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. № 121122300167-6 Рег. №

УТВЕРЖДАЮ Директор ИЯИ РАН, профессор РАН М.В. Либанов 28» января 2022 г. ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

121122300167-6

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

(заключительный за 2021 год)

ΦЦП

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

М.В. Либанов «28» января 2022 г.

Москва 2022 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

| Руководитель НИР, | | | |
|--------------------------|------------------------|--|--|
| Директор ИЯИ РАН, | 28.01.2022 | | |
| д.ф-м.н., профессор РАН | подпись, дата | _ М.В. Лиоанов (введение, заключение) | |
| Исполнители | (AL) | | |
| сно кф-мн | 28 01 2022 | Л В Кирпичников | |
| с.п.с., к.фм.п. | подпись, дата | _ д.В. Кирпи-шиков (раздел 1) | |
| | Aller | | |
| г.н.с., д.фм.н. | 28.01.2022 | Н.В. Красников | |
| | Подпись, дата | (разделы 1, 2) | |
| в.н.с., к.фм.н. | 28.01.2022 | С.Н. Гниненко | |
| | подпись, дата | (раздел 1) | |
| с.н.с., д.фм.н. | 18 mar 28.01.2022 | Ю.Н. Ерошенко | |
| | подпись, дата | (раздел 1) | |
| в.н.с., д.фм.н. | 4 28.01.2022 | В.И. Докучаев | |
| | подпись, дата | (раздел 1) | |
| | AP16 28.01 2022 | | |
| с.н.с., к.фм.н. | подпись, дата | _ А.Б. Копылов (раздел 2) | |
| | Value and and | | |
| г.н.с., д.фм.н. | | _ Ю.І. Куденко (раздельц 3-5) | |
| | | (pasterin 5 5) | |
| в.н.с., д.фм.н. | 28.01.2022 | Б.К. Лубсандоржиев | |
| | подпись, дата | (раздел 3) | |
| в.н.с., д.фм.н. | Shym/ 28.01.2022 | А.В. Буткевич | |
| | подпись, дата | (раздел 6) | |
| внс лф-мн | PA au 28 01 2022 | | |
| Б.н.с., д.фм.н. | подпись, дата | _ D.C. Пантусв (раздел 7) | |
| старший иженер по | | | |
| эксплуатации ускорителя, | He was | | |
| к.фм.н. | 28.01.2022 | Н.А. Титов | |
| | подпись, дата | (раздел 8) | |
| с.н.с., к.фм.н. | Bhol 28.01.2022 | В.В. Казалов | |
| | подпись, дата | (раздел 9) | |
| гис тф ми | Jun 28 01 2022 | ΠΕ Εραγικορ | |
| т.п.с., д.фм.п. | подпись, дата | _ л.в. всэруков (раздел 10) | |
| | Alexandre and an and a | | |
| в.н.с., д.фм.н. | | _ В.В. Синев (раздел 10) | |
| | Analah | (puster 10) | |
| с.н.с., к.фм.н. | 0 28.01.2022 | Н.Ю. Агафонова | |
| | подпись, дата | (раздел 11) | |
| н.с. | - ymp 28.01.2022 | Е.Н. Гущин | |
| | подпись, дата | (раздел 12) | |

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 170 с., 0 кн., 72 рис., 3 табл., 70 источн., 0 прил.

Ключевые слова: НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ, СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, КОСМОЛОГИЯ, ГРАВИТАЦИОННАЯ ДИНАМИКА, ГРАВИТАЦИЯ, ФИЗИКА КАОНОВ, РЕДКИЕ ПРОЦЕССЫ, С-, Р-, Т-СИММЕТРИИ И ИХ НАРУШЕНИЕ, ФИЗИКА ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА, НЕЙТРИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ДЕТЕКТОРЫ, СТЕРИЛЬНОЕ НЕЙТРИНО, СКРЫТЫЕ МЮОННЫЕ ФОТОНЫ, МУЛЬТИКАТОДНЫЙ СЧЕТЧИК, MACCA НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД. ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕННИЙ, СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ, СНИЖЕНИЕ ДВОЙНОЙ ΦOHA. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, БЕТА-РАСПАД, ДЕТЕКТОРЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, БОЛОМЕТРЫ, ПОДЗЕМНАЯ НИЗКОФОНОВАЯ ФИЗИКА. АНТИНЕЙТРИНО, ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЕЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, ГЕНЕРАТОРЫ МОНТЕ-КАРЛО, МАССИВНЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ, АДРОННЫЙ ТЕМНЫЙ ΦΟΤΟΗ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР, НЕЙТИРНО, КАЛОРИМЕТР. НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА, ИЕРАРХИЯ MACC ФОТОУМНОЖИТЕЛИ, ИСТОЧНИКИ СВЕТА.

В отчете представлены основные результаты фундаментальных и прикладных работ, выполненных согласно государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2021 год.

Работы программы фундаментальных проводились В рамках научных исследований государственных академий наук на 2013-2030 годы, пункт 1.3.3. «Ядерная физика и физика элементарных частиц»: 1.3.3.1. «Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий», 1.3.3.2. «Фундаментальная физика атомного ядра», 1.3.3.3. «Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц», 1.3.3.4. «Физика космических лучей», 1.3.3.5. «Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов, а также другие источники элементарных частиц, атомных ядер, синхротронного и рентгеновского излучения», 1.3.3.6. «Развитие методов детектирования элементарных частиц, атомных ядер и ионизирующего излучения, методов рентгеновской и нейтронной оптики», 1.3.3.7. «Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях».

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

1. Задача «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели»

Целью данной задачи является исследование физики частиц за рамками Стандартной Модели. В рамках настоящего исследования изучены процессы, которые происходили во Вселенной на инфляционной стадии ее развития, кроме того были разработаны новые аналитические методы в квантовой теории поля. Были изучены гипотетические процессы вне рамок Стандартной модели в столкновительных и лабораторных экспериментах. Целью данного исследования является разработка моделей физики высоких энергий, которые решают современные проблемы физики элементарных частиц, космологии и астрофизики. Основным инструментом исследования является аппарат математической статистики и квантовой теории поля. Данная задача разделена на следующие подзадачи.

Изучение аналитической структуры высших поправок теории возмущений современной теории сильных взаимодействий - квантовой хромодинамики

В работе рассматривается представление безмассовых физических величин в КХД по степеням конформной аномалии в 4-м порядке теории возмущений в КХД. Данное фиксации представление используется для членов, отвечающих за эффект асимптотической свободы КХД, коэффициетов ренорм-групповой бета-фунуции. Представлена фиксация 8 из 12 ранее неизвестных аналитических вкладов 5-го порядка теории возмущений, а так-же пропорциональных функции Римана ((4) аналитических вкладов в КХД с произвольным числом цветов в 3 из полностью нефиксируемых вкладов в 5-ти петлевые поправки. Проверяется теоретическая самсогласованность полученных резульатов.

Резонансное рождение электромагнитных мод в нелинейной электродинамике

Была исследована возможность усиления третьей гармоники, индуцированной одной электромагнитной модой в сверхпроводящем радиочастотном резонаторе, а также генерации сигнальной моды комбинированных частот, индуцированной двумя модами накачки (ω 1 и ω 2) в резонаторе. Решая неоднородные волновые уравнения для сигнальной моды, мы формулируем два резонансных условия для резонатора произвольной формы и применяем полученный формализм к одномерному линейному и трехмерному резонатору формы параллелепипеда. Было явно показано, что третья гармоника, а также мода комбинированной частоты 2ω 1 + ω 2 не усиливаются резонансно, в то время как

сигнальная мода с частотой 2ω1 – ω2 резонансно усиливается при определенной геометрии резонатора.

Построение меры функционального интегрирования в теории гравитации

Была исследована инвариантность действия квадратичной гравитации в метрике Фридмана — Леметра — Робертсона — Уокера относительно группы диффеоморфизмов временной координаты, и была найдена инвариантная динамическая переменная, в терминах которой переписывается теория квадратичной гравитации.

Гибридная модель структурных функций протона

Задача посвящена разработке новой количественной модели структурных функций протона в широком диапазоне инвариантных переданного импульса Q и массы W. В области высоких Q и W процесс описывается методами КХД с использованием кваркглюонных (партонных) распределений из глобального КХД анализа данных при высоких энергиях. В области возбуждения нуклонных резонансов, $W < 2 \Gamma$ эВ, учитываются вклады резонансов $\Delta(1232)$, N(1440) и еще трех эффективных резонансов, ответственных за описание наблюдаемых резонансных областей в неупругом рассеянии электронов на протоне. Параметры модели определяются из фитирования глобального набора данных по электронному рассеянию. В результате НИР была разработана новая количественная модель неупругих структурных функций протона, и впервые получено надежное описание наиболее полного глобального набора данных по дифференциальным сечениям инклюзивного рассеяния на водороде. Результаты работы применены для моделирования и интерпретации экспериментов по рассеянию электронов и нейтрино на протонах и ядрах.

Анализ экспериментальных данных эксперимента MARATHON с использованием теоретической модели глубоконеупругих структурных функция ядер

Задача посвящена изучению кварк-глюонной структуры нейтронов, а также развитию методов расчета ядерных поправок в глубоконеупругих процессах. В работе впервые было измерено отношение структурных функций нейтрона и протона F_2^{n}/F_2^{p} из данных по глубоконеупругому рассеянию на зеркальных ядрах 3H и 3He. В этой связи в проекте активно применялись результаты расчетов ядерных структурных функций на основе подхода разработанного в ИЯИ. Использование зеркальных ядер позволило существенно повысить точность измерения F_2^{n}/F_2^{p} , на данный момент это наиболее точное определение нейтронной структурной функции.

Процессы многочастичного рождения в теории скалярного поля

Разработан численный метод вычисления вероятностей процессов рождения большого числа бозонов в столкновениях частиц. Метод апробирован для теории

скалярного поля с потенциалом ϕ^4 . Полученные численные результаты согласуются с известными результатами, полученными в режиме малого числа частиц в конечном состоянии. Разработанный метод применим для случая произвольного квазиклассически большого количества бозонов в конечном состоянии.

Феноменологические следствия электрослабого фазового перехода в суперсимметричных моделях

Суперсимметричные модели остаются одними из наиболее изучаемых и разрабатываемых моделей, расширяющих Стандартную модель физики элементарных частиц. Однако отсутствие наблюдения суперпартнеров обычных частиц приводит к необходимости изучения нестандартных сценариев суперсимметричных расширений. В нашей работе было изучено возможное влияние сектора, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии, на электрослабый переход в ранней Вселенной. Было показано, что в рамках данного сценария электрослабый фазовый переход может быть фазовым переходом первого рода с интересными феноменологическими следствиями.

Черные дыры солнечной массы из нейтронных звезд и бозонной темной материи

Был рассмотрен механизм образования черных дыр солнечной массы за счет коллапса темной материи в центрах нейтронных звезд. Было продемонстрировано, что данный сценарий может быть реализован в моделях с бозонной темной материей несмотря на противоречащие друг другу требования к взаимодействиям ее частиц. С одной стороны, эти частицы должны эффективно рассеиваться на нейтронах, чтобы быть пойманными нейтронной звездой, с другой стороны, петлевые поправки от их взаимодействий индуцируют давление, препятствующее коллапсу. Был предложен механизм, который позволяет модифицировать модели взаимодействующей темной материи при сильных полях таким образом, чтобы гравитационный коллапс в центре нейтронных звезд был неизбежным.

