2$ независимо от массового упорядочения.

Использование преимущества двух взаимодополняющих экспериментальных схем позволило установить новые ограничения на несколько параметров нейтринного сектора. Этот анализ обеспечивает новую точность определения разности квадратов масс $\Delta m_{23}^2 = 2,43_{-0,03}^{+0,04} \times 10^{-3}$ эВ² при нормальном упорядочении масс и $\Delta m_{23}^2 = -2,48_{-0,04}^{+0,03} \times 10^{-3}$ эВ² при обратной иерархии масс нейтрино, а также 3 σ - интервал по $\delta_{CP} = [-1,38\pi, 0,3\pi]$ при нормальном упорядочении, и $\delta_{CP} = [-0,92\pi, -0,04\pi]$ при обратной иерархии масс.

Хотя в двух экспериментах по отдельности предпочтение отдается нормальному упорядочению, значения других параметров осцилляций более согласованы при обратной иерархии масс, что приводит к различному предпочтению к порядку масс в совместном анализе. Таким образом, этот анализ подтверждает нарушение СР-инвариантности в лептонном секторе, если предположить, что верно обратное упорядочение масс нейтрино. Очевидно, что в настоящее время мы не видим зна-

чительного предпочтения ни для одной из иерархий масс. Следовательно, будущее измерение иерархии масс повлияет на интерпритацию этих результатов.

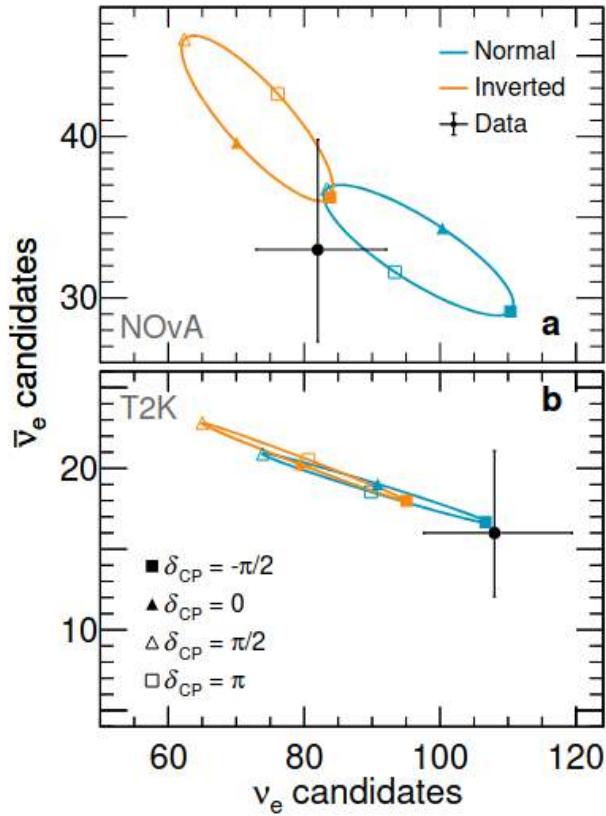


Рисунок 32.1 — Влияние массового упорядочения и фазы δ_{CP} на темп счета событий. Диаграмма 'би-событий', иллюстрирующая экспериментальную чувствительность к иерархии масс нейтрино и δ_{CP} с панелями, представляющими случай NOvA (а) и T2K (б). Черные точки с 1σ статистическими ошибками показывают общее количество кандидатов ν_e и $\bar{\nu}_e$, отобранных в дальних детекторах. Овальные параметрические кривые отображают прогнозируемое количество событий в условиях нормальной (синие) или обратной (оранжевые) иерархий масс при изменении параметра δ_{CP} от $-\pi$ до π

32.2 Поиск осцилляций активных нейтрино в стерильные в эксперименте NOvA

В работе [152] были представлены результаты поиска осцилляций активных нейтрино в стерильные нейтрино в рамках парадигмы с тремя активными и одним стерильным нейтрино (модель 3+1). В этом анализе используются результаты ближнего и дальнего детекторов NOvA облучаемых пучком мюонных нейтрино. Экспозиция данных $13,6 \times 10^{20}$ РОТ (протонов на мишень) вдвое превышает ранее используемую в анализе NOvA, и в этом анализе впервые использовались события обусловленные взаимодействием мюонных нейтрино заряженным и нейтральным токами.

Наборы нейтринных событий на ближнем и дальнем детекторах обрабатываются одновременно, что позволяет проводить поиск в диапазоне Δm_{41}^2 , простирающемся на 2(3) порядка величины выше (ниже) 1 эВ². NOvA не нашла свидетельств осцилляций активных нейтрино в стерильные в рамках модели 3+1 с уровнем достоверности 90%. Новые ограничения исключают некоторые области параметров осцилляций, которые не были исключены данными эксперимента IceCube на 90% доверительном уровне. Дополнительно, получены самые строгие ограничения на аномальное появление ν_τ в пучке ν_μ для $\Delta m_{41}^2 \leq 3$ эВ². Результаты представлены на рисунке 32.2.

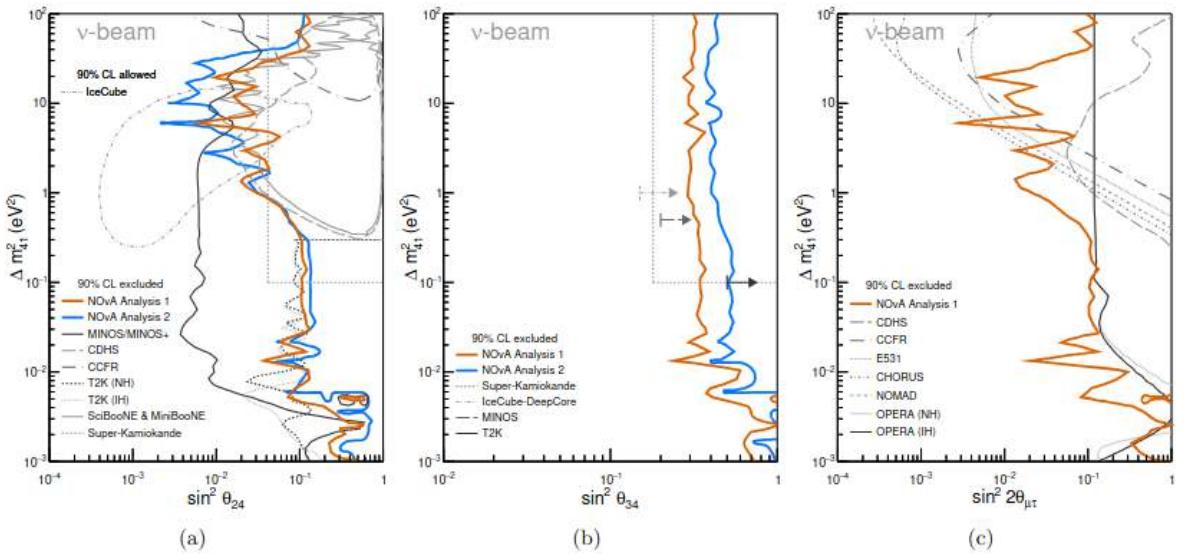


Рисунок 32.2 — Поправленные 90% доверительные интервалы в плоскости а) $\Delta m_{41}^2 - \sin^2 \theta_{24}$, б) $\Delta m_{41}^2 - \sin^2 \theta_{34}$ и в) $\Delta m_{41}^2 - \sin^2 2\theta_{\mu\nu}$ с разрешенными областями и контурами исключения из других экспериментов. Области справа от открытых контуров исключаются. Закрытые контуры на рисунке а) также обозначают исключенные области

32.3 Двойные дифференциальные инклузивные сечения рассеяния нейтрино на углероде

В работе [153] были измерены двойные дифференциальные инклузивные сечения $d^2\sigma/d|q|dE_{avail}$ нейтрино-ядерного взаимодействия со средней энергией 1,86 ГэВ, на мишени состоящей, преимущественно, из углерода, но содержащей более тяжелые ядра. Сечения как функции трех-мерного переданного импульса $|q|$ и доступной энергии E_{avail} представлены на рисунке 32.3. На этом рисунке показаны дифференциальные сечения по одной переменной $d\sigma/d|q|$ и $d\sigma/dE_{avail}$. Также, указаны предсказания, полученные в рамках четырех других моделей на основе GENIE, каждая из которых использует свою модель $2p2h$ реакции. В этих реакциях во взаимодействии участвует более одного нуклона ядра и они вносят вклад в инклузивные

сечения. Сравнение теоретических предсказаний с измеренными сечениями, указывает на недооценку вкладов $2p2h$ каналов, вычисленных в рамках моделей Valencia и SuSAv2, которые часто используются в генераторе нейтринных событий GENIE. Представленные результаты измерений будут способствовать разработке более точных описаний ν_μ СС-инклузивного рассеяния и $2p2h$ реакций, необходимых для экспериментов по осцилляциям нейтрино.

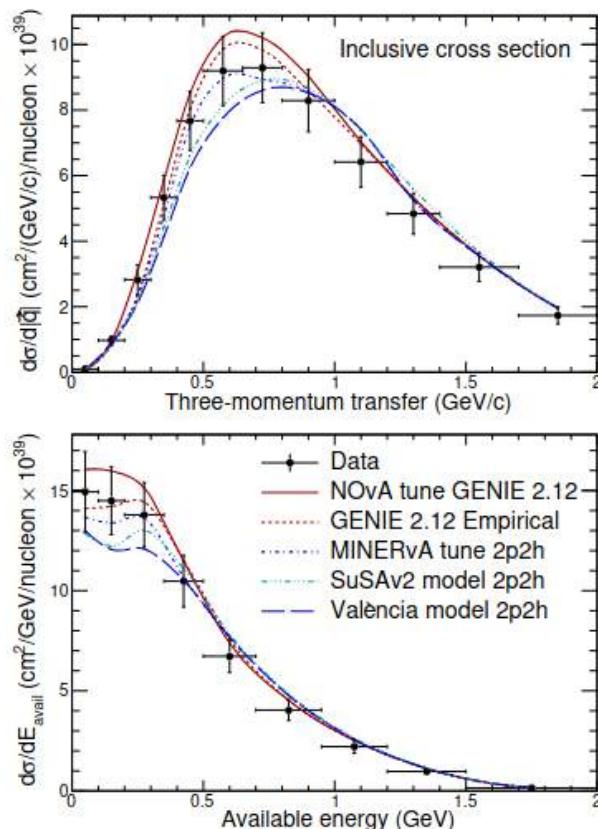


Рисунок 32.3 — Инклузивные сечения $d\sigma/d|q|$ (вверху) и $d\sigma/dE_{avail}$ (внизу). Данные сравниваются с предсказаниями расчетов с использованием пяти моделей $2p2h$ реакции

33 Прецизионное измерение параметров редких распадов B-мезонов в эксперименте LHCb, прецизионное измерение параметров CP-нарушения

Коллаборация LHCb представила инновационный метод анализа для идентификации типа (аромата) нейтральных B -мезонов непосредственно в момент их образования в pp -столкновениях. Этот подход основан на комплексной обработке всех треков, рожденных в событии. Обучение модели, построенной на архитектуре нейронной сети DeepSets, выполнялось независимо для частиц B^0 и B_s^0 .

Калибровка выходных сигналов классификатора проводилась с использованием эталонных каналов распада: $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ и $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$. Данные для калибровки были получены детектором LHCb в ходе сеанса работы на энергии столкновений 13 ТэВ.

Тестирование алгоритма как на реальных данных, так и в рамках моделирования показало, что его работоспособность коррелирует с кинематикой B -мезона и характеристиками события (такими как число треков и количество первичных вершин) аналогично комбинированному действию ранее применявшихся в эксперименте LHCb методов идентификации.

Новая методика демонстрирует значительный прогресс в точности определения аромата: её показатель эффективности (tagging power) превышает суммарный результат предыдущих алгоритмов на 35% для B^0 -мезонов и на 20% для B_s^0 -мезонов. Данное улучшение напрямую ведёт к снижению статистической погрешности в измерениях параметров CP -нарушения, ожидаемое уменьшение которой оценивается примерно в 15% и 10% для соответствующих типов мезонов.

34 Изучение характеристик КФЭУ для адронного калориметра высокой гранулярности. Обработка и анализ данных, полученных в эксперименте CMS в 2024-2025 годах

Группа ИЯИ РАН принимает активное участие в разработке и исследовании КФЭУ для модернизации установки CMS. Участниками группы были созданы уникальные автоматизированные экспериментальные стенды для прецизионных измерений наиболее важных параметров КФЭУ: коэффициента усиления, квантовой эффективности, быстродействия, шумов, ёмкости, последовательного сопротивления, линейности. Были проведены измерения многочисленных прототипов КФЭУ, изучена их радиационная стойкость, стабильность в условиях повышенных температур и влажности. Результаты этих измерений существенно продвинули понимание принципов работы КФЭУ и помогли оптимизировать их структуру для работы в условиях LHC. Как ожидается, в детекторе HGCAL будет установлено около 400 тысяч КФЭУ. Перед запуском производства основной партии необходимо подтвердить качество приборов и постоянство характеристик КФЭУ. С этой целью группой сотрудников ИЯИ РАН изучалась радиационная стойкость партии КФЭУ для детектора HGCAL. Были измерены характеристики образцов КФЭУ с размером ячейки 25 мкм и 30 мкм. Основной результат проведенных измерений облученных образцов КФЭУ — все приборы КФЭУ работают нормально после полной дозы облучения, соответствующей дозе, которая будет набрана приборами в процессе эксплуатации в детекторе, а характеристики облученных приборов КФЭУ по темновому току и фототоку соответствуют требуемым.

Данные CMS были проанализированы и обработаны, а результаты опубликованы в следующих статьях [154, 155, 156, 157, 158, 159, 160].

35 Разработка фотодетекторов и сцинтилляционных детекторов для проектируемых калориметров эксперимента СЕРС.

В настоящее время нашей группой ведутся активные работы по разработкам высокоэффективных радиационно стойких с высоким Z сцинтилляционных детекторов, высокоэффективных быстродействующих фотодетекторов для использования в электромагнитных и адронных калориметрах будущих экспериментальных установок СЕРС.

Весьма перспективными сцинтилляторами для использования в таких целях представляются тяжелые барий, свинец, гадолиний, галлий содержащие неорганические кристаллы, керамики и стекла. Тяжелые сцинтилляционные стекла представляют особый интерес в силу их технологической простоты изготовления и относительной дешевизны, что при требовании огромного числа каналов калориметров начинает играть немаловажную роль. Необходим и поиск новых перспективных материалов для сцинтилляторов.