Космологические решения в геометрии Вейля

Построены однородные и изотропные космологические решения в квадратичной гравитации Вейля. Получены соответствующие условия самосогласованности, которые обеспечивают конформную инвариантность полного набора уравнений движения. В случае однородности и изотропии существует калибровка (выбор конформного фактора), в которой вейлевское векторное поле можно положить равным нулю. Используя такую калибровку, были найдены вакуумные решения, отсутствующие в ОТО. Также были найдены решения для случая радиационно доминированной Вселенной с космологическим членом.

Исследование расширенных теорий гравитации Хорднески

В рамках данного исследования было построено действие для возмущений в теории Хорндески в Ньютоновой калибровке над космологическим фоном. Построен пример устойчивого однородного решения, для которого используемое ранее рассмотрение в унитарной калибровке неприменимо – квадратичное действие в унитарной калибровке сингулярно. Кроме того, в расширенной теории Хорндески построено квадратичное действие над сферически-симметричным фоном в унитарной калибровке Реджи-Уиллера. Разрешены уравнения связи такие, что, в отличие от полученных ранее результатов, в квадратичном действии для динамических степеней свободы не возникает особых точек.

Физика адронов, лептонов, бозона Хиггса и частиц тёмной материи. Эксперимент CMS

Проект посвящен участию сотрудников ИЯИ РАН в международных экспериментах, проводимых в ЦЕРН (Женева) – экспериментах CMS и NA64. В результате НИР получены следующие результаты.

Эксперимент CMS:

 сделан вклад в физическую программу СМS: группа ИЯИ РАН проводила моделирование и анализ экспериментальных данных БАК с целью поиска нового калибровочного правого бозона W_R и майорановского нейтрино;

– выполнены работы по модернизации электромагнитного и адронного калориметров установки CMS: работа на стенде для измерения характеристик радиационного повреждения новых образцов кристаллов для электромагнитного калориметра и на стенде для измерения различных типов образцов фотоприемников для адронного калориметра;

продолжены исследования базовых характеристик новых образцов КФЭУ,
 обладающих улучшенными параметрами: квантовой эффективностью, шумами, временем
 восстановления ячеек, быстродействием, динамическим диапазоном, температурной
 чувствительностью;

 проведены дополнительные испытания новых фотоприемников на пучках протонов, нейтронов и -квантов, потребовавшие существенного улучшения измерительных стендов и их программного обеспечения, что осуществлено силами группы ИЯИ РАН;

 выполнен анализ данных, накопленных на установке CMS, с целью изучения поведения характеристик КФЭУ, установленных на адронном калориметре и работающих в реальных условиях эксперимента;

 выполнены сервисные работы по качественному набору данных на установке CMS: дежурство в сменах, участие в обновлении и усовершенствовании программы сбора и сертификации данных и реконструкции событий.

Эксперимент NA64:

– на площадке в северной зоне ускорителя SPS, выделенной для проведения измерений на электронном пучке (канал H4, установка NA64e), проведены тестовые измерения отдельных детекторов и модернизированной установки NA64 в целом, и начаты первые эксперименты по поиску новых частиц, включая частицы темной материи и медиаторы взаимодействий скрытого сектора как для видимой, так и для невидимой моды их распадов, а также других процессов, в которых могла бы проявиться физика вне Стандартной модели на новом уровне чувствительности;

– на площадке в северной зоне ускорителя SPS, выделенной для проведения измерений на мюонном пучке (канал M2, установка NA64µ), проведен первый сеанс с использованием нового оборудования, созданного в рамках реализации Соглашения о предоставлении гранта № 05.613.21.0098 Министерством науки и высшего образования РФ по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2021 годы» и доставленного из России в ЦЕРН в начале августа 2021 года.

В результате анализа экспериментальных данных 2016-18 гг. в 2021 г. получены следующее результаты:

– поставлен предел на константу связи нового гипотетического бозона X: $\varepsilon < 7 \times 10^{-6}$ для масс m_X < 1 ГэВ и на его вклад в аномальный магнитный момент электрона, результат опубликован в журнале Physical Review Letter [1] и в настоящее время является лучшим, чем результаты других экспериментов;

– проведен комбинированный анализ экспериментальных данных, полученных в результате экспозиции 2017-18 гг., включающий в рассмотрение резонансное рождение частиц А'. Получены новые строгие ограничения для области больших масс m_{A'} > 100 МэВ. Результаты опубликованы в журнале Physical Review D [2].

Поиск новых наблюдательных проявлений сверхмассивной черной дыры в центре Галактики

Выполнено теоретическое исследование траекторий фотонов в метрике Керра, определяющих возможные формы тени черной дыры в реальных астрофизических условиях. Выполнены численные расчеты возможных форм теней черных дыр на примерах сверхмассивных черных дыр M87* в галактике и SgrA* в центре нашей Галактики.

Цель работы — поиск возможных наблюдательных проявлений сверхмассивных черных дыр.

В результате НИР были найдены два типа изображений (теней) астрофизических подсвечиваемых либо удаленным ярким фоном или излучением черных дыр, аккрецируемой материи. Проведено численное моделирование линзированного изображения яркого пятна, движущегося вдоль оси вращения черной дыры Керра. Эти быть изображения могут зарегистрированы разрабатываемыми космическими интерферометрами типа отечественного Миллиметрона.

Полученные результаты послужат основой для дальнейших исследований возможных наблюдательных проявлений черных дыр в рамках модифицированных теорий гравитации, отличных от общей теории относительности (ОТО).

Исследование роли первичных черных дыр в эволюции ранней Вселенной. Теоретическое исследование взаимодействия черных дыр с темной материей

Исследована роль первичных черных дыр (ПЧД) в эволюции ранней Вселенной. Выполнено теоретическое исследование взаимодействия черных дыр с темной материей. В том числе, изучено образование сгустков частиц темной материи вокруг ПЧД, их внутренняя структура и возможные наблюдательные проявления.

Цель работы — поиск и исследование новых процессов, обусловленных возможным рождением в ранней Вселенной ПЧД, предсказание возможных наблюдательных проявлений ПЧД.

В результате НИР был решен комплекс новых задач, затрагивающих различные аспекты образования и эволюции ПЧД, роли ПЧД в космологии. Исследован процесс слияния ПЧД в компактных кластерах, найден сдвиг величины постоянной Хаббла за счет трансформации массы ПЧД в гравитационные волны. На основе этой модели предложен новый вариант решения проблемы несогласованности постоянной Хаббла. Впервые рассчитан угловой момент ПЧД в модели с коллапсирующими доменными стенками. Исследована структура сгущений темной материи вокруг сверхмассивных ПЧД, найдено распределение температуры барионного газа в сгущениях, и впервые исследовано поглощение реликтового излучение в линии 21 см нейтрального водорода на периферии данных объектов. Предложено новое объяснение наблюдаемого сигнала NANOGrav в модели с коллапсом доменных стенок. Изучен новый механизм выравнивания температур в разных секторах космологической модели с зеркальной материей за счет испарения микроскопических ПЧД, и получены новые ограничения на многомерную планковскую массу.

Полученные теоретические предсказания для спина ПЧД в различных диапазонах масс могут быть учтены в расчетах космических фонов от ПЧД, испаряющихся в процессе хоукинговского излучения, поскольку спин ПЧД влияет на спектр генерируемого излучения. Поглощение в линии 21 см в кольцеобразных областях вокруг сверхмассивных ПЧД может быть использовано для поиска этих объектов на радиотелескопах следующего поколения.

2. Задача «Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи»

Объектом исследования являются темная материя в виде скрытых фотонов.

Цель работы — зарегистрировать эффект от темной материи в виде скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика.

Изготовлен мультикатодный счетчик с алюминиевым катодом усовершенствованной конструкции. Проведены калибровочные измерения с источником ультрафиолетового излучения. Проведены измерения скорости счета одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода на смеси неон + метан (10%). Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода ($0,81 \pm 0,08$)·10⁻⁴ Hz/cm². По результатам измерений получен верхний предел на параметр кинетического смешивания: < 1×10^{-11} в диапазоне масс для скрытого фотона от 9 до 40 эВ. Результат включен в компиляцию данных по свойствам элементарных частиц в Review of Particle Physics в журнале Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

Проведена новая серия измерений с более высокой статистикой. Получен улучшенный результат для верхнего предела 6×10⁻¹². Результат доложен на 20-ой международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц и принят для публикации в журнале «Moscow University Physics Bulletin».

Разработан новый метод регистрации скрытых фотонов по суточным вариациям скорости счета с помощью сборки мультикатодных счетчиков в подземной лаборатории. Метод позволяет по результатам суточных вариаций скорости счета определить направление вектора электрического поля скрытых фотонов относительно плоскости Галактики. Работа доложена на международной конференции ICPPA-2020 и опубликована в трудах конференции. Подробное изложение метода опубликовано в журнале ЭЧАЯ в январском выпуске 2021 года.

По результатам новой серии измерений впервые получены данные суточных вариаций скорости счета одиночных электронов в солнечной и звездной системе координат. Показано, что требование симметрии кривой вариаций относительно момента 12-00 позволит существенно подавить фон от ложных событий и тем самым повысить достоверность данных в плане доказательства того, что скрытые фотоны являются действительно источником наблюдаемых вариаций. Определение момента времени, относительно которого наблюдается симметрия в солнечной или звездной системе координат, позволит также определить, в какой системе координат темная материя имеет выделенную поляризацию, и даже определить направление вектора поляризации. Эти результаты также включены в труды вышеупомянутой конференции.

В настоящее время идет сборка нового счетчика усовершенствованной конструкции. Разработаны новая система сбора и обработки данных измерений и новое программное обеспечение. Это позволит увеличить статистику измерений и существенно повысить чувствительность данного метода.

3. Задача «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP»

Объектом разработки являются пластиковые сцинтилляционные детекторы.

Цель работы — создание в ИЯИ РАН новых нейтринных и мюонных детекторов для экспериментов ГиперКамиоканде, Т2НК и SHiP, старт которых планируется в 2027 году в Японии и в ЦЕРН. На первом этапе разработанные детекторы будут использованы в рамках модернизации ближнего детектора ND280 действующего нейтринного осцилляционного эксперимента T2К (Япония).

Сотрудниками ИЯИ РАН была проделана НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для эксперимента временного детектора SHiP, основная задача которого заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. Прототип временного детектора SHiP будет использован в качестве времяпролётного (ToF) детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (ГиперКамиоканде).

Были разработаны и протестированы черенковские детекторы на основе спектросмещающих пластин из полиметилметакрилата для внешнего черенковского детектора ГиперКамиоканде.

Эксперимент JUNO

Основные результаты 2021 года:

 окончание массового производства малогабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO;

 разработка дополнительной калибровочной системы на базе быстродействующих источников света и оптоволоконных кабелей для увеличения производительности массового тестирования малогабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO;

 внедрение и успешная эксплуатация разработанной системы в экспериментальном комплексе эксперимента JUNO в Гуанси, Южный Китай.

– Разработаны измерительные стенды для исследования параметров кремниевых фотоумножителей для ближнего детектора ТАО эксперимента JUNO.

 Разработана измерительная система для исследования послеимпульсов в мало- и крупногабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO.

4. Задача «Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино»

Объектом исследования являются осцилляции нейтрино.

Цель работы — определение осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K.

В 2021 году ИЯИ РАН продолжил работу в международном нейтринном осцилляционном эксперименте Т2К (Япония). В марте-апреле 2021 г. проведен сеанс (№11, начиная с 2010 г.) по набору статистики, во время которого максимальная мощность нейтринного пучка ускорителя J-PARC составила 512 кВт. Сотрудники ИЯИ РАН (как и другие иностранные коллеги) участвовали в сменах сеанса №11 эксперимента Т2К в удаленном режиме – из-за ситуации с Covid-19. Продолжен осцилляционный анализ данных, набранных в сеансах 2010-2021 гг., как при поиске дефицита мюонных (анти)нейтрино, так и при поиске появления электронных (анти)нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде на расстоянии 295 км от ускорителя J-PARC в Токай. Комбинированный анализ нейтринных и антинейтринных событий дальнего детектора Супер-Камиоканде с учетом ограничений на систематические ошибки нейтринного потока и сечений нейтринных взаимодействий, полученных благодаря ближнему детектору ND280, позволяет угочнить чувствительность эксперимента T2К к осцилляционным параметрам и CP нарушающей фазе.

Продолжается работа по поиску стерильных нейтрино и частиц легкой темной материи в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K.

5. Задача «Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам»

Объектом исследования являются каонные распады.

Цель работы — проверка Стандартной Модели посредством измерения распада положительного каона на пион и два нейтрино, других мод распада, запрещенных в Стандартной Модели и нарушающих СР и Т инвариантность, а также поиск различных «экзотических» частиц.

В 2021 году сотрудники ИЯИ РАН продолжали принимать активное участие в анализе данных и Монте-Карло моделировании каонных экспериментов, в частности, NA62 (CERN), E36 (KEK), OKA (ИФВЭ, Протвино). Была проведена работа по измерению вероятности распада положительного каона на пион и два нейтрино (NA62) на основе данных 2016-2018 гг., и получен новый результат Br(K⁺ $\rightarrow \pi^+\nu\nu$) = (11,0 + 4,0 -3,5 (stat.) ± 0,3 (syst.)) ×10⁻¹¹. Проведён поиск тяжёлых нейтральных лептонов (тяжёлых нейтрино) в продуктах каонных распадов как в данных NA62, так и в данных ближнего детектора ND280 нейтринного эксперимента T2K. Осуществлён поиск «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также проведена оценка чувствительности к массе аксионоподобных частиц, образовавшихся в каонных распадах эксперимента NA62. Продолжена работа по поиску редких распадов каонов, чувствительных к нарушению CP и T инвариантности. В эксперименте OKA измерен распад K⁺ $\rightarrow \pi^0$ e⁺ $\nu \gamma$ и для энергии фотона E γ > 30 MэB измерена вероятность распада, которая находится в хорошем согласии с предсказанием ChPT O(p4).

6. Задача «Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов»

Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis v_e Appearance) является определение параметров нейтринных осцилляций. В этом эксперименте используется самый мощный пучок (мощность более 700 кВт) мюонных нейтрино с энергией 1-3 ГэВ и два подобных детектора – ближний и дальний. Ближний детектор расположен вблизи источника нейтрино (Фермилаб, США), а дальний детектор находится на расстоянии 810 км Аш-Ривер (ш. Миниссота, США). Полученны новые ограничения на разности квадратов масс нейтрино Δm^2_{32} , значения sin^2 (θ_{23}) угла смешивания θ_{23} , фазы нарушения СР-инвариантности и иерархии масс нейтрино.

7. Задача «Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс»

Проект посвящен решению фундаментальной проблемы – поиску нового типа частиц стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю.

Цель работы — прецизионное измерение бета спектра электронов от распадов трития. Для этих целей используется установка «Троицк ню-масс». Установка состоит из

газообразного тритиевого источника, электростатического спектрометра с магнитной коллимацией и системы обеспечения жидким гелием для работы сверхпроводящих магнитов. В 2021 г. осуществлен переход на совершенно новую систему регистрации электронов. Система включает в себя новый семиканальный кремниевый детектор с уникальными параметрами по шумам и энергетическому разрешению, не хуже 100 эВ, сигма, электронику считывания и управления параметрами детектора, блоки прямой оцифровки формы сигналов, а также написанный пакет программ для считывания и записи информации.

Основным результатом проведенной в 2021 году работы является проведение сеанса измерений на установке «Троицк ню-масс». Произведен набор статистики для дальнейшей обработки с целью поиска пределов на возможное существование стерильных нейтрино в диапазоне масс в несколько кэВ. В результате сеанса были оптимизированы магнитные поля в спектрометре, выполнены калибровочные измерения отклика детектора на электроны с энергией 8-20 кэВ. Завершен анализ данных по результатам очистки спектрометра от загрязнения тритием. На основании этого анализа опубликована статья. Выполнен ряд запланированных расчетных работ по исследованию отклика детектора, особенно в около-пороговой области. В течение 2021 года постоянно проводились работы по профилактике, ремонту и модернизации криогенного и вакуумного оборудования.

8. Задача «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных»

Проект посвящен решению фундаментальной проблемы – установлению абсолютной шкалы масс нейтрино. Исследование нейтринных осцилляций надежно продемонстрировало отличие от нуля массы нейтрино и позволило измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино имеет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку их малая масса указывает на новую физику за пределам Стандартной модели, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино играет заметную роль в эволюции крупномасштабных структур во Вселенной.

Цель работы – поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бетараспаде трития в эксперименте КАТРИН.

В основе установки КАТРИН лежит идея электростатического спектрометра с адиабатической магнитной коллимацией, предложенная в 1983 году советскими физиками членами - корреспондентами АН СССР В.М.Лобашевым и П.Е. Спиваком [3]. Новый подход позволил сочетать высокое разрешение спектрометра и неограниченную площадь

безоконного газового источника молекулярного трития. Группой В.М. Лобашева, в ИЯИ РАН была создана установка «Троицк ню-масс», и получено ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино на уровне 2,05 эВ/с² [4]. В течение 16 лет этот результат был лучшим в мире.

В конце 1990-х группа В.М. Лобашева приступила к разработке проекта расширенного варианта установки «Троицк ню-масс», получившего позднее название КАТРИН, и вошла в первоначальный состав участников международного проекта, который сейчас состоит из более 150 исследователей из 20 институтов 7 стран [5, 6].

Установка КАТРИН включает безоконный источник молекулярного водорода активностью примерно 100 ГБк и электростатический спектрометр длиной 24 м и диаметром 10 м, который действует как прецизионный фильтр для пропускания электронов с энергией выше тормозящего потенциала спектрометра. Измерение переменного тормозящего электрического потенциала проводится на уровне точности в несколько ppm, что позволяет получить беспрецедентную точность в спектроскопии электронов распада трития.

Весной 2019 года был проведен четырехнедельный цикл измерения массы нейтрино. Несмотря на то, что содержание трития составляло только 25% от номинального, анализ данных привел к ограничению на эффективную массу электронного антинейтрино mv<1,1 эB/c², что превосходит по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты [7].

В 2020 -2021 году проведены пять новых сеансов измерений (KNM2, KNM3, KNM4, KNM5, KNM6). Результаты обработки сеанса KNM2 представлены в мае 2021 года [8]. Подробная статья принята к опубликованию в начале 2022 г.

Совместный анализ двух первых сеансов дает ограничение mv < 0,8 $\partial B/c^2$ (90% C.L.).

Основное внимание в 2021 г. было направлено на повышение чувствительности измерений и долговременную стабильность, а также контроль качества получаемых данных.

Проводились работы по снижению фона установки, необходимые для достижения проектной чувствительности к эффективной массе электронного антинейтрино.

За 2021 год публикации по разным аспектам проекта собрали более 300 ссылок в высокорейтинговых журналах.

9. Задача «Поиск 2К-захвата в Хе-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE»

Проект повещён решению следующих задач.

Поиск 2К-захвата в Хе-124

В лаборатории Низкофоновых исследований проводится эксперимент по поиску двухнейтриного 2К-захвата в Хе-124. Для этих целей используется медный (марка меди M1) пропорциональный счетчик большого объема, заполненный до +5,8 ат ксеноном, обогащенным по изотопу Хе-124, до ~ 21%. Счетчик окружен низкофоновой защитой, состоящей из 18 см меди, 15 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Сигналы с детектора, через предусилитель, подаются на вход цифрового осциллографа и, после оцифровки, с заранее заданными параметрами, записываются на жёсткий диск ПК. Такой способ сохранения информации позволяет в офлайн режиме проводить отбор полезных сигналов по форме импульса. Применение специальных процедур отбора полезных событий позволяет снизить фон в области интересов (63,6±3,7 кэВ) до 2000 раз

Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

Сотрудники лаборатории низкофоновых исследований БНО ИЯИ РАН являются участниками международной коллаборации AMoRE.

Данный эксперимент направлен на поиск безнейтринного двойного бета-распада Мо-100 с помощью криогенных болометров на основе сцинтилляционных кристаллов 40Ca100MoO4, а также Li2100MoO4. Эксперимент проводится в Южной Корее, в подземной лаборатории Янг-Янг. В 2020 г. началась первая фаза эксперимента – AMoRE-I. В общей сложности используется 18 сцинтилляционных кристаллов: 13 кристаллов 40Ca100MoO4 и 5 кристаллов Li2100MoO4. Общая масса кристаллов составляет более 6 кг. Ожидается достичь чувствительности экспериментальной установки по периоду полураспада 100Mo относительно безнейтринной моды двойного бета-распада на уровне ~1024.

10. Задача «Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA»

В состав темы входили следующие задачи: эксперименты GERDA и LEGEND. Эксперимент Double Chooz.

По задаче «Эксперименты GERDA и LEGEND» учёные из ИЯИ РАН в 2021 году участвовали в экспериментах GERDA и LEGEND, расположенных в LNGS INFN. Целью экспериментов является поиск двойного безнейтринного бета распада атома германия.

Эксплуатация установки GERDA была остановлена в прошлом году, и был опубликован основной результат. В 2021 году продолжен анализ экспериментального материала, подготовлены и опубликованы 2 статьи в журналах из базы WoS. В рамках эксперимента и LEGEND продолжалась подготовка к началу работы эксперимента LEGEND-200 и LEGEND-1000. Учёные дистанционно участвовали в работе рабочих групп и рабочих совещаниях обоих экспериментов.