Необходимы тщательные исследования всех основных параметров сцинтилляторов — оптических и сцинтилляционных: световогохода и линейности энергетического отклика, кинетики сцинтилляционного свечения для электронов и тяжелых заряженных частиц и нейтронов. Отдельный интерес представляет радиационная стойкость сцинтилляторов. Также необходимо исследовать температурные зависимости параметров сцинтилляторов.

Для выполнения этих целей разработаны и созданы специализированные измерительные стенды. Проведенные с помощью разработанных стендов исследования параметров различных опытных образцов сцинтилляторов показывают многообещающие результаты для тяжелых барий, свинец, гадолиний, галлий содержащих сцинтилляторов и сцинтилляционных стекол.

В качестве высокоэффективных быстродействующих детекторов фотонов рассматриваются как классические вакуумные фотоумножители, так и гибридные вакуумные фотоумножители на основе микроканальных пластин (FPMTs) и твердотельные кремниевые фотоумножители (SiPMs). Для всесторонних исследований параметров разрабатываемых фотоумножителей также разработаны и созданы специализированные стенды. Быстродействующие фотоумножители с двумя микроканальными пластинами с прямой фокусировкой фотоэлектронов и модифицированным анодным узлом обладают рекордным временным разрешением [161].

36 Разработка алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных, с целью улучшения эффективности отбора событий эксперимента по поиску 2К-захвата 124Xe

В ходе длительного набора экспериментальных данных наблюдается постепенная деградация характеристик детектора, обусловленная накоплением электротрицательных примесей в рабочем газе пропорционального счетчика. Этот процесс приводит к ухудшению энергетического разрешения и, что критично для данного эксперимента, к изменению формы импульсов. Ключевым проявлением данного эффекта является слияние отдельных кластеров ионизации в токовом сигнале, изначально разделенных во времени. В результате, события, соответствующие трём пространственно-разнесённым точкам взаимодействия (трёхточечные события), могут быть ошибочно реконструированы как двух- или одноточечные. Такая систематическая «перекачка» событий из целевой категории вносит значительную погрешность в оценку вероятности искомого процесса 2К-захвата и требует разработки корректирующих методов анализа. Текущая методология обработки одиночных импульсов представляет собой многоступенчатую процедуру. Первоначально проводится дифференцирование интегральной зарядовой формы сигнала с последующим математическим выделением тока первичных электронов за вычетом ионной компоненты. Для улучшения соотношения сигнал/шум и повышения чувствительности к слабым компонентам, очищенный токовый сигнал дополнительно обрабатывается цифровым фильтром Баттервортса. Финальным этапом реконструкции является аппроксимация профиля тока набором гауссиан, количество и параметры которых определяют классификацию события как одно-, двух-, трехточечного и т.д., где для поиска эффекта отбираются исключительно трёхточечные события. Для преодоления ограничений, накладываемых ухудшением качества данных, исследуется применение алгоритмов машинного обучения (МО). В качестве основы для обучения моделей подготовлен тестовый набор признаков, сформированный на основе калибровочных данных с источником ^{109}Cd . Набор включает как глобальные параметры исходного импульса (амплитуда, время нарастания), так и детальные характеристики, извлекаемые на этапе гауссовой аппроксимации: амплитуду, позицию и ширину каждой подобранной функции. Предполагается сравнительное тестирование классических алгоритмов supervised learning, в частности, методов Random Forest (Случайный лес), Support Vector Machine (Метод опорных векторов) и Logistic Regression (Логистическая регрессия). Целью является создание и валидация численного классификатора, способного устойчиво и с высокой точностью идентифицировать трехточечные события даже в условиях ухудшенного разделения кластеров, что позволит минимизировать систематическую ошибку и повысить надежность конечного физического результата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Задача "Построение новых теорий и моделей, предсказывающие существование частиц за рамками Стандартной Модели физики частиц"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

1.1 Акционоподобные частицы и эволюция звёзд в шаровых скоплениях

Реализован современный подход к поиску проявлений акционоподобных частиц в эволюции звёзд шаровых скоплений, основанный на точных данных Gaia DR3 и на уже существующих параметризациях влияния ALP на TRGB и горизонтальную ветвь. Показано, что даже при весьма консервативных допущениях данные не требуют заметных отклонений от стандартной эволюции, что позволяет установить самый строгий на сегодня предел на константу связи g_{ae} в предположении малых масс ALP. Напротив, анализ звёзд горизонтальной последовательности свидетельствует о том, что сценарий с нулевой связью ALP-фотон статистически менее предпочтителен, чем модель с ненулевым $g_{a\gamma}$ порядка нескольких $\times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$. Это значение хорошо согласуется с указаниями, полученными ранее из прозрачности Вселенной для очень высокоэнергичных гамма-квантов и из других звёздных индикаторов, но находится в напряжении с некоторыми более жёсткими, но модельно-зависимыми астрофизическими ограничениями. Главными источниками неопределённости теперь становятся именно звёздные эволюционные модели, а не наблюдательные данные. В более широком контексте работа демонстрирует, что шаровые скопления остаются мощной «лабораторией» для проверки новой физики при низких энергиях.

По результатам работы была опубликована статья [162].

1.2 Гипотетическое нарушение лоренц-инвариантности и “мюонная загадка” широких атмосферных ливней

Продемонстрировано, что аккуратно сформулированный сценарий сублюминального нарушения Лоренц-инвариантности в фотонном секторе способен, по крайней мере качественно, объяснить наблюдаемую избыточную мюонную компоненту в широких атмосферных ливнях. Основной физический механизм заключается не в прямом увеличении числа мюонов, а в подавлении электромагнитной компоненты через изменение сечения Бете–Гайтлера, что приводит к смещению реконструированной энергии ливня. Сравнение Монте-Карло моделирования с данными Pierre Auger Observatory позволяет не только построить правдоподобный сценарий, но и получить количественные ограничения на масштаб ЛИ-нарушения $M_{\text{ЛИ}}$, которые оказались примерно на порядок строже имеющихся в литературе. При этом выделяется область значений, где модель даёт наилучшее согласие с наблюдениями, оставаясь совмести-

мой с другими астрофизическими тестами. Предложенный механизм принципиально проверяем: будущие измерения ливней, индуцированных первичными фотонами сверхвысоких энергий, а также более детальные данные о мюонной компоненте ШАЛ способны либо подтвердить, либо отвергнуть такую интерпретацию мюонной загадки. Кроме того, подход легко обобщается на более сложные сценарии новой физики в ШАЛ.

По результатам работы была опубликована статья [163].

1.3 Новая физика и гамма-всплеск GRB 221009A

Выполнен первый количественный комбинированный анализ интегрированного по времени спектра GRB 221009A по данным LHAASO и Carpet-3 в контексте двух классов сценариев новой физики. Основной вывод состоит в том, что стандартное описание поглощения гамма-квантов на фоновых излучениях не способно удовлетворительно объяснить совокупность данных при разумном выборе внутреннего спектра источника. Сценарий досветового ЛИ-нарушения несколько улучшает согласие за счёт ослабления поглощения на больших энергиях, но остаётся мало чувствителен к тонкой структуре спектра. Напротив, сценарий со смешиванием фотон-ALP даёт качественно лучшее описание и позволяет одновременно объяснить как «провал» в спектре KM2A, так и существование события Carpet-3. В то же время наилучшие параметры ALP находятся в области, где уже существуют небольшие противоречия с некоторыми астрофизическими ограничениями, зависящими от плохо известных конфигураций космических магнитных полей. Это подчёркивает необходимость проведения дальнейших независимых лабораторных и астрофизических тестов ALP. Работа демонстрирует, что яркие астрофизические события, такие как GRB 221009A, становятся новым высокочувствительным инструментом для поиска проявлений новой физики.

По результатам работы была опубликована статья [164].

2 Задача "Обработка и анализ данных детектора LVD (Гран Сассо, LNGS) по исследованию мюонов под землей и естественной радиоактивности, как фона в экспериментах по поиску редких событий"

План по проведению работ в 2025 г. выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Детектор LVD является хорошим инструментом для исследований мюонов космических лучей, приходящих на глубину от 3 до 15 км в.э. По архивным данным зарегистрированных мюонов на детекторе LVD с 1999 по 2002 год исследовались характеристики множественных мюонных событий такие как величина суммарных энергетических потерь и их удельная величина на 1 счетчик в зависимости от угла и глубины грунта пройденного мюоном до регистрации в детекторе. Получено, что

при увеличении множественности мюонов в группе растет средняя величина суммарных энергетических потерь мюонов в детекторе, приведенная на один счетчик. Число множественных мюонов по отношению к одиночным мюонам увеличивается с глубиной. Мюонная загадка была сформулирована на основе результатов, полученных в различных экспериментах. Подземный эксперимент LVD может исследовать характеристики мюонов под большими углами и проходящих большие толщи грунта, и, следовательно, имеющих средние энергии от 280 ГэВ до 400 ГэВ и больше. Увеличение экспериментальной статистики LVD, а именно числа реконструированных мюонов, приходящих с больших углов, новыми разрабатываемыми в коллаборации методами и сравнение их с новыми моделями взаимодействия частиц позволит более детально изучить проблему мюонной загадки. Детектор LVD измеряет вариации скорости счета гамма-квантов от распада радона под землей. Мы провели сравнительный анализ данных установок LVD и LSD за одинаковый период. Были получены суточные и недельные вариации скорости счета гамма-квантов, которые отражают изменение концентрации радона в подземных помещениях, где расположены детекторы. Являясь одинаковыми по структуре и методу регистрации, установки отличаются фоновыми условиями и количеством модулей – счетчиков, из которых они состоят: LSD содержит 72 счетчика, LVD – 280 (на 1997 год). Сравнительный анализ данных двух установок подтверждает, что суточные и недельные вариации концентрации радона в подземных помещениях имеют техногенное происхождение и в значительной мере обусловлены устройством системы вентиляции в помещении. Эти результаты помогут разделить в переменной составляющей скорости счета гамма-квантов часть вариаций радона, связанную с техногенной деятельностью. Выбросы радона, не связанные с человеческой деятельностью и трафиком машин в туннеле могут быть ассоциированы с предвестниками землетрясений и помочь в их прогнозировании.

3 Задача "Анализ данных и моделирование различных фонов первого этапа проекта NEWSdm (Гран Сассо, LNGS) по поиску темной материи"

План по проведению работ в 2025 г. 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 поля и обеспечить однозначную сигнатуру обнаружения галактической темной материи. Так как основной проблемой в эксперименте является определение фона детектора, связанный с естественной радиоактивностью, то проведение моделирования и оценок

фона остается важной экспериментальной задачей NEWSdm. В 2025 году получены оценки потока гамма-квантов в экспериментальном зале и уточнены концентрации радиоактивных изотопов скального грунта Гран Сассо.

4 Задача «Поиск нарушения СР-инвариантности и измерение сечений взаимодействия нейтрино и антинейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280 в ускорительном эксперименте с длинной базой Т2К»

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В 2025 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 СР-нарушающей фазы) и иерархии масс нейтрино.

Всего с начала 2010 г. по конец 2025 г. в T2K проведено 15 сеансов с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Новые сеансы по набору статистики проходили в феврале-марте 2025 г. (№14) и в ноябре-декабре 2025 г. (№15).

Был проведен обновленный анализ данных, набранных в ходе предыдущих сеансов (№№1-11), в котором удалось уменьшить систематические ошибки, связанные с дальним детектором. Получены и опубликованы в журнале Nature результаты совместного анализа T2K-NOvA. Получены и опубликованы результаты измерений сечений взаимодействия мюонных и электронных нейтрино в веществе как ближнего детектора ND280, так и дальнего детектора SK.

5 Задача «Изучение редких распадов каонов в экспериментах NA62 (ЦЕРН) и ОКА (ИФВЭ, Протвино)»

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В 2025 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 2025 г. был продолжен анализ данных, набранных в 2023–2024 гг., и была проведена реинтерпретация измерения вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в рамках процесса $K^+ \rightarrow \pi^+ X$. Получены новые лучшие в мире ограничения на параметры различных расширений Стандартной модели.

В 2025 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. Продолжается анализ данных для различных мод распада положительных каонов.

6 Задача "Проведение физического пуска эксперимента JUNO, настройка и отладка его детекторных элементов"

План по проведению работ в 2025 г. выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Выполнен физический запуск эксперимента JUNO. Все детекторы, составляющие эксперимент JUNO функционируют в полном объеме, с высокой эффективностью и стабильностью. Эффективность регистрации мюонов системой детекторов вето составляет 99,98%. Длина ослабления света в водном черенковском детекторе вето составляет ~ 75 м. Проведен полный цикл калибровочных измерений всех детекторов эксперимента. За первые 60 дней экспозиции в эксперименте измерены с рекордной точностью параметры нейтринных осцилляций θ_{12} и Δm_{21}^2 :

$$\sin^2 \theta_{12} = 0,3092 \pm 0,0087; \quad \Delta m_{21}^2 = (7,50 \pm 0,12) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2.$$

Результаты работ опубликованы в статьях [165, 166, 167, 168, 169, 170, 171].

7 Задача "Поиск двойного безнейтринного бета распада ^{76}Ge в составе международной коллаборации GERDA"

План по проведению работ в 2025 г. выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Целью международного эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа ^{76}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 2025 году получены и опубликованы новые результаты. 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.

8 Задача "Увеличение точности измерения угла смешивания тэта-13 осцилляций нейтрино в канале электронные нейтрино - таонные нейтрино в эксперименте Double Chooz. - Использование антинейтринных спектров, полученных в эксперименте Double Chooz, для отработки метода вычисления антинейтринных спектров для реакторов с другим составом топлива"

План по проведению работ в 2025 г. 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 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.

Сечение реакции ОБР, полученное на основе расчетных спектров при составе активной зоны реактора Double Chooz $\sigma_f = 5.70 \times 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$, хорошо совпадает с экспериментальным сечением Double Chooz $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \times 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$ [7]. Отличие в расчетном и экспериментальном сечениях может объясняться дополнительным вкладом в экспериментальное сечение антинейтрино от бассейнов-отстойников с отработанным топливом.

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

План по проведению работ в 2025 г. выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Проведено два сеанса измерений энергетического спектра бета-электронов от распада трития. Обработаны все сеансы, проведённые в 2024-2025 гг. Набранная статистика показала, что процедура обработки спектров и учёт различных поправок правильен. Полученный предварительный результат по оценке верхних пределов на элемент в матрице смешивания лучше опубликованных мировых данных. Для завершения обработки необходима оценка всех систематических ошибок, а также выяснение возможных аппаратных причин появления дополнительной компоненты в измеряемых спектрах, которые могут имитировать наличие реальной компоненты от стерильных нейтрино с массой 5,5 кэВ. В течение года проводилась модернизация

отдельных частей вакуумной и криогенной аппаратуры, вакуумных стендов. Продолжено развитие программного обеспечения.