По задаче «Эксперимент Double Chooz» целью работы является измерение третьего угла смешивания нейтрино θ_{13} в потоке реакторных антинейтрино. В работе использован метод относительных измерений. Измерения выполнялись одновременно ДВУМЯ идентичными детекторами, расположенными на разном расстоянии от ядерного реактора: в первом осцилляции отсутствовали (400 м), а во втором присутствовали (1050 м). Разница показаний двух детекторов дает искомый эффект осцилляций и позволяет определить угол смешивания нейтрино. В 2020-2021 годы проводился анализ сделанных ранее измерений двумя детекторами. В результате был сделан анализ на возможность осцилляций в стерильное нейтрино по измерениям на двух расстояниях от ядерного реактора. Получены ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние. Проведен анализ по новой методике (RRM, Reactor rate modulation) по определению угла смешивания нейтрино. Проведен анализ измерений во время остановки обоих реакторов и впервые получен спектр антинейтрино от долгоживущих осколков деления. Ранее этот спектр никогда не наблюдался экспериментально. Было измерено с высокой точностью сечение реакции обратного бета-распада. (σ_f) = (5,71 ± 0,06) × 10⁻⁴³ см²/деление. Полученные результаты могут использоваться для расчетов потоков антинейтрино на различных расстояниях от ядерного реактора при планировании новых экспериментов. Также полученное значение угла смешивания нейтрино будет учитываться при расчете потоков нейтрино и антинейтрино при постановке любых экспериментов на нейтринных пучках. В 2021 году были проведены работы по демонтажу ближнего детектора. Работы осложнялись обстановкой пандемийных ограничений. Дальний детектор пока остается на месте в связи с невозможностью доступа к нему из-за проблем с безопасностью проведения работ (осыпающийся потолок в пещере, ведущей к помещению детектора).

11. Задача «Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо»

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2021 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2021 годы, пункт 15.

Проект посвящен исследованию атмосферных мюонов со средней энергией 280 ГэВ, а также исследованию фона естественной радиоактивности в подземном экспериментальном зале Лаборатории LNGS. Исследования проводились по данным 2019-

2021 г экспериментальной установки LVD (Детектор Большого Объема, Италия). Для моделирования фонов методом Монте-Карло использовался пакет Geant4.

Цель работы:

– изучение свойств потока атмосферных мюонов. Рассмотрены источники сезонных температурных вариаций средней энергии потока мюонов, обнаруженные в эксперименте LVD. Показано, что сезонные вариации связаны с процессами генерации мюонов в верхних слоях атмосферы и прохождения мюонами слоя грунта большой толщины. Характеристики спектра и временное поведение мюонов и нейтронов, генерированных ими, необходимо учитывать при учете фона в низкофоновых подземных экспериментах.

– Изучение фона естественной радиоактивности, регистрируемом в подземном зале Лаборатории LNGS для двух экспериментов: LVD и NEWSdm. В результате анализа временных рядов скорости счета низкоэнергетического фона детектора LVD получено указание на наблюдение за 2-4 суток радоновых предвестников землетрясений с магнитудой больше 3,5 баллов, происходивших в Итальянском регионе. Показано, что изменение температуры, влажности и давления в подземном зале не влияет на ход скорости счета фоновых гамма-квантов в детекторе.

Для нового проекта NEWSdm проводится моделирование взаимодействия в веществе гамма-квантов радиоактивности грунта с целью подбора нужной защиты эмульсионного детектора от различных фонов.

12. Задача «Физические результаты коллаборации LHCb в 2021 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра»

Эксперимент LHCb сегодня является мировым лидером по изучению физики тяжелых кварков. Продолжается обработка набранных ранее данных. В 2021 г. получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В частности, благодаря большой статистике было подтверждено первое наблюдение дважды очарованного тетракварка, T_{cc}^+ , с составом кварков ccu[´]d, достигнута беспрецедентная точность изучения осцилляций D^0-D^0 .

Разработана детальная программа физических исследований с использованием фиксированной мишени на коллайдере LHC и подготовлен проект экспериментов с фиксированными мишенями для установки ALICE и LHCb.

СОДЕРЖАНИЕ

| СПИСОК И | ІСПОЛНИТЕЛЕЙ2 |
|---|--|
| РЕФЕРАТ. | |
| СОДЕРЖА | НИЕ19 |
| введени | E23 |
| Расчётн Развитие ан исследован; | ы и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. алитических методов вычисления в квантовой теории поля. Разработка и ие моделей физики вне рамок Стандартной модели |
| 1.1. Рас модели. Р | счёты и разработка новых методов вычислений для проверки стандартной Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля46 |
| 1.1.1. соврем | Изучение аналитической структуры высших поправок теории возмущений енной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики46 |
| 1.2. Pas | вработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели49 |
| 1.2.1. | Процессы многочастичного рождения в теории скалярного поля |
| 1.2.2. суперси | Феноменологические следствия электрослабого фазового перехода в имметричных моделях |
| 1.2.3. | Ограничения на легкие скаляры из результатов эксперимента PS19151 |
| 1.2.4. нейтри | Сигнатуры миллизаряженных частиц в трехмерно-сегментированном нном детекторе |
| 1.3. По свойств т | строение новых космологических моделей ранней Вселенной. Исследование ёмной материи и тёмной энергии. Астрофизика космических лучей51 |
| 1.3.1. матери | Черные дыры солнечной массы из нейтронных звезд и бозонной темной и51 |
| 1.3.2. | Космологические решения в геометрии Вейля |
| 1.3.3. | Исследование расширенных теорий гравитации Хорднески53 |
| 1.3.4. | Астрофизика космических лучей53 |
| 1.4. Уч | астие в международных экспериментах в CERN: эксперимент CMS55 |
| 1.4.1. | Участие в анализе данных CMS в 2021 году55 |
| 1.4.2. | Сертификация КФЭУ для новой электроники адронного калориметра55 |
| 1.4.3. адронн | Сборка и проверка блоков считывания и модулей новой электроники ого калориметра |
| 1.4.4. | Исследование характеристик работы адронного калориметра60 |
| 1.4.5. | Программное обеспечение эксперимента CMS62 |
| 1.5. Уч | астие в международных экспериментах в CERN: эксперимент NA6463 |
| 1.5.1. | Статус эксперимента NA64 в 2021 г63 |
| 1.5.2. | Результаты работы и достижения по эксперименту NA6463 |

1.6. Исследование роли первичных черных дыр в эволюции ранней Вселенной. Теоретическое исследование взаимодействия черных дыр с темной материей71 1.6.1. Кластеры первичных черных дыр и проблема постоянной Хаббла71 Угловой момент (спин) первичных черных дыр72 1.6.2. 1.6.3. 1.6.4. Микроскопические черные дыры в модели с зеркальной материей76 1.6.5. Сверхмассивные первичные черные дыры и поглощение в линии 21 см......77 2. 3. Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP... 3.1. Разработка и создание новых нейтринных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: Гипер-Камиоканде и Т2НК....84 Ближний нейтринный детектор Baby-MIND......84 3.1.1. 3.1.2. Сцинтилляционный сегментированный нейтринный 3D детектор SuperFGD85 3.2. Разработка и создание новых мюонных детекторов для Т2К и эксперимента следующего поколения по поиску темной материи SHiP86 Сцинтилляционные времяпролетные счётчики для Т2К как прототип 3.2.1. мюонных счетчиков эксперимента SHiP86 3.3. Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных 4. нейтрино и антинейтрино (Т2К). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных Продолжение набора статистики в эксперименте Т2К по изучению осцилляций 4.1. 4.1.1. 4.2. Улучшение чувствительности к СР нарушению в эксперименте Т2К и 4.2.1. получение нового результата91 4.3. 4.3.1. Поиск стерильных нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2К.. 5. Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам93 5.1. Измерение распада каона на пион и два нейтрино в эксперименте NA62 (ЦЕРН)93

| 5.2. Поиск тяжелых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо- подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечетным эффектам | 4 |
|--|---|
| 5.2.1. Поиск «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечетным эффектам. 94 | 4 |
| 5.3. Исследование распадов каонов на лету в эксперименте ОКА | 1 |
| 6. Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов90 | 5 |
| 7. Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троник-що-масс | 8 |
| 7.1. Экспериментальная установка | 3 |
| 7.2. Полученные в 2021 году результаты | 9 |
| 7.2.1. Проведение сеанса измерений спектра электронов от распадов трития99 | 9 |
| 7.2.2. Сборка, тестирование и калибровка нового детектора100 |) |
| 7.2.3. Оценка и исследование свойств сверхпроводящего кабеля10 | 1 |
| 7.2.4. Работы по профилактике, ремонту и модернизации криогенного и вакуумного оборудования10 | 1 |
| 7.2.5. Система сбора данных для многоканального детектора102 | 2 |
| Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных | 5 |
| 8.1. Работы по проекту КАТРИН сотрудников ИЯИ РАН | 5 |
| 8.1.1. Прецизионные измерения электромагнитных полей в спектрометре КАТРИН | 5 |
| 8.1.2. Исследование природы подавления дополнительного фона Основного Спектрометра проволочным электродом108 | 8 |
| 8.1.3. Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино .110 |) |
| 8.1.4. Разработка программы обработки данных эксперимента по поиску массы нейтрино11 | 1 |
| 9. Поиск 2К-захвата в Xe-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Mo-100 в составе международной коллаборации AMoRE112 | 2 |
| 9.1. Поиск 2К-захвата в Xe-124112 | 2 |
| 9.2. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE | 5 |
| 10. Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶ Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA118 | 3 |
| 10.1. Эксперименты GERDA и LEGEND118 | 3 |
| 10.2. Эксперимент Double Chooz119 |) |
| 10.2.1. Измерение угла смешивания нейтрино методом RRM |) |

| 10.2.2. | Ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние | 121 |
|---|---|-----------------|
| 10.2.3. | Измерение спектра долгоживущих осколков во время остановки р | еактора 122 |
| 10.2.4. | Измерение сечения реакции обратного бета-распада с высокой точ | іностью 122 |
| Изучени лаборатории Г | не фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в под ран-Сассо | земной 124 |
| 11.1. Мех глубинах | канизм температурных вариаций средней энергии мюонов на больп | ших 124 |
| 11.1.1. моря | Связь энергетических характеристик LVD-мюонов под землей и н | а уровне 124 |
| 11.1.2. на уровне | Сезонные вариации энергетического диапазона LVD-мюонов под моря | землей и 125 |
| 11.1.3. LVD-мюо | Сезонные вариации энергетического диапазона эффективной генернов | рации 126 |
| 11.2. Отк | лик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии | |
| 11.2.1. | Радоновый фон эксперимента LVD | |
| 11.2.2. | Предвестники землетрясений | 130 |
| 11.3. Под материи с по | готовка эксперимента NEWSdm по прямому обнаружению частиц омощью мелкозернистых эмульсий | темной 134 |
| 11.3.1. | Обнаружение частиц темной материи в эксперименте NEWSdm | 134 |
| 11.3.2. | Фон эксперимента | 136 |
| 11.3.3. | Гамма-кванты и влияние защиты из свинца | 136 |
| 12. Физичес LHCb. Участис | ские результаты коллаборации LHCb в 2020 г. Модернизация детек е в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра | тора 140 |
| ЗАКЛЮЧЕНИ | Е | 142 |
| СПИСОК ИСІ | ІОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 156 |
| ПУБЛИКАЦИ | И | 161 |

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели»

Работа Большого адронного коллайдера, а также запуск наземных и космических телескопов позволяет решить множество вопросов физики частиц, космологии и астрофизики. В частности, к таким вопросам относятся проблема генерации масс элементарных частиц, нарушения электрослабой симметрии и проблема темной материи. В основной части отчета описаны методы многопетелевых вычислений, которые необходимы для исследования процессов на Большом адронном колайдере и других экспериментов. Другим направлением данного исследования является экспериментальный поиск процессов и явлений гипотетического расширения Стандартной модели физики элементарных частиц (СМ). В исследовании были получены ограничения на параметры таких моделей. В исследовании также дается описание альтернативных к инфляции сценариев развития Вселенной и изучается проблема первичных черных дыр в ранней Вселенной.