10 Задача "Поиск безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo в составе международной коллаборации AMoRE"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Окончен анализ данных, полученных на этапе AMoRE-I. Обработка данных проводилась для 17 детектирующих кристаллов, включавших 13 образцов $^{48}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и 4 образца $^{nat}\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Суммарная экспозиция составила 8 кг·лет для XMoO_4 (по всем кристаллам), что соответствует 3.88 кг·лет для изотопа ^{100}Mo . На основе этих данных установлен нижний предел периода полураспада безнейтринного двойного бета-распада ^{100}Mo : $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 2,9 \cdot 10^{24}$ лет (90% У.Д.) [100]. Соответствующее ограничение на эффективную массу Майораны, оцененное с использованием ядерных матричных элементов в рамках ряда моделей (включая новейшие расчёты оболочечной модели), находится в интервале $m_{\beta\beta} < (210 - 610)$ мэВ. Настоящий результат является наиболее строгим ограничением для ^{100}Mo и превосходит предыдущий результат полученный коллаборацией CUPID-Mo - $T_{1/2}^{0\nu2\beta} > 1,8 \cdot 10^{24}$ лет (90% У.Д.) [101].

Параллельно с основной задачей поиска безнейтринного двойного бета-распада Mo-100 [100], изучается возможность использования набора данных AMoRE-I для поиска сигналов от солнечных аксионов, рожденных ядром лития-7 (^7Li). Для поиска событий резонансного поглощения аксионов на ядрах ^7Li используются пять модулей детектора AMoRE-I с кристаллами $^{nat}\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Эти пять кристаллов имеют общую массу 1,610 кг и содержат приблизительно $1,03 \cdot 10^{25}$ ядер ^7Li . При ожидаемой энергии 478 кэВ не было обнаружено статистически значимого превышения сигнала. В результате было предварительная оценка на верхнюю границу для массы аксиона (чувствительность), полученную методом резонансного поглощения на ядрах ^7Li на установке AMoRE-I:

$$m_\alpha < 7,4 \text{ кэВ} \quad (90\% \text{ У.Д.})$$

По результатам работы готовится публикация.

Проведен детальный анализ всех возможных источников фона, который может имитировать сигнал $0\nu\beta\beta$ в области интереса (ROI – Region Of Interest) вокруг $Q_{\beta\beta} \approx 3034$ кэВ в эксперименте AMoRE-II. Проведено тщательное моделирование с использованием методов Монте-Карло, учитывающее следующие компоненты: внутренний фон, внешний фон, фон от двойного двухнейтринного бета-распада

$(2\nu\beta\beta)$. Т.о. ожидаемый суммарный фон от всех компонент в ROI будет составлять $< 1.0 \times 10^{-4}$ событий/кэВ/кг/год. На основе полученных данных была подготовлена публикация “Projected background and sensitivity of AMoRE-II” [102].

В рамках будущего эксперимента AMoRE-II по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{100}Mo успешно завершена разработка криогенных калориметров на основе кристаллов молибдата лития (LMO-кристаллы). Ключевым элементом детекторов являются сенсоры на принципе металлических магнитных калориметров, наносимые непосредственно на поверхность кристаллов методом тонкопленочной технологии. Испытания прототипов подтвердили достижение энергетического разрешения 5–10 кэВ на линии 5–6 МэВ при рабочей температуре 10–20 мК, что соответствует требованиям эксперимента. Технология демонстрирует высокую воспроизводимость параметров и готова к масштабированию для создания детекторной системы общей массой около 100 кг ^{100}Mo . Результаты представлены в статье [172].

11 Задача "Поиск темных фотонов с помощью мультикатодного счетчика"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Полученные результаты вошли в мировую компиляцию данных по свойствам элементарных частиц (Particle Data Group) в 2022 году. По результатам измерений в 2023–24 гг. суточных вариаций скорости счета одиночных электронов наблюдали 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 солнечных сутках подобного эффекта не наблюдается. Вероятность, что в первой серии эффект есть результат чисто статистической флюктуации равен 7.6×10^{-10} , что соответствует достоверности выше 6σ . Для второй серии эта вероятность равна 9.1×10^{-6} , что соответствует достоверности выше 4σ . Для получения доказательной базы подключили к измерениям второй счетчик с алюминиевым катодом. В третьей серии измерений в 2024–25 гг. с двумя счетчиками эффект не наблюдался ни в звездных, ни в солнечных сутках что доказывает, что избыток, наблюдаемый в первых двух сериях, нельзя объяснить чисто инструментальным эффектом. Данные, полученные в третьей серии, показывают, что выбранный нами критерий (наблюдение избытка во всех четырех ранах в одном и том же временном интервале в звездной системе и его отсутствие в солнечной системе) является действительно сильным, тем самым подтверждается надежность выбранной методики. Результаты трех серий согласуются с гипотезой о пространственной «грануляции» темной материи, приводящей к эпизодическому появлению предсказанного направленного сигнала по мере движения Солнца в Галактике. Различие во времени избытка между первой и второй

сериями также поддерживает эту идею. Для подтверждения или опровержения данной гипотезы необходимо продолжать измерения. По результатам 2024–25 гг. опубликована статья в журнале Ядерная Физика [123] и статья в журнале Приборы и Техника Эксперимента [113].

Заштили патент на изобретение RU 2850412 [173]. Техническим результатом изобретения является увеличение крэффициента газового усиления более, чем в сто раз. Также получено существенное увеличение энергетического разрешения газового счётчика при счёте одноэлектронных импульсов. Изобретение используется при поиске тёмных фотонов с помощью мультикатодного счётчика

12 Задача "Получение новых ограничений на легкую темную материю в эксперименте NA64"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В 2025 году участники эксперимента NA64 в рамках общей исследовательской программы эксперимента успешно провели восьминедельный сеанс набора данных в апреле-июне на электронном пучке H4 ускорителя SPS на установке NA64e. В результате сеанса на канале H4 ускорителя SPS на установке NA64e в течение мая – июня 2025 г. было набрано около $5,9 \times 10^{11}$ электронов на мишени. Предварительные результаты анализа данных свидетельствуют об их хорошем качестве и отсутствии фона, связанного с электророждением адронов в канале. Важной целью эксперимента 2025 года было изучение повышения уровня герметичности детектора и подавления фонового излучения путем установки дополнительного, второго модуля вето-калориметра VHCAL, идентичного тому, который использовался в эксперименте 2023 года, и сравнение результатов с подробным МК-моделированием (статья [129]).

13 Задача "Усовершенствование математического аппарата много-петлевых вычислений в квантовой теории поля, и предложение представления ренорм-инвариантных величин в виде ряда теории возмущений. Альтернативный подход к перенормировкам в КТП"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В работе [16] 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.

По результатам работы была опубликована статья [16]. Кроме того уравнения Каллана-Симанчика были получены на полностью перенормированном языке, что позволило, в свою очередь, выяснить, что данная система дифференциальных уравнений эквивалентна стандартному ренорм-групповому уравнению, но только в схеме перенормировки массы на массовой поверхности. По результатам этой работы был опубликован архив [17], работа находится на рецензировании в международном журнале EPJC.

14 Задача "Получение ограничений на параметры моделей ранней Вселенной из сравнения предсказаний с современными наблюдательными данными. Первичные негауссости в модели ранней Вселенной со сжатием"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В работе [131] в модели сжимающейся Вселенной с сильной гравитацией в прошлом, построенной в [133], была вычислена негауссовость для первичных скалярных возмущений, или, более точно – нелинейный параметр f_{NL} негауссости, и найдены новые условия на параметры модели из соответствующих наблюдательных данных [23] и [24]. Из результатов работы [131] можно сказать, что модель вполне жизнеспособна. Однако, можно провести и еще более аккуратный анализ формы биспектра, уточнив таким образом еще лучше ограничения на параметры модели. По результатам работы была опубликована статья [131].

15 Задача "Исследование модели двух массивных скалярных полей с разными скоростями звука"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В работе [174] было получено обобщение оптической теоремы или, другими словами, соотношение унитарности для теории, которая включает в себя несколько скалярных действительных полей с нестандартным дисперсионным соотношением: были рассмотрены два массивных скалярных поля, у которых также есть не нулевые и не равные единице, различные для обоих полей скорости звука. В лагранжиан такой теории было также добавлено самодействие полей $\langle\phi_1^4 + \phi_2^4\rangle$ и взаимодействие этих полей $\langle\phi_1^2\phi_2^2\rangle$; были рассмотрены два возможных случая для промежуточного (например в петле) состояния: случай различимых и неразличимых частиц. Соответствующая модификация соотношения унитарности включает нетривиальный коэффициент, содержащий скорости звука обоих полей и информацию о дисперсион-

ном соотношении. Для той же теории было получено унитарное ограничение. Такие ограничения находят сегодня широкое применение в физике высоких энергий, в космологии, в физике твердого тела и тд, и позволяют оценить применимость теории на рассматриваемых масштабах энергий. Был получен однопетлевой эффективный потенциал для такой теории двух массивных полей с разными скоростями звука. Выделение расходимостей и перенормировка такого однопетлевого потенциала были сделаны в MS-bar схеме. По результатам этой работы был опубликован архив [174].

16 Задача "Построение моделей ранней Вселенной, альтернативных инфляционным, с модифицированным гравитационным сектором Хорндески. Возмущения над сферически-симметричным фоном в скалярно-тензорных теориях"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В работе [175] в L3 подклассе теории Хорндески было построено квадратичное действие для скалярных возмущений и найдены условия отсутствия духовых и градиентных неустойчивостей. Это позволило сформулировать и доказать теорему, запрещающую полностью устойчивые несингулярные решения.

В работах [176, 177] были построены возмущения в нечетном секторе, найдены условия устойчивости и скорости звука для расширенной теории Хорндески и для теории Хорндески с дополнительным модифицированным векторным полем. Это исследование расширяет прежний анализ статических и однородных фонов на случай произвольных зависящих от времени сферически-симметричных геометрий и одновременно подтверждает, что стандартные соотношения, мотивированные зарегистрированным событием GW170817, обеспечивают световую скорость гравитационных волн даже в сильно неоднородных режимах. Предварительное исследование четных мод дополнительно указывает на согласованную идентификацию обеих поляризаций гравитона и фотона.

Таким образом, совокупные результаты проясняют, как требования устойчивости, запрещающая теорема и экспериментальные ограничения на скорости волн совместно формируют пространство жизнеспособных моделей модифицированной гравитации со скалярными и векторными степенями свободы и предоставляют технический инструментарий для дальнейших исследований конкретных динамических сценариев — таких как гравитационный коллапс, компактные объекты и несингулярные космологии в этих теориях.

17 Задача "Скалярно-векторно-тензорные теории со старшими производными в действии"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Исследования скалярно-векторно-тензорных теорий, проведенные в работах [178, 179, 180] предоставили дополнительные возможности для феноменологии темной энергии, расширив класс теорий, проходящих экспериментальные тесты.

Так, в работе [178] была построена скалярно-векторно-тензорная теория со старшими производными в действии при помощи компактификации Калуцы-Клейна для теории Хорндески из пятимерия. В этой теории для любых функций из подкласса L4 выполняется условие равенства скоростей гравитона и фотона.

В работе [179] подобная процедура была рассмотрена уже для расширенной теории Хорндески и для общей вырожденной теории со старшими производными в действии. Это позволило дополнительно расширить класс допустимых теорий, а также одновременно с равенством скоростей удовлетворить условию нераспада гравитона - т.е. малости вершины взаимодействия гравитона со скалярами.

В статье [180] была построена максимально общая скалярно-векторно-тензорная теория вплоть до квадратичного порядка по вторым производным уже без использования редукции Калуцы-Клейна. Кроме того, был определен максимально общий ее подкласс, в котором гравитон имеет ту же скорость, что и фотон. Это позволило получить максимально общую скалярно-векторно-тензорную теорию, естественным образом удовлетворяющую наблюдениям GW170817

18 Задача "Проверка моделей с лёгкими гипотетическими частицами на действующих планируемых установках с фиксированной мишенью. Учёт вкладов ЭФ Паули в рождение тёмных фотонов в процессе неупругого тормозного излучения"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В процессе работы над проектом были изучены новые вклады в неупругое тормозное излучение, связанные с ЭФ Паули в вершине $pp\gamma'$. В квазиреальном приближении впервые получены две вспомогательные функции расщепления. Используя два набора ЭФ Дирака и Паули [135, 136], было показано, что новые слагаемые оказываются существенными вне зависимости от выбора фита. Также были обновлены оценки чувствительности экспериментов T2K, DUNE и SHiP к видимым распадам тёмных фотонов и показано, что наш подход значительно меняет области масс тёмных фотонов, доступные для исследования в данных экспериментах. Результаты опубликованы в работах [134, 137].

19 Задача "Численный анализ таяния доменных стенок и образования ими гравитационных волн"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Наклон инфракрасного хвоста полученного спектра образуемых тающими доменными стенками гравитационных волн оказался даже несколько более пологим, чем ожидалось из аналитических оценок. Этот результат ещё лучше согласуется с предсказаниями эксперимента NANJGRAV: возможно именно тающие доменные стенки образовали гравитационные волны, чьё влияние в современной Вселенной мы видим как запаздывание сигнала от миллисекундных радиопульсаров.

По результатам работы была опубликована статья [37].

20 Задача "Изучение образования и аннигиляции доменных стенок в моделях со слабо нарушенной дискретной симметрией"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Было обнаружено отличие численных расчётов от аналитических оценок: время жизни доменных стенок масштабируется как корень третьей, а не второй, степени из величины относительного вырождения энергий вакуумов. Таким образом доменные стенки живут дольше, чем ожидалось, что существенно меняет разрешённые области параметров многих моделей с явным нарушением дискретных симметрий, равно как и предсказания спектров гравитационных волн в этих моделях. Заметные области модельных параметров оказываются запрещёнными, поскольку доменные стенки выходят на доминирование в ранней Вселенной.

По результатам работы была опубликована статья [38].