Изучение аналитической структуры высших поправок теории возмущений современной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики

Изучение влияния высших поправок теории возмущений (вплоть до 4-го порядка) квантовой хромодинамики на измеряемые в экспериментах полные сечения электронпозитронной аннигиляции в адроны (Новосибирск, Россия, и Китай, Япония) и сечения рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах на ускорителе лаборатории Джефферсона (JLAB-CША) с целью более детального определения предсказаний теории. Выделение аналитической структуры поправок 5-го порядка теории возмущений в КХД с целью разработки теоретических методов и численных алгоритмов их вычисления.

Резонансное рождение электромагнитных мод в нелинейной электродинамике

Самодействие электромагнитного поля, отсутствующее в классической теории, возникает в квантовой теории из-за взаимодействия с виртуальными электронами. Одно из проявлений данного самодействия – рассеяние света на свете, несмотря на крайне малую константу взаимодействия, может быть проверена при условии резонансного усиления эффекта.

Построение меры функционального интегрирования в теории гравитации

Построение меры функционального интегрирования в теории гравитации представляет важную для пострения квантовой теории задачу, общее решение которой до сих пор не получено. Определённые надежды связаны при этом с обобщением действия Гильберта — Эйнштейна, которое состоит в добавлении слагаемых, квадратичных по кривизне пространства-времени.

Гибридная модель структурных функций протона

В настоящее время процессы сильного взаимодействия при высоких энергиях с хорошей точностью описываются с помощью методов квантовой хромодинамики (КХД) – теории сильного взаимодействия. Однако, в области низких энергий существующие методы КХД не применимы в силу роста эффективной константы сильного взаимодействия, и имеющиеся подходы носят феноменологический характер. Работа направлена на развитие гибридной модели неупругих реакций на нуклонах и ядрах в широком кинематическом диапазоне, объединяющей КХД-описание глубоконеупругого рассеяния, феноменологическое описание вкладов нуклонных резонансов и аналитическое продолжение в область малых переданных импульсов с учетом низкоэнергетических и пороговых теорем.

Анализ экспериментальных данных эксперимента MARATHON с использованием теоретической модели глубоконеупругих структурных функций ядер

Изучение различий в кварк-глюонной структуре протонов и нейтронов имеет ключевое значение для детального понимания сильного взаимодействия. Экспериментальное изучение нейтронов затрудняется их коротким временем жизни в свободном состоянии, и по этой причине в качестве нейтронных мишеней используются ядра. Работа направлена на измерение отношения глубоконеупругих сечений нейтронов и протонов из данных по зеркальным ядрам 3H и 3He эксперимента MARATHON (Jefferson Lab).

Процессы многочастичного рождения в теории скалярного поля

Известно, что для расчета амплитуд процессов рождения большого числа бозонов теория возмущений не применима даже в режиме слабой связи. В нашей работе разработан и апробирован численный метод вычисления сечений таких процессов в главном квазиклассическом приближении.

Феноменологические следствия электрослабого фазового перехода в суперсимметричных моделях

Изучение электрослабого перехода, вероятно происходившего в нашей Вселенной при температурах порядка 100 ГэВ, представляет большой интерес в связи с такими

интересными феноменологическими следствиями, как генерация барионной асимметрии Вселенной и образование гравитационных волн. В нашей работе проведено изучение влияния легкого сектора, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии на тип электрослабого фазового перехода и, в случае элекстрослабого фазового перехода 1го рода, получены предсказания для спектра образующихся гравитационных волн.

Черные дыры солнечной массы из нейтронных звезд и бозонной темной материи

Стандартная звездная эволюция не ведет к образованию черных дыр с массами ниже 2,5 масс Солнца. Поэтому обнаружение даже одного такого объекта детекторами гравитационных волн будет означать существование экзотического механизма рождения черных дыр. В нашем исследовании мы предлагаем новый механизм такого образования черных дыр.

Космологические решения в геометрии Вейля

Исследование направлено на поиск космологических решений в геометрии Вейля. В частности, решения искались для случая квадратичной гравитации Вейля. Хорошо известно, что требование конформной инвариантности в псевдо-римановой геометрии ведет к отсутствию невакуумных космологических решений в теориях гравитации. Оказывается, что в случае теории, основанной на геометрии Вейля, нетривиальные решения могут быть найдены.

Исследование расширенных теорий гравитации Хорднески

Исследование направлено на изучение теорий поля со старшими производными, в частности, теории Хорндески и ее расширений. Обсуждаются возможности построить космологические и сферически-симметричные решения, на фоне которых не возникает патологических степеней свободы.

Участие в международном эксперименте CMS

Были обработаны экспериментальные данные, полученные в 2016-2018 гг. На предварительной стадии отбора распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями, что говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях. Экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора в электрон-мюонном канале, которые хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной модели (СМ). Зарегистрирован пик от распада Z-бозона, используемый для мониторирования и контроля анализа данных. Наблюдается хорошее согласие с результатами моделирования методом Монте-Карло. При моделировании фона использовались генераторы AMC@NLO (tt +jets), madgraph

(W+jets), pythia8 (WW, WZ, ZZ), powheg (tW), а для сигнала - pythia8 (LRSM). В результате анализа данных, соответствующих полной светимости БАК примерно 80 фб⁻¹, были получены ограничения на массу тяжелого нейтрино в зависимости от массы правого тяжелого бозона W_R . Проведены обсуждения в коллаборации CMS предварительных результатов поиска правовинтового W-бозона и тяжёлого нейтрино, проведён сравнительный анализ этого поиска и соответствующих поисков, связанных с третьим поколением лептонов (конечное состояние содержит два тау-лептона) и в других каналах (две струи, два электрона + струи, два мюона + струи).

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

В 2021 году ЦЕРН по-прежнему находился в периоде длительной остановки ускорителя (LS2 – Long Shutdown 2). Эти остановки необходимы для исправления и улучшения работы ускорителя и экспериментальных установок. В течение 2021 года на установке CMS было проведено несколько сеансов работы с космическими лучами, так называемые MWGR (Mid-Week Global Runs), чтобы контролировать работу детекторов CMS. Изучение с помощью космических лучей дает хорошую возможность проверить фоновые условия в адронном калориметре установки CMS (аппаратный фон) в отсутствие физических процессов.

В рамках работ по модернизации установки CMS в течение LS2 были выполнены сборка и проверка блоков считывания и модулей новой электроники адронного калориметра (AK), разработка и проверка системы улучшенного охлаждения оптического приемника блоков регистрации и считывания модулей AK, проведены температурные измерения фронтальной электроники AK, проведена установка и проверка работоспособности новой электроники на основе КФЭУ, исследованы характеристики работы AK.

Участие в международном эксперименте NA64

В настоящее время установка NA64 является единственной в мире, предназначенной для прямого обнаружения невидимых распадов новой элементарной частицы – массивного векторного бозона (фотона), который является переносчиком гипотетического нового взаимодействия между обычной материей нашей Вселенной и темной материей.

Проект эксперимента по поискам нового бозона на протонном суперсинхротроне в ЦЕРНе был разработан и направлен в научный комитет SPSC CERN осенью 2014 года учеными из ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ (Протвино) и ОИЯИ Тёмный бозон (Дубна). _ гипотетическая частица-посредник, переносящая дополнительные взаимодействия между нашим видимым миром и темной материей. Новая частина аналогична обычному фотону, кванту света, переносящему электромагнитные взаимодействия между элементарными частицами, однако, в отличие от него, обладает массой. Многие научные группы в мире, включая такие страны, как США и Япония, ищут тёмный бозон, но пока безуспешно. Сегодня в физике высоких энергий нет задачи более важной, чем поиск хоть каких-то указаний на свойства темной материи, например, проявления сил, которые связывают ее с обычным миром. Известно, что темная материя взаимодействует с нашим веществом слабо, в основном посредством гравитации, поэтому судить о ее дополнительных свойствах и взаимодействиях приходится по косвенным признакам – нестыковкам в экспериментах и аномалиям в наблюдениях. Строятся различные гипотезы, в которых пытаются объяснить эти необычные факты. Одна из гипотез предполагает существование легкого темного бозона. Постановкой экспериментов по поиску темного бозона занимаются многие научные группы в мире, в том числе ЦЕРН. Проблема в том, что неизвестны ни константа взаимодействия этой частицы, ни ее масса, и вариантов распада можно предположить множество. Однако, лет десять назад появилась т. н. мюонная g-2 аномалия, расхождение между теоретическим и экспериментальными значениями величины аномального магнитного момента мюона, которая усилила интерес к этой гипотезе. Это известный эксперимент по измерению аномального магнитного момента мюона, проведенный Брукхейвенской национальной лабораторией в США. Результаты эксперимента расходились с предсказаниями на величину 3,6 стандартного отклонения. Были исключены несколько объясняющих расхождение сценариев, таких, например, как суперсимметрия. В числе оставшихся объяснений наиболее привлекательным является вклад в g-2 за счет существования легкого темного бозона, который может распадаться невидимым образом, например, на пару более легких частиц из скрытого сектора. Такие

свойства процесса – распад невидимой частицы по невидимому каналу – делает поиск крайне затруднительным.

Предложение на проведение эксперимента по поиску этой новой частицы большая группа авторов из российских институтов подала в комитет SPSC CERN осенью 2014 г. Это было обусловлено тем фактом, что только в ЦЕРНе можно получить интенсивность вторичных пучков электронов и мюонов, достаточную для поиска сигнала от темного бозона. Комитет SPSC CERN рекомендовал эксперимент для проведения первых поисков. Эксперимент обсудили и поддержали члены рабочей группы Россия-ЦЕРН. Общее экспериментом осуществляет научное руководство директор ИЯИО академик В.А. Матвеев, руководителем эксперимента стал в.н.с ИЯИ РАН С.Н. Гниненко, а техническим координатором – В.А. Поляков (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ). В Сотрудничество NA64, кроме российских групп из ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ и ОИЯИ, вошли ученые Германии, Греции, Чили и Швейцарии.

Впервые метод поиска процесса рождения и регистрации невидимых распадов темного бозона А' был предложен С.Н. Гниненко. Если бозон А', перемешивающийся с обычным фотоном, существует, он может рождаться в процессах тормозного излучения фотонов обычными электронами высокой энергии. Существование таких частиц может быть зарегистрировано путем аккуратного измерения полной энергии, выделившейся в детекторе, и проявляет себя как присутствие событий с большой недостающей энергией. В этом и состоит основная идея эксперимента NA64.

Установка NA64 была запущена в эксплуатацию в 2016 г. с набором данных в сеансах на канале H4 ускорителя SPS. Основной целью эксперимента на первом этапе был запуск всех основных подсистем детектора, отладка и запуск системы сбора данных, получение первых пробных физических результатов.