21 Задача "Построение моделей рождения и распространения излучения, согласующихся с результатами астрофизических экспериментов. Поиск фотонной линии от аннигиляции тёмной материи с массой кэВ-диапазоне с помощью NuSTAR: ограничения на $\langle\sigma v\rangle$ по итогам 11 лет наблюдений"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В работе выполнен анализ 11-летнего архива наблюдений космической рентгеновской обсерватории NuSTAR в режиме рассеянного излучения с целью поиска монохроматических линий, возникающих при аннигиляции частиц тёмной материи кэВ-масштаба. Сформирован массив данных с суммарной экспозицией порядка 234 Ms и широким покрытием неба на средних и высоких галактических широтах. Реализована процедура обработки наблюдений, включающая маскирование фокусированных источников и детальный контроль инструментального фона. На основе построенной модели астрофизического рентгеновского фона проведен систематический поиск

узких спектральных линий в диапазоне энергий 3-20 кэВ. Статистически значимого сигнала (95% доверительный интервал), который можно было бы интерпретировать как проявление аннигиляции тёмной материи, не обнаружено. Полученные результаты позволили установить новые верхние пределы (95% доверительный интервал) на эффективное сечение s-волновой аннигиляции. Эти ограничения являются одними из наиболее строгих в рентгеновском диапазоне энергий и существенно сужают область допустимых параметров моделей лёгкой аннигилирующей тёмной материи, демонстрируя высокую эффективность использования NuSTAR для задач непрямого поиска темной материи.

Работа опубликована в реферируемом журнале [181].

22 Задача "Ограничения на нарушение Лоренц-инвариантности нейтрино"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Проведен анализ ограничений на нарушение Лоренц-инвариантности в нейтринном секторе на основе события КМ3-230213А. Показано, что наиболее сильные ограничения следуют из требования отсутствия нейтринного расщепления. Для консервативной оценки принят сценарий внегалактического происхождения, дающий ограничения $\Lambda_{n=1} = 1.1 \times 10^{30}$ ГэВ и $\Lambda_{n=2} = 1.1 \times 10^{19}$ ГэВ. Эти результаты значительно улучшают предыдущие ограничения и демонстрируют потенциал ультравысокоэнергетических нейтринных событий для тестирования фундаментальных принципов физики. Для получения более точных статистически значимых ограничений необходимы модели галактических, внегалактических или космогенных источников, а также точный расчет энергетических потерь нейтрино.

Работа опубликована в реферируемом журнале [182].

23 Задача "Новый галоскоп для поиска аксионной темной материи."

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Предложен перспективный эксперимент по поиску аксионной темной материи с беспрецедентной чувствительностью. Основные инновации включают использование однофотонных детекторов, преодолевающих стандартный квантовый предел, и оптимизированной системы перестройки частоты резонатора. Проект CASH позволит исследовать массовый диапазон 38-54 мкэВ с чувствительностью, достаточной для проверки основных моделей QCD-аксионов. При использовании магнитного поля 10 Тл ожидается достижение чувствительности в два раза лучше предсказаний модели DFSZ. Дальнейшее развитие проекта может включать многокамерные резонаторы для расширения исследуемого диапазона масс.

Работа опубликована в реферируемом журнале [183].

24 Задача "Резонансная генерация стерильных нейтрино в ранней Вселенной с ненулевой лептонной асимметрией"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Выполненная работа позволяет существенно расширить допустимую область параметров стерильных нейтрино как кандидата на тёмную материю. Было показано, что ограничения на угол смешивания θ из BBN можно существенно ослабить, если начальная лептонная асимметрия распределена так, что суммарная асимметрия мала.

Также было установлено, что исчезновение асимметрии в процессе резонансного производства приводит к заметному охлаждению спектра стерильных нейтрино, позволяя допустить меньшие массы тёмной материи, чем предсказывали стандартные сценарии.

Таким образом, оба основных ограничения — BBN и формирование малых структур — оказываются значительно мягче при определенных конфигурациях асимметрий. Итог — существует новое окно параметров, где стерильные нейтрино позволяют объяснить темную материю при малых смешиваниях и меньших массах. Настоящий этап работы направлен на точное определение нижней границы θ при разных паттернах асимметрий, что позволит определить предельные значения параметров модели.

По результатам работы была опубликована статья [184].

25 Задача "Построение квазиклассических методов описания непертурбативных процессов в Бозе звездах. Самоподобная гравитационная конденсация Бозе–Эйнштейна"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В данной работе мы предложили самоподобную кинетику для перенаселенного газа гравитационно взаимодействующих бозонов, окружающих каплю конденсата Бозе–Эйнштейна — Бозе–звезду. Наш подход основан на наблюдении, что кинетическое уравнение для такого газа является масштабно–инвариантным если газ пространственно однороден, а гравитационное рассеяние его частиц описывается интегралом Ландау. Симметрия плюс возможность обмена частицами/энергией с конденсатом обеспечивают существование семейства самоподобных кинетических решений с произвольными конформными размерностями D . Последние решения описывают конденсацию газа при $2 < D < 3$ и увеличение его массы (испарение конденсата)

при $D > 3$. Мы исследовали все возможные профили решений: как стабильные, с профилями Рэлея–Джинса, так и нестабильные.

Важно, что наши автомодельные решения играют роль «нетермальных аттракторов» для кинетической эволюции, которая приближается к ним независимо от начальных данных. Более того, эволюция остается приблизительно самоподобной даже если в кинетическом уравнении явно нарушена масштабная инвариантность. В этом новом режиме адиабатического самоподобия функция распределения остается близкой к самоподобным профилям на протяжении всей эволюции, а конформная размерность последних $D = D(t)$ медленно дрейфует со временем. Используя этот режим, мы получили закон роста массы Бозе–звезды за счет конденсации частиц темной материи из окружающего газа, см. также [138].

По результатам работы опубликована статья [42].

26 Задача "Новая физика в широких атмосферных ливнях"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Найдены ограничения на пространство параметров суперсимметричной модели с низкомасштабным нарушением суперсимметрии и лёгкими сколдстинами с массами суб-ГэВ и моделей с легкими аксионо-подобными частицами из результатов по осцилляциям атмосферных нейтрино в Супер-Камиоканде. Рассмотрено несколько вариантов образования новых частиц: в распадах каонов и в смешивании с нейтральными легкими нейтральными мезонами. Предполагается, что образующиеся новые частицы распадаются в пару фотонов в детекторе. Также проведена оценка чувствительности эксперимента Гипер-Камиоканде к такого рода поискам и показано, что этот эксперимент будет чувствителен к областям пространства параметров, рассмотренных моделей, еще разрешенных прямыми поисками.

По результатам работы была опубликована статья [139].

27 Задача "Нетопологические солитоны в эффективной теории поля"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В рамках проекта изучалась роль релятивистских поправок в изучении устойчивости $(1+1)$ и $(2+1)$ -мерных нетопологических солитонов со специальным потенциалом самодействия в пределе низких энергий. Такие решения обладают особой стабильностью по отношению к линейным возмущениям: их спектр содержит только нулевые моды. Данный результат объясняется симметриями полной группы Шрёдингера в нерелятивистском пределе [185]. Масштабная инвариантность обеспечивает дополнительное вырождение, позволяющее получить точные результаты для энергии

и углового момента стационарных классических решений. При слабом нарушении конформной симметрии релятивистскими поправками наблюдается появление экспоненциально растущих мод на фоне солитонов, которые в нерелятивизме переходят в нулевую моду $U(1)$ симметрии.

По результатам работы были опубликованы статьи [186, 187, 188].

28 Задача "ЕМС-эффект в ядрах ^3H и ^3He из данных эксперимента MARATHON"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Эксперимент MARATHON предоставил первые прецизионные данные по ЕМС-эффекту для трития и расширил измерения для гелия-3 в область больших x . Результаты подтверждают, что наблюдаемые ядерные эффекты в лёгких ядрах в области валентных кварков могут быть объяснены в рамках подхода [140], учитывавшего эффект усреднения с импульсным распределением связанных нуклонов и их энергий связи, а также универсальную модификацию партонной структуры связанных протонов и нейтронов вне массовой поверхности. Новые данные станут важным вкладом в изучение партонной структуры лёгких ядер и проверку теоретических моделей ядерных эффектов в валентной области.

По результатам работы была опубликована статья [189].

29 Задача "Корреляция между ядерными поправками и высшими твистами в глобальном КХД-анализе"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Проведён глобальный КХД-анализ с включением ГНР-данных на дейтерии из различных экспериментов и новых данных на трехнуклонных ядрах трития и гелия-3 эксперимента MARATHON [57]. Исследованы корреляции между моделями высших твистов и функциями характеризующими модификацию СФ связанных нуклонов из-за эффекта схода с массовой поверхности в рамках подхода [140]. Показано, что вся совокупность имеющихся экспериментальных данных хорошо согласуется с аддитивной моделью высших твистов (aHT) и универсальной функцией внemассовости $\delta f^p = \delta f^n$ связанных нуклонов. В результате анализа, получены точные предсказания для отношений СФ F_2^n/F_2^p и ПФР d/u в протоне, вычислены индивидуальные поправки для ПФР u - и d -кварков в лёгких ядрах и исследована их зависимость от аромата кварков. Подчеркивается важность учёта ароматной зависимости ядерных эффектов для интерпретации результатов планируемых экспериментов с нарушением чётности и измерением γZ -интерференции (SoLID эксперимент в JLab) и экспериментов на будущем электрон-ионном коллайдере.

По результатам работы была опубликована статья [190].

30 Задача "Изучение физических процессов и нелинейных структур в эпоху до реионизации Вселенной при наличии возмущений плотности разного типа"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Излучение первых звезд, образующихся до эпохи реионизации Вселенной, уменьшает спиновую температуру нейтрального водорода, что приводит к усилению поглощения реликтового излучения в линии 21 см. Выполненное в данной работе сравнение космологических моделей с дополнительным максимумом (бампом) в спектре возмущений плотности и без него показывает, что по положению и форме частотного профиля поглощения можно получить информацию о спектре космологических возмущений плотности. Для анализа использовались результаты численного моделирования методом N -тел. В ближайшем будущем ожидается ряд новых радиоастрономических наблюдений в метровом диапазоне длин волн на различных радиотелескопах. Если эти наблюдения позволяют достаточно точно выявить яму поглощения и охарактеризовать ее границу, то это даст ценную информацию о форме спектра космологических возмущений плотности в ранней Вселенной. На данном этапе, однако, этот метод может давать лишь некоторые качественные и неокончательные выводы из-за наличия больших теоретических неопределенностей, связанных с образованием первых звезд.

Необычная структура скопления галактик Abell 520 пока остается загадкой. Оно обладает высокой концентрацией массы, которая проявляется в слабом гравитационном линзировании, не связанном с концентрацией барионной материи. Образование такой структуры в результате столкновения двух скоплений объяснить сложно. В рамках данной темы мы предположили, что большую концентрацию массы создает сторонний объект – движущаяся космическая струна или ее петля. Из-за быстрого перемещения темная материя (ТМ) не может накапливаться вокруг струны, что объясняет недостаточную концентрацию галактик в массивном ядре. В то же время, это может создавать слабые эффекты линзирования. Возможно, что мы наблюдаем редкое событие, при котором струна проходит в поле нашего зрения в направлении Abell 520. Космические струны почти неизбежно рождались в ранней Вселенной во время фазовых переходов. Нельзя исключать, что космические струны, несмотря на их редкость, могут быть ответственны за некоторые отдельные астрофизические и космологические явления.

По результатам работы была опубликована статья [148].

31 Задача "Исследование первичных черных дыр в ранней Вселенной и в современную эпоху"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В рамках данной темы исследовано слияние двойных сверхмассивных первичных черных дыр (ПЧД) в эволюционирующем гало темной материи (ТМ). Если ПЧД составляют лишь малую долю всей ТМ, а остальная ее часть состоит, например, из элементарных частиц, то вокруг пары ПЧД неизбежно должно образовываться и нарастать со временем массивное гало из ТМ. Выполненный расчет эволюции орбиты пары ПЧД показал важность учета потока ТМ из окружающего гало через область орбиты не только в случае ПЧД звездных масс (как было показано в предшествующей работе [63]), но и для двойных сверхмассивных ПЧД, если такие пары могли формироваться в ранней Вселенной. В результате несферичности сжатия слоев ТМ имеется непрерывный поток ТМ через центр гало. Пролеты ТМ влияют на эволюцию орбиты пары черных дыр, отбирая энергию орбитального движения. Этот эффект приводит к ускоренному сжатию орбиты пары ПЧД и уменьшению времени до слияния черных дыр. Это, в свою очередь, приводит к увеличению темпа гравитационных всплесков, сопровождающих слияния черных дыр, и может иметь значения для гравитационно-волновой астрономии. В частности, данным механизмом можно объяснить наблюдения Nanograv, если существует детерминированный механизм образования пар ПЧД, например механизм Рубина–Сахарова–Хлопова с фрагментирующими и коллапсирующими доменными стенками.

По результатам работы была опубликована статья [191].

32 Задача "Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучками мюонных нейтрино"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

В случае обратной иерархии масс совместный анализ данных нейтринных экспериментов NOvA и T2K подтверждает нарушение CP-инвариантности в лептонном секторе. В настоящее время не видно убедительных указаний ни на одно из массовых упорядочений. Следовательно, будущие измерения иерархии масс повлияют на интерпретацию этих результатов. Новые ограничения на параметры осцилляций в стерильные нейтрино исключают некоторые области значений этих параметров, которые не были исключены другими экспериментами. Были получены самые строгие ограничения на аномальное появление тау нейтрино в пучках мюонных нейтрино. Результаты измерений двойного дифференциального инклузивного сечения рассея-

ния нейтрино со средней энергией 1,8 ГэВ на ядрах углерода будут способствовать разработке более точных моделей для $2p2h$ реакций.

33 Задача "Прецизионное измерение параметров редких распадов B -мезонов в эксперименте LHCb, прецизионное измерение параметров СР-нарушения"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Разработан новый алгоритм для определения аромата нейтральных B -мезонов в момент их рождения в pp -столкновениях, использующий все треки столкновения. Его обучение проводится отдельно для мезонов B^0 и B_s^0 с использованием нейронной сети DeepSets. Выходные данные классификатора калибруются с помощью распадов $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ и $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$, зарегистрированных экспериментом LHCb в pp -столкновениях при энергии 13 ТэВ. Алгоритм был применен к экспериментальным данным и данным, полученным при моделировании. Было установлено, что его эффективность зависит от кинематических переменных B -мезона и переменных события, таких как множественность треков и вершин распада, таким же образом, как и у комбинации используемых ранее в эксперименте LHCb алгоритмов детектирования. Алгоритм обеспечивает эффективность детектирования параметров B -мезонов, которая превосходит комбинацию ранее существующих алгоритмов детектирования на относительные 35% для мезонов B^0 и 20% для мезонов B_s^0 . В результате ожидается сокращение статистической погрешности измерений параметров нарушения СР-инвариантности приблизительно на 10%.

Статья опубликована в реферируемом журнале [192].

34 Задача "Изучение характеристик КФЭУ для адронного калориметра высокой гранулярности. Обработка и анализ данных, полученных в эксперименте CMS в 2024-2025 годах"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Коллектив Института ядерных исследований Российской академии наук активно занимался проектированием и изучением кремниевых фотоумножителей (КФЭУ) в рамках модернизации комплекса CMS. Специалистами института были разработаны и собраны специализированные автоматизированные испытательные стенды, позволяющие с высокой точностью определять ключевые параметры КФЭУ. Среди них: коэффициент усиления, квантовая эффективность, быстродействие, уровень шумов, ёмкость, последовательное сопротивление и линейность отклика. В ходе работ были протестированы многочисленные прототипы датчиков, исследована их устойчивость к радиации, а также стабильность функционирования в условиях повышен-

ных температур и влажности. Полученные данные углубили знания о физике работы кремниевых фотоумножителей и позволили усовершенствовать их конструкцию для надёжной работы в условиях Большого адронного коллайдера (БАК).

Ключевой вывод проведённых испытаний облучённых образцов заключается в том, что все тестируемые КФЭУ сохраняют работоспособность после получения суммарной дозы облучения, эквивалентной той, которую они накопят за время эксплуатации в детекторе. При этом такие важнейшие параметры, как темновой ток и фототок, у облучённых приборов остаются в пределах заданных технических требований.

35 Задача "Разработка фотодетекторов и сцинтилляционных детекторов для проектируемых калориметров эксперимента СЕРС"

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Разработаны и созданы специализированные измерительные стенды для исследования оптических и сцинтилляционных параметров тяжелых барий, свинец, гадолиний, галлий содержащих сцинтилляционных кристаллов и керамик, а также сцинтилляционных стекол. Исследования параметров первых образцов тяжелых сцинтилляторов (кристаллов и керамик) и сцинтилляционных стекол демонстрируют их высокую перспективность для использования в проектируемых калориметрах СЕРС. Разработаны и созданы специализированные измерительные стенды для исследования параметров быстродействующих вакуумных фотоумножителей как классических, так и фотоумножителей с микроканальными пластинами, а также кремниевых фотоумножителей. Исследования опытных образцов быстродействующих фотоумножителей с микроканальными пластинами с прямой фокусировкой фотоэлектронов и модифицированным анодным узлом показывают рекордное временное разрешение. Многообещающими для использования в проектируемых калориметрах СЕРС выглядят и результаты исследований классических вакуумных и кремниевых фотоумножителей.

36 Задача "Разработка алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных, с целью улучшения эффективности отбора событий эксперимента по поиску 2К-захвата ^{124}Xe "

План работ на 2025 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}Xe исследуется возможность применения алгоритмов машинного обучения для обработки экспериментальных данных. Одной из проблем при работе с этими данными является деградация их качества

из-за постепенного накопления примесей в детекторе, что приводит к критическому для анализа слиянию кластеров в импульсах и систематическому искажению отбора целевых трехточечных событий. Разработанная классическая методика обработки, основанная на восстановлении тока первичных электронов и гауссовой аппроксимации, достигает своих пределов в этих условиях.

В качестве принципиального решения данной проблемы предложен и начат переход к применению методов машинного обучения. Создание обширного набора признаков на основе калибровочных данных и планируемое сравнительное исследование классических алгоритмов (Random Forest, SVM, Logistic Regression) направлено на создание более устойчивого и точного классификатора событий. Успешная реализация этого подхода позволит не только скорректировать систематическую ошибку текущих данных, но и повысить общую эффективность анализа, что является ключевым шагом для достижения конечной цели эксперимента — установления или улучшения предела на вероятность процесса 2К-захвата и получения новых данных о свойствах нейтрино и ядерной физики. Дальнейшая работа будет сосредоточена на валидации и оптимизации алгоритмов машинного обучения для их интеграции в стандартный цикл обработки данных установки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The large-volume detector (LVD) - a multipurpose underground detector at Gran Sasso / G. Bari, M. Basile, G. Bruni [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1989. — Vol. 277, no. 1. — P. 11–16. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900289905299>.
2. Characterization of the varying flux of atmospheric muons measured with the Large Volume Detector for 24 years / N. Yu. Agafonova, M. Aglietta, P. Antonioli [et al.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Sep. — Vol. 100. — P. 062002. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.100.062002>.
3. Petrukhin A. A. Muon Puzzle in Cosmic Rays and Its Possible Solution // Physics of Atomic Nuclei. — 2021. — Vol. 84. — P. 92–99. — <https://doi.org/10.1134/S1063778821010142>.
4. Massey R., Kitching T., Richard J. The dark matter of gravitational lensing // Rep. Prog. Phys. — 2010. — Vol. 73. — P. 086901. — <https://doi.org/10.1088/0034-4885/73/8/086901>.
5. Rezaei Zeinab. 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>.
6. 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>.
7. Double Chooz θ_{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>.
8. 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>.
9. Abdurashitov J. N. [et al.]. First measeurements 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>.
10. Andreev Yu. M. [et al.]. Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN // Phys. Rev. Lett. — 2023. — Vol. 131. — P. 161801. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.161801>.

11. Mooij Sander, Shaposhnikov Mikhail. Finite Callan-Symanzik renormalisation for multiple scalar fields // *Nucl. Phys. B*. — 2023. — Vol. 990. — P. 116176. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2023.116176>.
12. Mooij Sander, Shaposhnikov Mikhail. QFT without infinities and hierarchy problem // *Nucl. Phys. B*. — 2023. — Vol. 990. — P. 116172. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2023.116172>.
13. Mooij Sander, Shaposhnikov Mikhail. Effective potential in finite formulation of QFT // *Nucl. Phys. B*. — 2024. — Vol. 1006. — P. 116642. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2024.116642>.
14. Callan Jr. Curtis G. Introduction to Renormalization Theory // *Conf. Proc. C*. — 1975. — Vol. 7507281. — P. 41–77.
15. Blaer A. S., Young K. Field theory renormalization using the Callan-Symanzik equation // *Nucl. Phys. B*. — 1974. — Vol. 83. — P. 493–514. — [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(74\)90271-5](https://doi.org/10.1016/0550-3213(74)90271-5).
16. Ageeva Y., Petrov P., Shaposhnikov M. Nonrenormalizable theories and finite formulation of QFT // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 111, no. 2. — P. 025020. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.025020>.
17. Ageeva Y. A., Kataev A. L. On the link between finite QFT and standard RG approaches. — 2025. — 9. — 2509.22632.
18. Starobinsky Alexei A. A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity // *Phys. Lett. B*. — 1980. — Vol. 91. — P. 99–102. — [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(80\)90670-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(80)90670-X).
19. Guth Alan H. The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems // *Phys. Rev. D*. — 1981. — Vol. 23. — P. 347–356. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.347>.
20. Sato Katsuhiko. First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 1981. — Vol. 195, no. 3. — P. 467–479. — <https://doi.org/10.1093/mnras/195.3.467>.
21. Linde Andrei D. A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems // *Phys. Lett. B*. — 1982. — Vol. 108. — P. 389–393. — [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)91219-9](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)91219-9).
22. Albrecht Andreas, Steinhardt Paul J. Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking // *Phys. Rev. Lett.*. — 1982. — Vol. 48. — P. 1220–1223. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.1220>.
23. 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>.
24. 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>.
 25. Battfeld D., Peter Patrick. A Critical Review of Classical Bouncing Cosmologies // *Phys. Rept.* — 2015. — Vol. 571. — P. 1–66. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.12.004>.
 26. Lehners Jean-Luc. Ekpyrotic and Cyclic Cosmology // *Phys. Rept.* — 2008. — Vol. 465. — P. 223–263. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2008.06.001>.
 27. Brandenberger Robert, Peter Patrick. Bouncing Cosmologies: Progress and Problems // *Found. Phys.* — 2017. — Vol. 47, no. 6. — P. 797–850. — <https://doi.org/10.1007/s10701-016-0057-0>.
 28. Creminelli Paolo, Nicolis Alberto, Trincherini Enrico. Galilean Genesis: An Alternative to inflation // *JCAP*. — 2010. — Vol. 11. — P. 021. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2010/11/021>.
 29. Subluminal Galilean Genesis / Paolo Creminelli, Kurt Hinterbichler, Justin Khoury [et al.] // *JHEP*. — 2013. — Vol. 02. — P. 006. — [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2013\)006](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2013)006).
 30. Nishi Sakine, Kobayashi Tsutomu. Generalized Galilean Genesis // *JCAP*. — 2015. — Vol. 03. — P. 057. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/03/057>.
 31. Horndeski Gregory Walter. Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space // *Int. J. Theor. Phys.* — 1974. — Vol. 10. — P. 363–384. — <https://doi.org/10.1007/BF01807638>.
 32. Agrawal P. [et al.]. Feebly-interacting particles: FIPs 2020 workshop report // *Eur. Phys. J. C.* — 2021. — Vol. 81, no. 11. — P. 1015. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09703-7>.
 33. 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>.
 34. 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>.
 35. Baier V. N., Fadin V. S., Khoze V. A. Quasireal electron method in high-energy quantum electrodynamics // *Nucl. Phys. B*. — 1973. — Vol. 65. — P. 381–396. — [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(73\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0550-3213(73)90291-5).

36. Chen M.-S., Zerwas P. M. Equivalent-particle approximations in electron and photon processes of higher order QED // *Phys. Rev. D*. — 1975. — Vol. 12. — P. 187. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.12.187>.
37. Numerical analysis of melting domain walls and their gravitational waves / I. Dankovsky, S. Ramazanov, E. Babichev [et al.] // *JCAP*. — 2025. — Vol. 02. — P. 064. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/064>.
38. Biased domain walls: faster annihilation, weaker gravitational waves / E. Babichev, I. Dankovsky, D. Gorbunov [et al.] // *JCAP*. — 2025. — Vol. 10. — P. 103. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/10/103>.
39. Shi Xiangdong, Fuller George M. New Dark Matter Candidate: Nonthermal Sterile Neutrinos // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Apr. — Vol. 82. — P. 2832–2835. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.82.2832>.
40. Sterile neutrino dark matter: Weak interactions in the strong coupling epoch / Tejaswi Venumadhav, Francis-Yan Cyr-Racine, Kevork N. Abazajian, Christopher M. Hirata // *Phys. Rev. D*. — 2016. — Aug. — Vol. 94. — P. 043515. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.94.043515>.
41. Ghiglieri J., Laine M. Improved determination of sterile neutrino dark matter spectrum // *Journal of High Energy Physics*. — 2015. — Vol. 2015, no. 11. — P. 171. — [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2015\)171](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2015)171).
42. Self-similar kinetics for gravitational Bose-Einstein condensation / A. S. Dmitriev, D. G. Levkov, A. G. Panin, I. I. Tkachev // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 112. — P. 123533. — <https://doi.org/10.1103/52sq-jslx>.
43. Curtin David [et al.]. Long-Lived Particles at the Energy Frontier: The MATH-USLA Physics Case // *Rept. Prog. Phys.* — 2019. — Vol. 82, no. 11. — P. 116201. — <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ab28d6>.
44. Alimena Juliette [et al.]. Searching for long-lived particles beyond the Standard Model at the Large Hadron Collider // *J. Phys. G*. — 2020. — Vol. 47, no. 9. — P. 090501. — <https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab4574>.
45. 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>.
46. 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>.
47. New Constraints on Millicharged Particles from Cosmic-ray Production / Ryan Plestid, Volodymyr Takhistov, Yu-Dai Tsai [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 2020. — Vol. 102. — P. 115032. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.115032>.

48. Argüelles Delgado Carlos Alberto, Kelly Kevin James, Muñoz Albornoz Víctor. Millicharged particles from the heavens: single- and multiple-scattering signatures // JHEP. — 2021. — Vol. 11. — P. 099. — [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2021\)099](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2021)099).
49. 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>.
50. Hadrophilic light dark matter from the atmosphere / Carlos A. Argüelles, Víctor Muñoz, Ian M. Shoemaker, Volodymyr Takhistov // Phys. Lett. B. — 2022. — Vol. 833. — P. 137363. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137363>.
51. Atmospheric axionlike particles at Super-Kamiokande / Kingman Cheung, Jui-Lin Kuo, Po-Yan Tseng, Zeren Simon Wang // Phys. Rev. D. — 2022. — Vol. 106, no. 9. — P. 095029. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.095029>.
52. Aubert J. J. [et al.]. The ratio of the nucleon structure functions F_2 for iron and deuterium // Phys. Lett. B. — 1983. — Vol. 123. — P. 275–278. — [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90437-9](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90437-9).
53. Bodek A. [et al.]. Electron Scattering from Nuclear Targets and Quark Distributions in Nuclei // Phys. Rev. Lett. — 1983. — Vol. 50. — P. 1431. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.1431>.
54. Gomez J. [et al.]. Measurement of the A-dependence of deep inelastic electron scattering // Phys. Rev. D. — 1994. — Vol. 49. — P. 4348–4372. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.4348>.
55. Amaudruz P. [et al.]. A Reevaluation of the nuclear structure function ratios for D, He, Li-6, C and Ca // Nucl. Phys. B. — 1995. — Vol. 441. — P. 3–11. — [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(94\)00023-9](https://doi.org/10.1016/0550-3213(94)00023-9).
56. Arrington J. [et al.]. Measurement of the EMC effect in light and heavy nuclei // Phys. Rev. C. — 2021. — Vol. 104, no. 6. — P. 065203. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.065203>.
57. Abrams D. [et al.]. Measurement of the Nucleon F_2^n/F_2^p Structure Function Ratio by the Jefferson Lab MARATHON Tritium/Helium-3 Deep Inelastic Scattering Experiment // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 128, no. 13. — P. 132003. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.132003>.
58. 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>.
59. Padmanabhan H., Loeb A. Alleviating the Need for Exponential Evolution of JWST Galaxies in $10^{10} M_\odot$ Haloes at $z > 10$ by a Modified Λ CDM Power Spectrum //

Astrophysical Journal Lett. — 2023. — Vol. 953, no. 1. — P. L4. — <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acea7a>.