Установка NA64 состоит из следующих детекторов:

магнитный спектрометр с трековыми камерами типа Micromegas;

 система мечения 100-гэвных электронов на основе регистрации синхротронных фотонов с помощью специально разработанных детекторов типа сэндвич из примерно 200 слоев (Sc+Pb) с толщиной абсорбера порядка 100 мкм;

- электромагнитный калориметр типа «шашлык»;
- массивный адронный калориметр;
- высокоскоростная система сбора данных.

Экспериментальная база установки создавалась интернациональным содружеством из сотрудников лабораторий научных институтов России, DESY (Германия), ЕТН (Швейцария), Греции и Чили. В настоящее время Россию в Сотрудничестве NA64 представляют ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (Протвино), ОИЯИ (Дубна), ФИАН и Томский ГПУ.

Наблюдательные проявления сверхмассивных черных дыр

Для решения проблем физической интерпретации темной энергии, темной материи и образования сверхмассивных черных дыр во Вселенной необходимо идентифицировать теорию гравитации, которая используется в космологических уравнениях Фридмана-Робертсона-Уоккера в режиме сильного поля. В ближайшем будущем единственным уникальным способом проверки теорий гравитации в режиме сильного поля будут детальные наблюдения изображений черных дыр (в том числе, черной дыры SgrA* в использованием разрабатываемых центре нашей Галактики) с космических интерферометров типа Миллиметрон. Изолированные чёрные дыры в общей теории относительности являются невидимыми объектами, но их темные тени могут быть видимы на небесной сфере, если черные дыры подсвечиваются окружающим горячим веществом. Классическая тень черной дыры может наблюдаться в случае яркого удаленного фона позади черной дыры. На практике с наибольшей вероятностью можно наблюдать (при наличии соответствующего телескопа) линзированное изображение самого горизонта событий (его тень или силуэт), если аккрецируемая плазма остается очень горячей вплоть до горизонта событий черной дыры. Такие условия предсказываются современными магнитогидродинамическими симуляциями на суперкомпьютерах. В частности, на первом снимке сверхмассивной черной дыры М87*, полученном коллаборацией Телескоп Горизонта Событий, классическая тень черной дыры вообще не видна, а виден темный силуэт именно линзированного изображения горизонта событий.

Исследование роли первичных черных дыр в эволюции ранней Вселенной. Теоретическое исследование взаимодействия черных дыр с темной материей

Гипотеза о формировании первичных черных дыр (ПЧД) на ранних этапах эволюции Вселенной была впервые высказана в работе Я.Б. Зельдовича и Д.И. Новикова [9]. Позже были построены модели, в которых ПЧД могут образовываться во Вселенной не однородно, а образовывать скопления (кластеры). Одной из наиболее развитых и обоснованных моделей формирования таких кластеров является модель фрагментации доменных стенок [10]. В рамках этой модели ПЧД и их кластеры могут формироваться в различных диапазонах масс, а кластеры могут иметь различные размеры, в зависимости от свободных параметров теории. В процессе столкновения и слияния в кластере двух ПЧД в гравитационные волны преобразуется несколько процентов их массы, а получающийся в результате множественных столкновений фон гравитационных волн оказывает влияние на

динамику расширения Вселенной. В рамках данной задачи показано, что за счет излучения гравитационных волн постоянная Хаббла, получаемая по измерениям в ранней Вселенной, могла измениться на 5%, что может служить решением проблемы, известной как H_0 tension.

На количество ПЧД во Вселенной в различных диапазонах масс имеется множество космологических и астрофизических ограничений. Однако пока остается открытой возможность того, что ПЧД могут представлять всю темную материю, если они имеют массы 10²⁰-10²⁴ г. Наряду с ПЧД, в очень ранней Вселенной при столкновениях высокоэнергетических частиц могли рождаться и быстро испаряться микроскопические черные дыры. В рамках данной темы рассмотрены некоторые следствия рождения микроскопических первичных черных дыр.

Механизм формирования ПЧД, предложенный в [10], заключается в образовании в ранней Вселенной коллапсирующих замкнутых доменных стенок. При коллапсах неизбежно должны излучаться гравитационные волны, поскольку стенки несферичны. В рамках данной темы рассчитан спектр гравитационных волн и показано, что он хорошо соответствует данным, полученным в проекте NANOGrav по поиску гравитационных волн методом тайминга пульсаров. Вычисление углового момента ПЧД, образующихся по механизму [10], ранее не проводилось, и в рамках данной темы была решена задача по расчету их углового момента.

ПЧД, если они существуют, могут быть ответственны за различные астрофизические и космологические явления. ПЧД могут представлять темную материю, объяснять некоторую часть или большинство событий LIGO/Virgo (кроме событий с нейтронными звездами), массивные ПЧД могли бы давать затравки для образования квазаров на красных смещениях z>6, тогда как обычные астрофизические процессы встречают сложности в объяснении появления сверхмассивных черных дыр в столь ранние эпохи. Даже если ПЧД не могли образоваться в заметном количестве, сам факт их отсутствия во Вселенной дает полезные ограничения на различные космологические параметры, на спектр первичных возмущений плотности и на другие величины.

2. Задача «Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи»

В настоящее время надежно установлено из множества астрофизических наблюдений, а также точного измерения космологического фона микроволнового излучения, что не барионная холодная темная материя является существенным компонентом в нашем понимании, как устроена Вселенная. Поиск темной материи, имеющей примерно в 5 раз большую массу, чем видимая (барионная) материя, является важной задачей современности. В период с 90-х годов прошлого столетия по настоящее

время создан ряд экспериментальных установок, на которых предприняты попытки обнаружения частиц – кандидатов на темную материю. Наибольшие надежды до сих пор возлагались на слабовзаимодействующие частицы (WIMP), которые могли быть зарегистрированы по их рассеянию на ядрах мишени. Массы детекторов увеличивались, нынешние достигают уже масштаба 1 тонны, однако поиски WIMP пока не дали положительного результата. В связи с этим все более популярной становится идея расширить географию поиска частиц – кандидатов на темную материю и искать не только там, где современная теория считает поиск наиболее перспективным, но и, с учетом ненадежности теоретических предсказаний в этом вопросе, там, где только современные экспериментальные методы позволяют получить надежный результат. Эта тема сейчас звучит во многих работах, например, в работе [11].

Одним из альтернативных кандидатов на темную материю являются скрытые фотоны. Поиск темной материи в виде скрытых фотонов предпринимался в ряде работ, продолжается он и по настоящее время. Нами был предложен оригинальный метод поиска скрытых фотонов по регистрации одиночных электронов с поверхности металла. За 2016-2021 годы по этой теме нами было достигнуто следующее.

 Сформулирована идея регистрации скрытых фотонов по одиночным электронам, эмитируемым с поверхности металла.

Разработан и апробирован в измерениях экспериментальный метод.

 Разработана и изготовлена аппаратура и проведены калибровка детектора и испытания в рабочем режиме. Разработана методика обработки экспериментальных данных.

– Выполнены измерения на детекторе с медным и алюминиевым катодами.

– Обработаны данные и получены результаты.

Результаты опубликованы в печати. Результаты включены в мировую компиляцию данных по свойствам элементарных частиц (Particle Data Group).

Разработан новый метод регистрации скрытых фотонов по суточным вариациям скорости счета с помощью сборки мультикатодных счетчиков в подземной лаборатории. Метод позволяет существенно подавить фон от ложных событий и определить, в какой системе координат, солнечной или звездной, поляризация скрытых фотонов имеет выделенное направление. Метод позволяет также по результатам суточных вариаций скорости счета определить направление вектора поля скрытых фотонов относительно плоскости Галактики.

По результатам новой серии измерений впервые получены данные суточных вариаций скорости счета одиночных электронов в солнечной и звездной системе

координат. Получен также улучшенный верхний предел для константы кинетического смешивания: 6×10⁻¹².

Идет работа по сборке нового счетчика усовершенствованной конструкции. Разработана новая система сбора и обработки данных с большей статистикой, разработано новое программное обеспечение.

3. Задача «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP»

В 2021 году в ИЯИ РАН была продолжена разработка, создание и тестирование различных детекторов для экспериментов следующего поколения, начало работы которых планируется на 2026-2027 годы. К ним относятся ГиперКамиоканде – многоцелевой эксперимент с черенковским детектором объёмом 260 тысяч тонн чистейшей воды; Т2НК (из Токая в ГиперКамиоканде) – нейтринный эксперимент с протонным ускорителем и ближним детектором в J-PARC (Японский протонный ускорительный центр), Токай, Япония, и ГиперКамиоканде в качестве дальнего детектора; SHiP (Search for Hidden Particles) – эксперимент по поиску частиц тёмной материи на ускорителе SPS (Super Proton Synchrotron) в Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN). Для ГиперКамиоканде и Т2НК разрабатываются нейтринные детекторы, а для SHiP мюонные детекторы, основой которых являются пластиковые сцинтилляторы. Часть детекторов уже создана и работает (Baby-MIND, WAGASCI), а часть детекторов (SuperFGD, ToF) в ближайшее время будет использована для модернизации ближнего детектора ND280 действующего нейтринного эксперимента T2K (Tokai to Kamioka), а затем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения Т2НК. Также разработаны вето детекторы на основе спектросмещающих пластин для регистрации черенковского излучения BO внешнем детекторе ГиперКамиоканде.

Эксперимент JUNO

Одной из основных задач эксперимента JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) является измерение иерархии масс нейтрино. Центральный детектор эксперимента (20 ктонн жидкого сцинтиллятора) просматривается 18 тысячами крупногабаритными (20-дюймовыми) фотоумножителями с И ~26 тысячами малогабаритных (3-дюймовыми) фотоумножителями. Такая лвойная система фотодетекторов создается для достижения рекордного энергетического разрешения эксперимента, необходимое для решения задачи определения иерархии масс нейтрино. Также для улучшения чувствительности эксперимента JUNO создается ближний

детектора ТАО, который располагается в непосредственной близости (30-35 м) от реакторного комплекса Taishan. В этом детекторе события в гадолинийсодержащем жидком сцинтилляторе будут регистрироваться кремниевыми фотоумножителями. В детекторе ТАО жидкий сцинтиллятор и кремниевые фотоумножители будут работать при температуре -50°C. Необходимо провести тщательное исследование поведение жидкого сцинтиллятора и кремниевых фотоумножителей при этой температуре.

4. Задача «Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино»

В 2021 году ИЯИ РАН продолжил работу в международном нейтринном осцилляционном эксперименте Т2К (Япония). В марте-апреле 2021 г. проведен сеанс (№11, начиная с 2010 г.) по набору статистики, во время которого максимальная мощность нейтринного пучка ускорителя J-PARC составляла около 512 кВт. Сотрудники ИЯИ РАН участвовали в сменах этого сеанса в удаленном режиме. Продолжен осцилляционный анализ данных, набранных в сеансах 2010–2021 гг., как при поиске дефицита мюонных (анти)нейтрино, так и при поиске появления электронных (анти)нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде на расстоянии 295 км от ускорителя J-PARC в Токай. Комбинированный анализ нейтринных и антинейтринных событий дальнего детектора Супер-Камиоканде с учетом ограничений на систематические ошибки нейтринного потока и сечений нейтринных взаимодействий, полученных благодаря ближнему детектору ND280, позволяют уточнить чувствительность эксперимента Т2К к осцилляционным параметрам и CP нарушающей фазе.

Продолжается работа по поиску стерильных нейтрино и частиц легкой темной материи в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K.

5. Задача «Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам»

В 2021 году сотрудники ИЯИ РАН продолжали принимать активное участие в анализе данных и Монте-Карло моделировании каонных экспериментов, в частности, NA62 (CERN), E949 (BNL), E36 (KEK). Была проведена работа по измерению вероятности распада положительного каона на пион и два нейтрино (NA62) на основе данных 2016-2018 гг. и получен новый результат Br(K⁺ $\rightarrow \pi^+ \nu \nu$) = (11,0 + 4,0 -3,5 (stat.) ± 0,3 (syst.)) × 10⁻¹¹. Проведён поиск тяжёлых нейтральных лептонов (тяжёлых нейтрино) в продуктах

каонных распадов как в данных NA62, так и в данных ближнего детектора ND280 нейтринного эксперимента T2K. Осуществлён поиск «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также проведена оценка чувствительности к массе аксионоподобных частиц, образовавшихся в каонных распадах эксперимента NA62. Продолжена работа по поиску редких распадов каонов, чувствительных к нарушению CP и T инвариантности. Получено новое ограничение на нарушение T-инвариантности в эксперименте OKA, в котором измерялись тройные корреляции распадах заряженных каонов.

6. Задача «Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов»

Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые могут появиться в пучках мюонных (анти)нейтрино, в результате v_µ → v_e осцилляций. Это дает возможность определить вероятность таких переходов, а следовательно, и угол смешивания θ_{13} , фазу нарушения СР инвариантности в лептонном секторе и иерархию масс нейтринных состояний. 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 кварков и лептонов. Программа эксперимента также включает поиск сигналов от астрофизических объектов, в частности поиск событий, которые по времени совпадают с событиями от гравитационных волн, зарегистрированных коллаборацией LIGO/Vigro. Описание исследований программы И детекторов можно найти на сайте https://novaexperiment.fnal.gov.

7. 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 6 кэВ.

Определение массовой шкалы абсолютных и число нейтрино массовых состояний является 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 активных состояниям кажется спорным в стандартной космологии, но может быть совместимо с современными космологическими данными. В тоже время, стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько куВ могут являться естественным кандидатом на роль темной материи.

Нейтринные состояния Стандартной Модели, такие как v_e , v_{μ} , v_{τ} , и стерильные нейтрино v_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) = $\sum U^2_{ei} \times S$ (E, m²_i), где S (E, m²_i) 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, m²₄, и записать как

S (E) =
$$(1-U_e^2) \times S(E, 0) + U_{e4}^2 \times S(E, m_4^2)$$
.

Существующие лучшие ограничения на U²_{e4}, полученные в прямых экспериментах, показаны на рисунке 41. В диапазоне масс m_N 0,1 – 2 кэВ лучшие пределы были получены нашей группой в Троицке [12, 13].

В представленном эксперименте, мы расширяем энергетический диапазон измерения бета спектра до 6 кэВ. Несмотря на пандемию и ограничения в фактической работе, требующей физического присутствия людей, в 2021 году был проведен полноценный сеанс измерений.

8. Задача «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных»

Эксперименты по поиску эффективной массы электронного нейтрино

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы – поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития. Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку их малая масса указывает на новую физику за пределам Стандартной модели, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино играет заметную роль в эволюции крупномасштабных структур во Вселенной.

При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0,1 эВ, все типы нейтрино имеют одинаковую массу (см. рисунок 1) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.



Рисунок 1 – Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия)

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада (Майорановские нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (Майрановские и Дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность на уровне примерно 2 эВ была достигнута в экспериментах с молекулярным тритием в Майнце и Троицке с использованием электростатических спектров с адиабатической магнитной коллимацией.

Альтернативный подход к измерению массы электронного нейтрино основан на применении болометрических детекторов для регистрации полного энерговыделения в процессах бета-распада и К-захвата. Поиск массы электронного нейтрино в К-захвате в гольмии-163 ведут эксперименты HOLMES [14] и ECHo Collaboration [15].

Новый подход предложен в Project8 [16, 17]. Предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения частоты их циклотронных
колебаний в магнитной ловушке. На демонстрационной установке в резонаторе объемом 1 мм^2 , содержащем 2×10^{-5} Ci T2 получено ограничение $mv < 185 \text{ eV/c}^2$. Для получения проектной чувствительности 40 meV/c^2 необходимо перейти от резонатора к распределенной системе антенн и к источнику атомарного трития.

Проект КАТРИН, являющийся продолжением экспериментов в Троицке и Майнце, первым улучшил существовавшее ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино. В ноябре 2019 г. коллектив КАТРИН опубликовал результаты первого сеанса набора физических данных (КNM1) продолжительностью четыре недели. Был получен новый, лучший в мире, предел на массу электронного антинейтрино mv < 1,1 эВ/с2 (90% С.L.) [7]. В 2020-21 годах проведены пять новых сеанса измерений (КNM2, КNM3, КNM4, КNM5, КNM6). Результаты обработки сеансов КNM1 - КNM2 дали ограничение на массу нейтрино [18].

$mv < 0.8 \ \Im B/c^2 \ (90\% \ C.L.)$

Следует упомянуть новую большую программу, предложенную для установки КАТРИН. Она состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно 1эB/c² до нескольких кэB/c² [19].

В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трех состояний с определенной массой. Кроме того, есть основания предполагать существование дополнительных состояний, не участвующих во взаимодействиях в рамках Стандартной модели, и называемых поэтому «стерильными». Эти состояния являются смесью массовых состояний отличных от входящих в состав активных нейтрино. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси стерильных состояний в активных нейтрино. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния, спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из этих трех состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады. Так, примесь четвертого массового состояния должна проявляться в изломе В-спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [17]. Установка КАТРИН предоставляет для поиска стерильных нейтрино прежде всего уникальный безоконный источник газообразного трития активностью 100 ГБк (примерно 3 Ки). В тоже время, ее система регистрации электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена. При наборе данных в течение трех лет КАТРИН имеет возможность вести поиск вклада стерильных нейтрино с

массой несколько кэВ на уровне, не исключенном существующими астрофизическим наблюдениями.

Проект КАТРИН

В основе установки КАТРИН лежит электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией, предложенный в 1983 году советскими физиками, членами - корреспондентами АН СССР, В.М.Лобашевым и П.Е. Спиваком [3]. Новый подход позволил сочетать высокое разрешение спектрометра и неограниченную площадь безоконного газового источника молекулярного трития. На его основе, группой В.М. Лобашева, в ИЯИ РАН была создана установка «Троицк ню-масс» и в ходе измерений в 1994 – 2003 гг. было получено ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино на уровне 2,05эВ [4]. До самого последнего времени этот результат был лучшим в мире.

В конце 1990-х группа В.М. Лобашева приступила к разработке проекта, получившего позднее название КАТРИН, и вошла в первоначальный состав участников, который был сформирован в 2001 году. Сейчас коллектив проекта КАТРИН, базирующегося в Институт технологий Карлсруэ, Германия включает более 150 исследователей из 20 институтов 7 стран [5, 6].

Структура установки КАТРИН повторяет схему «Троицк ню-масс» (см. рисунок 2).



Рисунок 2 – Установка КАТРИН. RS-задняя стенка, DPS-R- задняя дифференциальная откачная станция, WGTS- безоконный газовый источник трития, DPSF-1- передняя откачная станция-1, DPSF-2 передняя откачная станция-2, CPSкриогенная откачная станция, PS- предварительный спектрометр, MS- основной спектрометр, FPD- основной детектор электронов

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк ню-масс», которая является прототипом установки КАТРИН [3-6].

Чтобы поддерживать постоянное количество распадов в источнике, обязателен замкнутый цикл трития с высокой пропускной способностью. Для работы этого беспрецедентного источника активностью примерно 100 ГБк требуется использовать всю инфраструктуру тритиевой лаборатории в Карлсруэ, внутри которой расположены собственно источник трития и система рециркуляции рабочего вещества. Находящийся в смежном здании огромный электростатический спектрометр длиной 24 м и диаметром 10 м действует как прецизионный фильтр для пропускания электронов с энергией выше тормозящего потенциала спектрометра. Только очень малая доля электронов вблизи граничной точки спектра несет информацию о массе нейтрино. Измерение переменного тормозящего электрического потенциала в диапазоне от 16 до 35 кэВ проводится на уровне точности в несколько ppm, что позволяет получить беспрецедентную точность в спектроскопии электронов распада трития.

Создание установки такого масштаба потребовало решения множества технических и даже логистических задач (см. рисунок 3).



Рисунок 3 – 25-е ноября 2006 года: корпус спектрометра КАТРИН доставляется в Технологический институт Карлсруэ

В 2018 году завершена подготовка установки к проведению исследований спектра трития в проектном режиме. Этому факту была посвящена связанная с первым напуском трития в систему «Инаугурация КАТРИН», состоявшаяся 11.06.2018 (см. рисунок 4).



Рисунок 4 – Первый запуск трития в установку КАТРИН. Участвуют известные ученые и организаторы науки, в том числе Нобелевские лауреаты 2015 года Артур Макдоналд и Такааки Кадзита. Россию представляет директор ОИЯИ, многолетний директор ИЯИ РАН, академик В.А.Матвеев Первый тритий был запущен в систему 11.06.2018 на уровне 1% от номинальной величины. Далее количество трития в источнике постепенно увеличивалось, одновременно велась проверка надежности работы системы дифференциальной откачки с целью не допустить загрязнения спектрометра тритием. Проводились различные технологические и физические исследования: проверялась стабильность толщины источника, его температуры, измерялась функция потерь энергии электронами при столкновениях с молекулами трития.

Весной 2019 года был проведен первый, четырехнедельный, цикл измерения массы нейтрино (KNM1). Несмотря на то, что содержание трития в источнике составляло только 25% от номинального, анализ данных позволил получить ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино, [7], mv<1,1 эB/c² (90% C.L.), которое превзошло по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты. Была также проанализирована величина возможной примеси стерильного нейтрино в диапазоне масс 1 эB/c² < m4 <30 эB/c² [18]. Полученные данные не противоречат результатам эксперимента «Нейтрино-4» [20].

В 2020-21 годах проведены пять новых сеанса измерений (KNM2, KNM3, KNM4, KNM5, KNM6). Результаты обработки сеансов KNM1 - KNM2 дали ограничение на массу нейтрино $mv < 0.8 \ B/c^2$ (90% C.L.).

Была также проанализирована величина возможной примеси стерильного нейтрино в модели 3+1 в диапазоне масс 1 эB/c² < m4 <30 эB/c² [21].



Рисунок 5 – Ограничения на примесь четвертого массового состояния, полученные в сеансе KNM1

9. Задача «Поиск 2К-захвата в Хе-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE»

Поиск 2К-захвата в Хе-124

В лаборатории низкофоновых исследований, начиная с 2014 года, идет эксперимент по поиску 2К-захвата в Хе-124. Для поиска данного процесса используется медный (марка меди М1) пропорциональный счетчик высокого давления (МПС), с рабочим объемом 8,77 л. Внутренняя поверхность счетчика покрыта дополнительным слоем меди марки М01 толщиной 1,5 мм. Счетчик имеет следующие размеры: внутренний диаметр - 137 мм, внешний диаметр – 150 мм, длина чувствительной области - 595 мм.