60. Jee M.J. [et al.]. A Study of the Dark Core in A520 with the Hubble Space Telescope: The Mystery Deepens // *Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 747, no. 2. — P. 96. — <https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/2/96>.
61. Clowe D. [et al.]. On Dark Peaks and Missing Mass: A Weak-lensing Mass Reconstruction of the Merging Cluster System A520 // *Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 758, no. 2. — P. 128. — <https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/128>.
62. Zel'dovich Ya.B., Novikov I.D. The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model // *Soviet Astronomy*. — 1967. — Vol. 10. — P. 602.
63. Stasenko V.D., Eroshenko Yu.N. Mergers of Binary Primordial Black Holes in Evolving Dark Matter Halos // *Astronomy Letters*. — 2024. — Vol. 50, no. 7. — P. 431–439. — <https://doi.org/10.1134/S1063773724700348>.
64. Sikivie P., Tkachev I.I., Wang Y. Secondary infall model of galactic halo formation and the spectrum of cold dark matter particles on Earth // *Physical Review D*. — 1997. — Vol. 56, no. 4. — P. 1863–1878. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.56.1863>.
65. Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900) / Ju. M. Gavriljuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2013. — Vol. 729. — P. 576–58-. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.07.090>.
66. First result of the experimental search for the 2K-capture of ^{124}Xe with the copper proportional counter / Yu. M. Gavriljuk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov [et al.] // *Phys. Part. Nucl.* — 2015. — Vol. 46, no. 2. — P. 147–151. — <https://doi.org/10.1134/S1063779615020082>.
67. Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector / N. Y. Agafonova, M. Aglietta, P. Antonioli [et al.] // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — mar. — Vol. 802, no. 1. — P. 47. — <https://doi.org/10.1088/0004-637X/802/1/47>.
68. Агафонова Н. Ю. Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук : PhD thesis / Н. Ю. Агафонова ; Институт ядерных исследований РАН, Москва. — 2015. — Кандидатская диссертация.
69. Measurement of the residual energy of muons in the Gran Sasso underground laboratories / M. Ambrosio, R. Antolini, A. Baldini [et al.] // *Astroparticle Physics*. — 2003. — Vol. 19, no. 3. — P. 313–328. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650502002177>.

70. Кудрявцев В.А. Изучение кривой поглощения мюонов и вторичной нейтронной компоненты на глубинах больше 3300 м.в.э. на детекторах LVD и LSD : Дисс... кандидата наук / В.А. Кудрявцев ; Институт ядерных исследований РАН.— Москва, 1995.— Диссертация кандидата физико-математических наук, 118 с.
71. G. Badino, G.F. Bologna, C. Castagnoli [et al.] // Il Nuovo Cimento.— 1984.— Vol. 7C.— P. 573.
72. Aglietta M. [et al.] // Il Nuovo Cimento A.— 1992.— Vol. 105A, no. 12.— P. 1793.
73. Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН / Н. Ю. Агафонова, В. А. Алексеев, Е. А. Добрынина [и др.].— 2001.— ИЯИ РАН.
74. Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной Лаборатории Гран Сассо / Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, В. Л. Дадыкин [и др.] // Изв. РАН. Сер. Физ.— 2017.— Т. 81, № 4.— С. 551–554.— <https://doi.org/10.7868/S0367676517040032>.
75. 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>.
76. Alexandrov A. [et al.]. Intrinsic neutron background of nuclear emulsions for directional Dark Matter searches // Astropart. Phys.— 2016.— Vol. 80.— P. 16–21.— <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.03.003>.
77. Table of Isotopes / Ed. by Richard B. Firestone, Virginia S. Shirley, S. Y. Frank Chu [et al.].— 8 edition.— New York : John Wiley & Sons, 1996.— 2 volumes, CD-ROM edition.
78. Э. Сторм, Х. Исраэль. Сечения взаимодействия гамма-излучения. Справочник.— Москва : Атомиздат, 1973.— Перевод с английского, 256 с.
79. Источники фоновых событий в детекторе LVD / Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, К. В. Мануковский, А. В. Юдин // Известия РАН. Сер. Физ.— 2025.— Т. 89, № 6.— С. 848–851.— <https://doi.org/10.31857/S0367676525060024>.
80. New measurement of rock contaminations and neutron activity in the Gran Sasso tunnel / E. Belotti, M. Burashi, E. Fiorini, Liguori C.— 1985.
81. Chkvorets Oleg. Search for double beta decay with HPGe detectors at the Gran Sasso underground laboratory.— 2008.— arXiv:0812.1206 [nucl-ex].
82. 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>.

83. Abubakar S. [et al.]. Joint neutrino oscillation analysis from the T2K and NOvA experiments // *Nature*. — 2025. — Vol. 646, no. 8086. — P. 818–824. — <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09599-3>.
84. Ayres D. S. [et al.]. The NOvA Technical Design Report. — 2007. — 10. — <https://doi.org/10.2172/935497>.
85. Abe K. [et al.]. Results from the T2K experiment on neutrino mixing including a new far detector μ -like sample. — 2025. — 6. — 2506.05889.
86. Abe K. [et al.]. Testing T2K’s Bayesian constraints with priors in alternate parameterisations. — 2025. — 7. — 2507.02101.
87. Abe K. [et al.]. Measurement of muon neutrino induced charged current interactions without charged pions in the final state using a new T2K off-axis near detector WAGASCI-BabyMIND. — 2025. — 9. — 2509.07814.
88. Abe K. [et al.]. First Measurement of the Electron-Neutrino Charged-Current Pion Production Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 135, no. 15. — P. 151802. — <https://doi.org/10.1103/klhv-7t6h>.
89. Abe K. [et al.]. Signal selection and model-independent extraction of the neutrino neutral-current single π^+ cross section with the T2K experiment // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 112, no. 7. — P. 072008. — <https://doi.org/10.1103/wcn1-4ty1>.
90. Abe K. [et al.]. First Differential Measurement of the Single π^+ Production Cross Section in Neutrino Neutral-Current Scattering // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 135, no. 17. — P. 171803. — <https://doi.org/10.1103/6d32-1452>.
91. Abe K. [et al.]. First measurement of neutron capture multiplicity in neutrino-oxygen neutral-current quasielasticlike interactions using an accelerator neutrino beam // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 112, no. 3. — P. 032003. — <https://doi.org/10.1103/qh28-4znk>.
92. Cortina Gil Eduardo [et al.]. Searches for hidden sectors using $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ decays. — 2025. — 7. — 2507.17286.
93. Agostini M. et al. (GERDA collaboration). Search for the in-situ production of Ge in the GERDA neutrinoless double-beta decay experiment // *Eur. Phys. J. C*. — 2025. — Vol. 85. — P. 809. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14445-x>.
94. H. Acharya H., et al. (2025 LEGEND collaboration). First Results on the Search for Lepton Number Violating Neutrinoless Double Beta Decay with the LEGEND-200 Experiment. — 2025. — arXiv:2505.10440 [hep-ex].

95. Agostini M., et al. (2025 GERDA collaboration). Measurement of the ^{85}Kr specific activity in the GERDA liquid argon // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85. — P. 518. — <https://doi.org/10.1140/10.1140/epjc/s10052-025-14135-8>.
96. Abrahao T. et al. (Double Chooz collaboration). First Measurement of Neutrino Emissions from Spent Nuclear Fuel by the Double Chooz experiment. — 2025. — arXiv:2510.04869 [hep-ex].
97. Algev P.I. et al. Antineutrino spectra by summation method used to fit experimentally measured reactor antineutrino spectrum. — 2025. — arXiv:2505.11513 [nucl-ex].
98. Mertens S. [et al.]. Characterization of Silicon Drift Detectors with Electrons for the TRISTAN Project // J. Phys. G. — 2020. — Vol. 48, no. 1. — P. 015008. — <https://doi.org/10.1088/1361-6471/abc2dc>.
99. 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/10.1088/1748-0221/16/05/P05022>.
100. Agrawal A. [et al.]. Improved Limit on Neutrinoless Double Beta Decay of Mo^{100} from AMoRE-I // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 134, no. 8. — P. 082501. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.082501>.
101. Armengaud E. [et al.]. New Limit for Neutrinoless Double-Beta Decay of Mo^{100} from the CUPID-Mo Experiment. // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 126. — P. 181802. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.181802>.
102. Agrawal A. [et al.]. Projected background and sensitivity of AMoRE-II // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 1. — P. 9. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13516-9>.
103. 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).
104. Okun L. B. LIMITS OF ELECTRODYNAMICS: PARAPHOTONS? // Sov. Phys. JETP. — 1982. — Vol. 56. — P. 502.
105. 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>.
106. 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>.

107. 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>.
108. 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>.
109. 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>.
110. 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>.
111. 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>.
112. 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>.
113. Construction of a Multicathode Counter for Dark Photon Search / A. V. Kopylov, I. V. Orekhov, V. V. Petukhov, A. E. Solomatin // *Instrum. Exp. Tech.*. — 2025. — Vol. 68, no. 1. — P. 7–13. — <https://doi.org/10.1134/S0020441225700149>.
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. Workman R. L. [et al.]. Review of Particle Physics // *PTEP*. — 2022. — Vol. 2022. — P. 083C01. — <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>.
117. 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>.
118. 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>.

119. 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>.
120. 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>.
121. Kopylov A. V., Orekhov I. V., Petukhov V. V. Latest Results on the Search for Dark Photons with a Multicathode Counter // *Phys. Atom. Nucl.* — 2023. — Vol. 86, no. 6. — P. 1296–1300. — <https://doi.org/10.1134/S106377882306011X>.
122. PHELEX with a Multi-Cathode Counter in the Search for Dark Photons / Anatoly Kopylov, Igor Orekhov, Valery Petukhov, Alexei Solomatin // *Phys. Atom. Nucl.* — 2024. — Vol. 87, no. 6. — P. 810–814. — <https://doi.org/10.1134/S1063778824700777>.
123. А.В.Копылов И.В.Орехов В.В.Петухов и А.Е.Соломатин. PHELEX – современное состояние // *Ядерная физика.* — 2025. — Т. 88, № 5. — С. 427–432.
124. Studying Dark Photon Models in Decays of Neutral Mesons / A. S. Zhevlakov, V. E. Lyubovitskij, D. V. Kirpichnikov [et al.] // *Phys. Part. Nucl.* — 2025. — Vol. 56, no. 2. — P. 500–505. — <https://doi.org/10.1134/S1063779624701855>.
125. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. The bremsstrahlung-like production of the massive spin-2 dark matter mediator // *Eur. Phys. J. C.* — 2025. — Vol. 85, no. 10. — P. 1110. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14868-6>.
126. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. Implication of the Weizsäcker-Williams approximation for the dark matter mediator production // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 111, no. 3. — P. 035034. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.035034>.
127. S.N. Gninenco [et al.]. Probing leptophobic dark sector with a pseudoscalar portal in the NA64 experiment at CERN // *JHEP.* — 2025. — Vol. 2025. — P. 235. — [https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2025\)235](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2025)235).
128. S.N. Gninenco, N.V. Krasnikov. Search for mirror hidden sector with neutral kaons at NA64 // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 111, no. 11. — P. 115519. — <https://doi.org/10.1103/btqb-16lt>.
129. Andreev Yu. M. [et al.]. High efficiency veto hadron calorimeter in the NA64 experiment at CERN // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* — 2025. — Vol. A1081. — P. 170830. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170830>.
130. Andreev Yu. M. [et al.]. Probing light dark matter with positron beams at NA64 // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 109, no. 3. — P. L031103. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.L031103>.

131. Ageeva Y., Kotenko M., Petrov P. Primordial non-Gaussianities for nonsingular Horndeski cosmologies // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, no. 6. — P. 063526. — <https://doi.org/10.1103/ghz6-w27b>.
132. Kataev A. L., Stepanyantz K. V. Exact Relations between Running of α_s and α in $\mathcal{N}=1$ SQCD + SQED // JETP Lett. — 2025. — Vol. 121, no. 5. — P. 315–319. — <https://doi.org/10.1134/S0021364025600132>.
133. 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).
134. Gorbunov D., Kriukova E. Dark photon production via inelastic proton bremsstrahlung with Pauli form factor // Phys. Part. Nucl. — 2025. — Vol. 56, no. 2. — P. 506–510. — <https://doi.org/10.1134/S1063779624701867>.
135. Faessler A., Krivoruchenko M. I., Martemyanov B. V. Once more on electromagnetic form factors of nucleons in extended vector meson dominance model // Phys. Rev. C. — 2010. — Vol. 82. — P. 038201. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.038201>.
136. Dubnicka S., Dubnickova A.-Z., Weisenpacher P. Nucleon electromagnetic structure revisited // J. Phys. G. — 2003. — Vol. 29. — P. 405–430. — <https://doi.org/10.1088/0954-3899/29/2/316>.
137. Gorbunov D., Kriukova E. Pauli form factor contributions to the inelastic proton bremsstrahlung and dark photon production // JHEP. — 2025. — Vol. 02. — P. 018. — [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2025\)018](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2025)018).
138. Self-Similar Growth of Bose Stars / A. S. Dmitriev, D. G. Levkov, A. G. Panin, I. I. Tkachev // Phys. Rev. Lett. — 2024. — P. 091001. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.091001>.
139. Demidov S. V. New physics from atmosphere: Light sgoldstino case // Int. J. Mod. Phys. A. — 2025. — Vol. 40, no. 33. — P. 2540006. — <https://doi.org/10.1142/S0217751X25400068>.
140. Kulagin S. A., Petti R. Global study of nuclear structure functions // Nucl. Phys. A. — 2006. — Vol. 765. — P. 126–187. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.10.011>.
141. Kulagin S. A., Petti R. Structure functions for light nuclei // Phys. Rev. C. — 2010. — Vol. 82. — P. 054614. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.054614>.
142. Akulinichev S. V., Kulagin S. A., Vagradov G. M. The Role of Nuclear Binding in Deep Inelastic Lepton Nucleon Scattering // Phys. Lett. B. — 1985. — Vol. 158. — P. 485–488. — [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(85\)90799-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)90799-3).

143. Kulagin S. A. Deep Inelastic Scattering on Nuclei: Impulse Approximation and Mesonic Corrections // *Nucl. Phys. A.* — 1989. — Vol. 500. — P. 653–668. — [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90233-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90233-9).
144. Kulagin S. A., Piller G., Weise W. Shadowing, binding and off-shell effects in nuclear deep inelastic scattering // *Phys. Rev. C.* — 1994. — Vol. 50. — P. 1154–1169. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.50.1154>.
145. Barkana R., Loeb A. Detecting the Earliest Galaxies through Two New Sources of 21 Centimeter Fluctuations // *Astrophysical Journal*. — 2005. — Vol. 626, no. 1. — P. 1–11. — <https://doi.org/10.1086/429954>.
146. Eroshenko Yu.N. [et al.]. Absorption in the 21 cm Hydrogen Line at $z > 10$ as a Sensitive Tool for the Construction of a Cosmological Model on Small Scales // *Astronomy Letters*. — 2025. — Vol. 51, no. 4. — P. 189–197. — <https://doi.org/10.1134/S1063773725700343>.
147. Olum K.D., Vilenkin A. Reionization from cosmic string loops // *Physical Review D*. — 2006. — Vol. 74, no. 6. — P. 063516. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063516>.
148. Eroshenko Yu.N. A moving cosmic string loop as a possible explanation for the Abell 520 mass structure // *International Journal of Modern Physics A*. — 2025. — Vol. 40, no. 29. — P. 2550137. — <https://doi.org/10.1142/S0217751X25501374>.
149. Quinlan G.D. The dynamical evolution of massive black hole binaries I. Hardening in a fixed stellar background // *New Astronomy*. — 1996. — Vol. 1, no. 1. — P. 35–56. — [https://doi.org/10.1016/S1384-1076\(96\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S1384-1076(96)00003-6).
150. Acero M. A. [et al.]. Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment // *Phys. Rev. D*. — 2022. — Vol. 106, no. 3. — P. 032004. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.032004>.
151. Abe K. [et al.]. Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target // *Eur. Phys. J. C*. — 2023. — Vol. 83, no. 9. — P. 782. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11819-x>.
152. Acero M. A. [et al.]. Dual-Baseline Search for Active-to-Sterile Neutrino Oscillations in NOvA // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 134, no. 8. — P. 081804. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.081804>.
153. Acero M. A. [et al.]. Measurement of $d^2\sigma/d|q|dE_{\text{avail}}$ in charged current ν_μ -nucleus interactions at $\langle E_\nu \rangle = 1.86$ GeV using the NOvA Near Detector // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 111, no. 5. — P. 052009. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.052009>.
154. Hayrapetyan Aram [et al.]. Overview of high-density QCD studies with the CMS experiment at the LHC // *Phys. Rept.* — 2025. — Vol. 1115. — P. 219–367. —

<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.11.007>.

155. Hayrapetyan Aram [et al.]. Dark sector searches with the CMS experiment // Phys. Rept. — 2025. — Vol. 1115. — P. 448–569. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.09.013>.
156. Hayrapetyan Aram [et al.]. Study of WH production through vector boson scattering and extraction of the relative sign of the W and Z couplings to the Higgs boson in proton-proton collisions at $s=13\text{TeV}$ // Phys. Lett. B. — 2025. — Vol. 860. — P. 139202. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139202>.
157. Hayrapetyan Aram [et al.]. Review of searches for vector-like quarks, vector-like leptons, and heavy neutral leptons in proton–proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{ TeV}$ at the CMS experiment // Phys. Rept. — 2025. — Vol. 1115. — P. 570–677. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.09.012>.
158. Hayrapetyan Aram [et al.]. Measurement of inclusive and differential cross sections for W^+W^- production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13.6\text{ TeV}$ // Phys. Lett. B. — 2025. — Vol. 861. — P. 139231. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139231>.
159. Hayrapetyan Aram [et al.]. Search for Nuclear Modifications of B^+ Meson Production in p-Pb Collisions at $s_{\text{NN}}=8.16\text{ TeV}$ // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 134, no. 11. — P. 111903. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.111903>.
160. Hayrapetyan Aram [et al.]. Measurement of the $t\bar{t}H$ and tH production rates in the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay channel using proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ // JHEP. — 2025. — Vol. 02. — P. 097. — [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2025\)097](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2025)097).
161. Adhya Souvik Priyam [et al.]. CEPC Technical Design Report – Reference Detector. — 2025. — 10. — arXiv:2510.05260.
162. Troitsky S. V. Stellar Evolution and Axion-Like Particles: New Constraints and Hints from Globular Clusters in the GAIA DR3 Data // JETP Lett. — 2025. — Vol. 121, no. 3. — P. 159–165. — <https://doi.org/10.1134/S0021364024603798>.
163. Hypothetical Lorentz invariance violation and the muon content of extensive air showers / Nickolay S. Martynenko, Grigory I. Rubtsov, Petr S. Satunin [et al.] // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 6. — P. 063010. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.063010>.
164. Satunin P. S., Troitsky S. V. Testing new-physics scenarios with the combined LHAASO and Carpet-3 fluence spectrum of GRB 221009A: axion-like particles and Lorentz-invariance violation. — 2025. — 10. — 2510.07234.
165. Abusleme Angel [et al.]. Prediction of energy resolution in the JUNO experiment // Chinese Physics C. — 2025. — Vol. 49, no. 1. — P. 013003. — <https://doi.org/10.1088/1674-1137/49/1/013003>.

//doi.org/10.1088/1674-1137/ad83aa.

166. Abusleme Angel [et al.]. JUNO sensitivity to invisible decay modes of neutrons // The European Physical Journal C. — 2025. — Vol. 85, no. 5. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13638-0>.
167. Abusleme Angel [et al.]. Potential to identify neutrino mass ordering with reactor antineutrinos at JUNO // Chinese Physics C. — 2025. — Vol. 49, no. 3. — P. 013003. — <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad7f3e>.
168. Adam Thomas [et al.]. Simulation of the background from $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction in the JUNO scintillator // The European Physical Journal C. — 2025. — Vol. 85. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14333-4>.
169. Adam Thomas [et al.]. Prospects with geoneutrino detection with JUNO. — 2025. — 10. — arXiv:2511.07227.
170. Abusleme Angel [et al.]. Initial performance results of the JUNO detector. — 2025. — 11. — arXiv:2511.14590.
171. A. Angel [et al.]. Prediction of Energy Resolution in the JUNO Experiment. — 2024. — 04. — 2405.17860.
172. Agrawal A. [et al.]. Development of MMC-based lithium molybdate cryogenic calorimeters for AMoRE-II // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 2. — P. 172. — [Erratum: Eur.Phys.J.C 85, 256 (2025)]. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13498-8>.
173. Копылов Анатолий Васильевич и Петухов Валерий Вячеславович. Способ получения высокого коэффициента газового усиления газового пропорционального счетчика. — 2025.
174. Ageev Dmitry S., Ageeva Yulia A. Disparity in sound speeds: implications for unitarity and effective potential in quantum field theory. — 2025. — 5. — 2505.07794.
175. Mironov S., Sharov M. No-Go theorem in the cubic subclass of Horndeski theory for spherically symmetric dynamical background // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 8. — P. 084033. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.084033>.
176. Mironov S., Sharov M., Volkova V. Linear stability of a time-dependent, spherically symmetric background in beyond Horndeski theory and the speed of gravity waves // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 1. — P. 50. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13730-5>.
177. Mironov S., Sharov M., Volkova V. Time-dependent, spherically symmetric background in Kaluza-Klein compactified Horndeski theory and the speed of gravity waves // JCAP. — 2025. — Vol. 09. — P. 047. — <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/09/047>.

178. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Higher derivative scalar-vector-tensor theories from Kaluza-Klein reductions of Horndeski theory // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 111, no. 2. — P. 024028. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.024028>.
179. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Luminal scalar-tensor theories for a not so dark dark energy // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 111, no. 10. — P. L101501. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.L101501>.
180. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Ghost-free, gauge invariant SVT generalizations of Horndeski theory // *Eur. Phys. J. C*. — 2025. — Vol. 85, no. 12. — P. 1378. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-15125-6>.
181. Search for a photon peak from keV-scale dark matter annihilation with NuSTAR: Constraints on $\langle\sigma v\rangle$ after 11 years of observations / E. I. Zakharov, V. V. Barinov, D. S. Gorbunov [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 112, no. 10. — P. 103037. — <https://doi.org/10.1103/f1w8-bcny>.
182. Satunin Petr. Ultra-high-energy event KM3-230213A constraints on Lorentz Invariance Violation in neutrino sector // *Eur. Phys. J. C*. — 2025. — Vol. 85, no. 5. — P. 545. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14240-8>.
183. Pankratov Andrey L. [et al.]. Search for dark-matter axions beyond the quantum limit: The cosmological axion Sarov haloscope proposal // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 112, no. 3. — P. 035003. — <https://doi.org/10.1103/rq2s-5f18>.
184. Gorbunov Dmitry, Kalashnikov Dmitry, Krugan George. Playing with lepton asymmetry at the resonant production of sterile neutrino dark matter // *Physics Letters B*. — 2025. — Vol. 868. — P. 139750. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269325005118>.
185. de Kok M. O., van Holten J. W. The Fate of conformal symmetry in the non-linear Schrodinger theory // *Nucl. Phys. B*. — 2008. — Vol. 803. — P. 363–380. — <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2008.05.018>.
186. Localized electromagnetic perturbations on vector solitons / Yulia Galushkina, Eduard Kim, Emin Nugaev, Yakov Shnir // *Phys. Lett. B*. — 2025. — Vol. 865. — P. 139469. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139469>.
187. Properties of non-topological solitons in two-dimensional model with resurrected conformal symmetry / Yu. Galushkina, Eduard Kim, Emin Nugaev, Ya. Shnir // *EPL*. — 2025. — Vol. 151, no. 6. — P. 64002. — <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ae01d4>.
188. CFT approach to rotating field lumps in an attractive potential / Yulia Galushkina, Eduard Kim, Emin Nugaev, Yakov Shnir // *Phys. Rev. D*. — 2025. — Vol. 112, no. 7. — P. 076019. — <https://doi.org/10.1103/pdrb-sh7n>.

189. Abrams D. [et al.]. EMC Effect of Tritium and Helium-3 from the JLab MARATHON Experiment // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 135, no. 6. — P. 062502. — <https://doi.org/10.1103/31xz-s84d>.
190. Alekhin S. I., Kulagin S. A., Petti R. On the Interplay of Nuclear and Higher-Twist Corrections in Nuclear Structure Functions // *PoS.* — 2025. — Vol. DIS2024. — P. 067. — <https://doi.org/10.22323/1.469.0067>.
191. Eroshenko Yu. N. Dark Matter Around Primordial Black Holes // *Phys. Atom. Nucl.* — 2025. — Vol. 88, no. 3. — P. 520–523. — <https://doi.org/10.1134/S106377882560054X>.
192. Aaij Roel [et al.]. Inclusive B-meson flavour-tagging algorithm at LHCb // *JHEP*. — 2025. — Vol. 11. — P. 041. — [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2025\)041](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2025)041).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ОТЧЕТА ЗА 2025 Г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2025 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Abubakar S. [et al.]. Joint neutrino oscillation analysis from the T2K and NOvA experiments // Nature. — 2025. — Vol. 646, no. 8086. — P. 818–824. — <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09599-3>.
2. Abe K. [et al.]. First Measurement of the Electron-Neutrino Charged-Current Pion Production Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 135, no. 15. — P. 151802. — <https://doi.org/10.1103/klhv-7t6h>.
3. Abe K. [et al.]. Signal selection and model-independent extraction of the neutrino neutral-current single π^+ cross section with the T2K experiment // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, no. 7. — P. 072008. — <https://doi.org/10.1103/wcn1-4ty1>.
4. Simanovskiy M., Agafonova N., the LVD Collaboration. On the clustering method of large muon events on the LVD detector // Physics of Atomic Nuclei. — 2025. — Vol. 88, no. 1. — P. 45–49. — <https://doi.org/10.1134/S1063778825700140>.
5. Abe K. [et al.]. First Differential Measurement of the Single π^+ Production Cross Section in Neutrino Neutral-Current Scattering // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 135, no. 17. — P. 171803. — <https://doi.org/10.1103/6d32-1452>.
6. Abe K. [et al.]. First measurement of neutron capture multiplicity in neutrino-oxygen neutral-current quasielasticlike interactions using an accelerator neutrino beam // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, no. 3. — P. 032003. — <https://doi.org/10.1103/qh28-4znk>.
7. Agostini M. et al. (GERDA collaboration). Search for the in-situ production of Ge in the GERDA neutrinoless double-beta decay experiment // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85. — P. 809. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14445-x>.
8. Agostini M., et al. (2025 GERDA collaboration). Measurement of the ^{85}Kr specific activity in the GERDA liquid argon // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85. — P. 518. — <https://doi.org/10.1140/10.1140/epjc/s10052-025-14135-8>.
9. Abusleme Angel et al. Prediction of energy resolution in the JUNO experiment // Chinese Physics C. — 2025. — Vol. 49, no. 1. — P. 013003. — <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad83aa>
10. Abusleme Angel et al. JUNO sensitivity to invisible decay modes of neutrons // The European Physical Journal C. — 2025. — Vol. 85, no. 5. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13638-0>.

11. Abusleme Angel et al. Potential to identify neutrino mass ordering with reactor antineutrinos at JUNO // Chinese Physics C. — 2025. — Vol. 49, no. 3. — P. 013003. — <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad7f3e>.
12. Adam Thomas et al. Simulation of the background from $^{13}C(\alpha, n) ^{16}O$ reaction in the JUNO scintillator // The European Physical Journal C. — 2025. — Vol. 85. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14333-4>.
13. Simanovskiy M., Agafonova N., the LVD Collaboration. On the clustering method of large muon events on the LVD detector // Physics of Atomic Nuclei. — 2025. — Vol. 88, no. 1. — P. 45–49. — <http://dx.doi.org/10.1134/S1063778825700140>
14. Регистрация атмосферных мюонов на LVD / Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина и др. // Ядерная физика. — 2025. — Т. 88, № 5. — С. 412–418. — <http://dx.doi.org/10.7868/S3034628225050034>
15. Сравнительный анализ влияния техногенных факторов на скорость счета гамма-квантов в подземных экспериментах LSD и LVD / Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, В. Ф. Якушев, коллаборации LSD и LVD // Известия РАН. Сер.Физ. — 2025. — Т. 89, № 6. — С. 844–847. — <http://dx.doi.org/10.31857/S0367676525060012>
16. Источники фоновых событий в детекторе LVD / Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, К. В. Мануковский, А. В. Юдин // Известия РАН. Сер.Физ. — 2025. — Т. 89, № 6. — С. 848–851. — <http://dx.doi.org/10.31857/S0367676525060024>
17. Agrawal A. [et al.]. Improved Limit on Neutrinoless Double Beta Decay of Mo100 from AMoRE-I // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 134, no. 8. — P. 082501. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.082501>.
18. Agrawal A. [et al.]. Development of MMC-based lithium molybdate cryogenic calorimeters for AMoRE-II // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 2. — P. 172. — [Erratum: Eur.Phys.J.C 85, 256 (2025)]. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13498-8>.
19. Agrawal A. [et al.]. Projected background and sensitivity of AMoRE-II // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 1. — P. 9. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13516-9>.
20. Construction of a Multicathode Counter for Dark Photon Search / A. V. Kopylov, I. V. Orekhov, V. V. Petukhov, A. E. Solomatin // Instrum. Exp. Tech. — 2025. — Vol. 68, no. 1. — P. 7–13. — <https://doi.org/10.1134/S0020441225700149>.
21. А.В.Копылов И.В.Орехов В.В.Петухов и А.Е.Соломатин. PHELEX – современное состояние // Ядерная физика. — 2025. — Т. 88, № 5. — С. 427–432.
22. Andreev Yu. M. [et al.]. High efficiency veto hadron calorimeter in the NA64 experiment at CERN // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. — 2025. — Vol. A1081. — P. 170830. — <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170830>.

23. Andreev Yu. M. [et al.]. Probing light dark matter with positron beams at NA64 // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 109, no. 3. — P. L031103. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.L031103>.
24. Andreev Yu. M. et al. Proof of principle for a light dark matter search with low-energy positron beams at NA64 // JHEP. — 2025. — Vol. 2025. — P. 256. - [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP06\(2025\)256](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP06(2025)256).
25. S.N. Gninenco, N.V. Krasnikov. Search for mirror hidden sector with neutral kaons at NA64 // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 11. — P. 115519. - <http://dx.doi.org/10.1103/btqb-161t>.
26. S.N. Gninenco et al. Probing leptophobic dark sector with a pseudoscalar portal in the NA64 experiment at CERN // JHEP. — 2025. — Vol. 2025. — P. 235. - [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP06\(2025\)235](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP06(2025)235).
27. Studying Dark Photon Models in Decays of Neutral Mesons / A. S. Zhevlakov, V. E. Lyubovitskij, D. V. Kirpichnikov [et al.] // Phys. Part. Nucl. — 2025. — Vol. 56, no. 2. — P. 500–505. — <https://doi.org/10.1134/S1063779624701855>.
28. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. The bremsstrahlung-like production of the massive spin-2 dark matter mediator // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 10. — P. 1110. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14868-6>.
29. Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V. Implication of the Weizsäcker- Williams approximation for the dark matter mediator production // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 3. — P. 035034. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.035034>.
30. Ageeva Y., Petrov P., Shaposhnikov M. Nonrenormalizable theories and finite formulation of QFT // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 2. — P. 025020. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.111.025020>.
31. Ageeva Y., Kotenko M., Petrov P. Primordial non-Gaussianities for nonsingular Horndeski cosmologies // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, no. 6. — P. 063526. — <http://dx.doi.org/10.1103/ghz6-w27b>.
32. Kataev A. L., Stepanyantz K. V. Exact Relations between Running of α_s and α in $\mathcal{N}=1$ SQCD + SQED // JETP Lett. — 2025. — Vol. 121, no. 5. — P. 315–319. — <https://doi.org/10.1134/S0021364025600132>.
33. Troitsky S. V. Stellar Evolution and Axion-Like Particles: New Constraints and Hints from Globular Clusters in the GAIA DR3 Data // JETP Lett. — 2025. — Vol. 121, no. 3. — P. 159–165. — <https://doi.org/10.1134/S0021364024603798>
34. Hypothetical Lorentz invariance violation and the muon content of extensive air showers / Nickolay S. Martynenko, Grigory I. Rubtsov, Petr S. Satunin [et al.] // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 6. — P. 063010. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.063010>.

35. Volkova V. E., Mironov S. A. Nonsingular cosmological scenarios in scalar-tensor theories and their stability // *Usp. Fiz. Nauk.* — 2025. — Vol. 195, no. 2. — P. 163–176. — <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039826>.
36. Mironov S., Sharov M., Volkova V. Linear stability of a time-dependent, spherically symmetric background in beyond Horndeski theory and the speed of gravity waves // *Eur. Phys. J. C.* — 2025. — Vol. 85, no. 1. — P. 50. — <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13730-5>.
37. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Higher derivative scalar-vector-tensor theories from Kaluza-Klein reductions of Horndeski theory // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 111, no. 2. — P. 024028. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.111.024028>.
38. Mironov S., Sharov M., Volkova V. Time-dependent, spherically symmetric background in Kaluza-Klein compactified Horndeski theory and the speed of gravity waves // *JCAP*. — 2025. — Vol. 09. — P. 047. — <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2025/09/047>.
39. Mironov S., Sharov M. No-Go theorem in the cubic subclass of Horndeski theory for spherically symmetric dynamical background // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 111, no. 8. — P. 084033. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.111.084033>.
40. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Luminal scalar-tensor theories for a not so dark dark energy // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 111, no. 10. — P. L101501. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.111.L101501>.
41. Gorbunov D., Kriukova E. Dark photon production via inelastic proton bremsstrahlung with Pauli form factor // *Phys. Part. Nucl.* — 2025. — Vol. 56, no. 2. — P. 506–510. — <http://dx.doi.org/10.1134/S1063779624701867>.
42. Gorbunov D., Kriukova E. Pauli form factor contributions to the inelastic proton bremsstrahlung and dark photon production // *JHEP*. — 2025. — Vol. 02. — P. 018. — [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP02\(2025\)018](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP02(2025)018).
43. Biased domain walls: faster annihilation, weaker gravitational waves / E. Babichev, I. Dankovsky, D. Gorbunov et al. // *JCAP*. — 2025. — Vol. 10. — P. 103. — <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2025/10/103>.
44. Numerical analysis of melting domain walls and their gravitational waves / I. Dankovsky, S. Ramazanov, E. Babichev et al. // *JCAP*. — 2025. — Vol. 02. — P. 064. — <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/064>.
45. Search for a photon peak from keV-scale dark matter annihilation with NuSTAR: Constraints on $\langle\sigma v\rangle$ after 11 years of observations / E. I. Zakharov, V. V. Barinov, D. S. Gorbunov [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 10. — P. 103037. — <https://doi.org/10.1103/f1w8-bcny>.

46. Satunin Petr. Ultra-high-energy event KM3-230213A constraints on Lorentz Invariance Violation in neutrino sector // *Eur. Phys. J. C.* — 2025. — Vol. 85, no. 5. — P. 545. — <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14240-8>.
47. Pankratov Andrey L. et al. Search for dark-matter axions beyond the quantum limit: The cosmological axion Sarov haloscope proposal // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 3. — P. 035003. — <http://dx.doi.org/10.1103/rq2s-5f18>.
48. Gorbunov Dmitry, Kalashnikov Dmitry, Krugan George. Playing with lepton asymmetry at the resonant production of sterile neutrino dark matter // *Physics Letters B.* — 2025. — Vol. 868. — P. 139750. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269325005118>.
49. Demidov S. V. New physics from atmosphere: Light sgoldstino case // *Int. J. Mod. Phys. A.* — 2025. — Vol. 40, no. 33. — P. 2540006. — <http://dx.doi.org/10.1142/S0217751X25400068>.
50. Localized electromagnetic perturbations on vector solitons / Yulia Galushkina, Eduard Kim, Emin Nugaev, Yakov Shnir // *Phys. Lett. B.* — 2025. — Vol. 865. — P. 139469. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139469>.
51. Properties of non-topological solitons in two-dimensional model with resurrected conformal symmetry / Yu. Galushkina, Eduard Kim, Emin Nugaev, Ya. Shnir // *EPL.* — 2025. — Vol. 151, no. 6. — P. 64002. — <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/ae01d4>.
52. CFT approach to rotating field lumps in an attractive potential / Yu- lia Galushkina, Eduard Kim, Emin Nugaev, Yakov Shnir // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 7. — P. 076019. — <http://dx.doi.org/10.1103/pdrb-sh7n>.
53. Abrams D. et al. EMC Effect of Tritium and Helium-3 from the JLab MARATHON Experiment // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 135, no. 6. — P. 062502. — <http://dx.doi.org/10.1103/31xz-s84d>.
54. Eroshenko Yu.N. A moving cosmic string loop as a possible explanation for the Abell 520 mass structure // *International Journal of Modern Physics A.* — 2025. — Vol. 40, no. 29. — P. 2550137. — <https://doi.org/10.1142/S0217751X25501374>.
55. Eroshenko Yu. N. Dark Matter Around Primordial Black Holes // *Phys. Atom. Nucl.* — 2025. — Vol. 88, no. 3. — P. 520–523. — <https://doi.org/10.1134/S106377882560054X>.
56. Acero M. A. [et al.]. Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment // *Phys. Rev. D.* — 2022. — Vol. 106, no. 3. — P. 032004. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.032004>.

57. Abe K. [et al.]. Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target // Eur. Phys. J. C. — 2023. — Vol. 83, no. 9. — P. 782. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11819-x>.
58. Acero M. A. [et al.]. Dual-Baseline Search for Active-to-Sterile Neutrino Oscillations in NOvA // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 134, no. 8. — P. 081804. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.081804>.
59. Acero M. A. [et al.]. Measurement of $d^2\sigma/d|q|dE_{avail}$ in charged current ν_μ -nucleus interactions at $\langle E_\nu \rangle = 1.86$ GeV using the NOvA Near Detector // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 111, no. 5. — P. 052009. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.052009>.
60. Aaij Roel [et al.]. Inclusive B-meson flavour-tagging algorithm at LHCb // JHEP. — 2025. — Vol. 11. — P. 041. — [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2025\)041](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2025)041).
61. Hayrapetyan Aram [et al.]. Overview of high-density QCD studies with the CMS experiment at the LHC // Phys. Rept. — 2025. — Vol. 1115. — P. 219–367. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.11.007>.
62. Hayrapetyan Aram [et al.]. Dark sector searches with the CMS experiment // Phys. Rept. — 2025. — Vol. 1115. — P. 448–569. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.09.013>.
63. Hayrapetyan Aram [et al.]. Study of WH production through vector boson scattering and extraction of the relative sign of the W and Z couplings to the Higgs boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. — 2025. — Vol. 860. — P. 139202. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139202>.
64. Hayrapetyan Aram [et al.]. Review of searches for vector-like quarks, vector-like leptons, and heavy neutral leptons in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV at the CMS experiment // Phys. Rept. — 2025. — Vol. 1115. — P. 570–677. — <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.09.012>.
65. Hayrapetyan Aram [et al.]. Measurement of inclusive and differential cross sections for W^+W^- production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV // Phys. Lett. B. — 2025. — Vol. 861. — P. 139231. — <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.139231>.
66. Hayrapetyan Aram [et al.]. Search for Nuclear Modifications of B^+ Meson Production in p-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 134, no. 11. — P. 111903. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.111903>.
67. Hayrapetyan Aram [et al.]. Measurement of the $t\bar{t}H$ and tH production rates in the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay channel using proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2025. — Vol. 02. — P. 097. — [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2025\)097](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2025)097).

68. Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M. Ghost-free, gauge invariant SVT generalizations of Horndeski theory // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85, no. 12. — P. 1378. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-15125-6>.

69. Self-similar kinetics for gravitational Bose-Einstein condensation / A. S. Dmitriev, D. G. Levkov, A. G. Panin, I. I. Tkachev // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112. — P. 123533. — <https://doi.org/10.1103/52sq-jslx>.

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

1. Агафонова Н.Ю., Григорьева А.Б. Поиск выстроенных событий в группах мюонов // Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ 2025. Фундаментальная и прикладная физика. ЛФИ - Секция «Фундаментальные взаимодействия и космология». — 2025. — https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/a3a/lfi_kor.pdf.

2. Слуцкая О.Ю., Агафонова Н.Ю., Коллаборация LVD. Реконструкция мюонных событий с учетом временных калибровок счетчиков LVD // Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ 2025. Фундаментальная и прикладная физика. ЛФИ - Секция «Фундаментальные взаимодействия и космология». — 2025. — https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/a3a/lfi_kor.pdf.

3. Агафонова Н.Ю., Ингерман С.В., LVD коллаборация. Анализ баз данных землетрясений для определения чувствительности детектора LVD к сейсмоактивности // Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ 2025. Фундаментальная и прикладная физика. ЛФИ - Секция прикладной геофизики. — 2025. — https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/a3a/lfi_kor.pdf.

4. Слуцкая О.Ю., Агафонова Н.Ю., коллаборация LVD. Разработка алгоритма реконструкции мюонных событий с использованием временных калибровок счетчиков LVD // Труды XII Международной молодежной научной Школы Конференции "Современные проблемы физики и технологий". — 2025.

5. Alekhin S. I., Kulagin S. A., Petti R. On the Interplay of Nuclear and Higher-Twist Corrections in Nuclear Structure Functions // PoS. — 2025. — Vol. DIS2024. — P. 067. — <http://dx.doi.org/10.22323/1.469.0067>.

А.3 Иные публикации по теме

1. Abe K. [et al.]. Results from the T2K experiment on neutrino mixing including a new far detector μ -like sample. — 2025. — 6. — <https://arxiv.org/abs/2506.05889>.

2. Abe K. [et al.]. Testing T2K's Bayesian constraints with priors in alternate parameterisations. — 2025. — 7. — <https://arxiv.org/abs/2507.02101>.

3. Abe K. [et al.]. Measurement of muon neutrino induced charged current interactions without charged pions in the final state using a new T2K off-axis near detector WAGASCI-BabyMIND. — 2025. — 9. — <https://arxiv.org/abs/2509.07814>.
4. Cortina Gil Eduardo [et al.]. Searches for hidden sectors using $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ decays. — 2025. — 7. — <https://arxiv.org/abs/2507.17286>.
5. H. Acharya H., et al. (2025 LEGEND collaboration). First Results on the Search for Lepton Number Violating Neutrinoless Double Beta Decay with the LEGEND-200 Experiment. — 2025. — 5. — <https://arxiv.org/abs/2505.10440>.
6. Abrahao T. et al. (Double Chooz collaboration). First Measurement of Neutrino Emissions from Spent Nuclear Fuel by the Double Chooz experiment. — 2025. — <https://arxiv.org/abs/2510.04869>
7. Algev P.I. et al. Antineutrino spectra by summation method used to fit experimentally measured reactor antineutrino spectrum. — 2025. — <https://arxiv.org/abs/2505.11513>.
8. Satunin P. S., Troitsky S. V. Testing new-physics scenarios with the combined LHAASO and Carpet-3 fluence spectrum of GRB 221009A: axion-like particles and Lorentz-invariance violation. — 2025. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2510.07234>.
9. Ageeva Y. A., Kataev A. L. On the link between finite QFT and standard RG approaches. — 2025. — 9. — <https://arxiv.org/abs/2509.22632>.
10. Ageev Dmitry S., Ageeva Yulia A. Disparity in sound speeds: implications for unitarity and effective potential in quantum field theory. — 2025. — 5. — <https://arxiv.org/abs/2505.07794>.
11. Adhya Souvik Priyam [et al.]. CEPC Technical Design Report – Reference Detector. — 2025. — 10. — <https://arxiv.org/abs/2510.05260>.