Счетчик окружен низкофоновой защитой, состоящей из 18 см меди, 15 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Установка находится в подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900, расположенной на глубине 4900 м.в.э.

Детектор заполнен ксеноном до давления +5,8 ат. Данный образец ксенона имеет следующий изотопный состав: Xe -124 ~ 21%, Xe -126 ~27,12%, Xe -128 ~ 33,4%, Xe -129 ~ 18,8%, Xe -130 ~ 0,071%, Xe -131 ~ 0,057%, Xe -132 ~ 0,026%, Xe -134 ~ 0,088%, Xe -136 ~ 0,0806%. Перед заполнением детектора, газ проходит очистку от электроотрицательных примесей с помощью титанового реактора, прогретого до 800 °C.

Сигналы с детектора оцифровываются осциллографом Ла-н10-12PCI, и записываются на жёсткий диск ПК. Такой способ сохранения информации позволяет в офлайн режиме проводить отбор полезных сигналов по форме импульса. Применение специальных процедур отбора полезных событий, позволяет снизить фон в области интересов (63,6±3,7 кэВ) до 2000 раз.

Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

Поиск безнейтриного 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 -Mo-100. Энергия перехода для Mo-100 составляет 3034 кэВ, что значительно больше чем максимальная энергия гамма-излучения от природной радиоактивности (линия 2615 кэВ Tl-208). Также достаточно большая природная распространённость (9,7%) позволяет, с меньшими затратами, наработать большое количество изотопа.

С целью поиска безнейтринного двойного бета-распада Мо-100, в 2010 году, была организована международная коллаборация AMoRE (Advanced Mo-based Rare process Experiment). Эксперимент проводится в Южной Корее, в подземной лаборатории Янг-Янг. Экспериментальная установка основана на сцинтилляционных кристаллах, используемых в качестве криогенных болометров, расположенных в криостате растворения при температуре ~10мК. На данный момент задействовано 18 сцинтилляционных кристаллов: 13 кристаллов 40Ca100MoO4 и 5 кристаллов Li2100MoO4. Общая масса кристаллов составляет более 6 кг.

10. Задача «Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA»

Эксперименты GERDA и LEGEND

В плане НИР ИЯИ РАН на 2019-2021 годы в теме исследований по программе ФНИ «Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология» в содержании работ содержится следующая формулировка, относящаяся к этой задаче:

«В GERDA полностью закончена подготовка второй фазы и начаты измерения и их анализ. Целью второй фазы является достижение индекса фона на уровне 10⁻³/кэВ·кг·год.

На основе полученных результатов планируется начать разработку крупномасштабного проекта ~ 200 кг ⁷⁶Ge.»

Целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа ⁷⁶Ge ($0\nu\beta\beta$ распвда). GERDA оперирует с открытыми германиевыми детекторами высокой чистоты из обогащенного ⁷⁶Ge (HPGe), погруженными в жидкий аргон.

Важный шаг в деле поиска $0\nu\beta\beta$ 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 (doi:10.138/nature21717). В 2020 году набор данных эксперимента GERDA закончен, в 2021 году продолжена обработка данных.

Одновременно проводятся работы по созданию нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND, монтаж первой фазы этого эксперимента, названной LEGEND-200, начат в 2020 году и продолжен в 2021 году.

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.

Эксперимент Double Chooz

В плане НИР ИЯИ РАН на 2019-2021 годы в теме исследований по программе ФНИ «Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология» в содержании работ содержится следующая формулировка, относящаяся к этой задаче:

«Будет проведён анализ данных эксперимента Dooble Chooz, полученных за последние три года при использовании полной схемы эксперимента с двумя детекторами».

После открытия осцилляций мюонных нейтрино в таонные и электронных нейтрино в мюонные стоял вопрос о возможности осцилляций электронных нейтрино в таонные. Сотрудником ИЯИ РАН В.В. Синевым совместно с Л.А. Микаэляном [22] была предложена схема эксперимента, в котором возможно измерить недостающие параметры осцилляций электронных нейтрино в таонные.

Были организованы три эксперимента в разных странах. В один из них, Double Chooz, вошли сотрудники ИЯИ РАН [23]. Эксперимент начал измерения в 2011 году одним детектором, а с 2015 по 2017 годы вел измерения двумя детекторами одновременно. В результате было получено значение угла смешивания $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm$

0,014 одним методом в 2020 г. и $\sin^2 2\theta_{13} = 0,095 \pm 0,015$ другим в 2021 г.

В 2020 году были получены и в 2021 опубликованы ограничения на параметры осцилляций реакторных нейтрино в стерильное состояние.

Впервые был обнаружен остаточный антинейтринныый спектр от остановленного ядерного реактора, вызванный долгоживущими осколками деления.

Было измерено с высокой точностью сечение реакции обратного бета-распада: (σ_f) = $(5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$ см²/деление.

11. Задача «Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо»

Изучение свойств потока атмосферных мюонов, нейтронов, и фона естественной радиоактивности в подземных экспериментах

Сезонные вариации атмосферных мюонов на больших глубинах под землей до сих пор остаются в поле зрения исследователей, главным образом как содержащие информацию, во-первых, о циклических процессах в верхних слоях атмосферы и, вовторых, о характеристиках и временном поведении фона в низкофоновых подземных экспериментах, например в лаборатории LNGS, Италия. Атмосферные мюоны и нейтроны, генерированные мюонами, являются фоном детектора LVD [24] для поиска редких событий, таких, как например, нейтрино по программе слежения за вспышками Сверхновых.

Еще одним источником фона в подземном Детекторе большого объема LVD являются естественная радиоактивность грунта и радон, который выходит из грунтовых вод в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе [25]. Установка регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона. При деформациях земной коры возникает напряжение, увеличивается количество микротрещин, что приводит к повышению концентрации радона.

Подготовка эксперимента NEWSdm по прямому обнаружению частиц темной материи с помощью мелкозернистых эмульсий

Продолжением эмульсионного проекта OPERA [26] в Гран Сассо, эксперимент по наблюдению появления тау нейтрино в пучке мюонных нейтрино, вызванного осцилляциями, является новый эксперимент NEWSdm [27]. NEWSdm paзpaбaтывается для регистрации упругих взаимодействий частиц тяжелой темной материи с ядрами барионной материи. Полноразмерный твердотельный трековый детектор на основе ядерной эмульсии, одновременно являющейся мишенью и детектором, имеющий фиксированную пространственную ориентацию относительно галактического гало темной

материи, будет установлен в подземной Лаборатории Гран-Сассо в условиях низкого фона космического и радиационного излучения.

12. Задача «Физические результаты коллаборации LHCb в 2019 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра»

Одним из важных методов проверки Стандартной модели является прецизионное измерение параметров СР-нарушения, поиск и изучение редких распадов D- и B- мезонов.

Эксперимент LHCb является мировым лидером по изучению физики тяжелых кварков на протонных пучках коллайдера LHC. Целью исследования является прецизионное измерение нарушения СР-четности, характеристик редких распадов адронов с с- и b- кварками, а также поиск эффектов Новой Физики в параметрах, имеющих точное предсказание в Стандартной модели (СМ). За годы успешной работы уже получены ключевые результаты, особенно чувствительные к проявлениям Новой Физики. Среди них такие, как измерение вероятности редкого распада В s →µµ, измерение угла γ унитарного треугольника матрицы смешивания, проверка «лептонной универсальности» и ряд других.

Институт ядерных исследований участвует в коллаборации LHCb, начиная с проектной стадии эксперимента 1993 г. На этапе создания установки ИЯИ РАН отвечал за разработку калориметрической системы, в том числе за изготовление предливневого детектора, а также разработку новой трековой системы на основе сцинтилляционных волокон. Были разработаны новые прототипы многоканальных фотоприемников на основе кремниевых лавинных фотодиодов с улучшенными характеристиками: уменьшенным коэффициентом оптической связи, удовлетворяющей требованиям однородностью чувствительностью.

Сотрудники ИЯИ РАН принимают участие в наборе и контроле качества данных калориметрической системы установки LHCb, в том числе в изучении и операционном контроле характеристик калориметра LHCb. Параллельно набору и обработке текущих данных эксперимент LHCb проводит подготовку к работе на модернизированном ускорителе LHC при большей энергии и светимости. Основная цель необходимой модернизации установки LHCb – обеспечение возможности работы на светимости до 2×10^{34} /см²/сек. Для этого требуется модернизация электроники всех подсистем и создание гибкого программируемого триггера. Модернизированный детектор во второй фазе эксперимента должен быть способен за 10 лет набрать статистику около 50/фб⁻¹ интегральной светимости. В этой связи, в частности, существенно возрастают требования к загрузочным характеристикам и радиационной стойкости элементов детекторов.

1. Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели

1.1. Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля

1.1.1. Изучение аналитической структуры высших поправок теории возмущений современной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики

Предложена кардинальная переформулировка аналитической структуры ряда теории возмущений в КХД вплоть до 5-го порядка для двух экспериментально измеряемых величин. Проведена проверка на самосогласованность полученных результатов с использованием методов ренорм-группы, масштабной и конформной симметрий и их нарушения за счет учета высших поправок теории возмущений по бегушей константе связи КХД. Подготовлены результаты для более детального анализа теоретических неопределенностей предсказаний КХД для двух изучаемых величин с целью сравнения с данными существующих электрон-позитронных и лептон-нуклонных ускорителей в области невысокой и высокой энергий. Поставлена задача выявления неопределенностей изучаемых вкладов, представляющих интерес для проектирования новых электрон-позитронных ускорителей будущего поколения с более высокой энергией в ЦЕРН и Китае для выявления возможных эффектов других взаимодействий, в том числе выходящих за рамки Стандартной Модели, сильных и электрослабых взаимодействий.

Резонансное рождение электромагнитных мод в нелинейной электродинамике

Мы рассматриваем две электромагнитные моды накачки в сверхпроводящем радиочастотном резонаторе и исследуем возможность резонансного рождения сигнальных электромагнитных мод комбинированных частот. Для этого мы записываем нелинейные волновые уравнения для электрического и магнитного полей, полученные из эффективного лагранжиана Эйлера-Гейзенберга, и решаем их относительно амплитуды электрического и магнитного поля сигнальных мод по теории возмущения. Из всех решений мы ищем резонансные – т.е. те, для которых амплитуды электрического и магнитного полей сигнальной моды растут линейно со временем (при учёте ненулевой диссипации), – установившиеся решения, обратно пропорциональные диссипации. Мы

формулируем два резонансных условия для резонатора произвольной формы и применяем полученный формализм к одномерному линейному и трехмерному резонатору формы параллелепипеда. Используя систему компьютерной алгебры WxMaxima, мы аналитически показываем, что третья гармоника, также как и мода комбинированной частоты $2\omega 1 + \omega 2$, не усиливаются резонансно для любого набора мод накачки как для линейного резонатора, так и для резонатора формы параллелепипеда, в то время как сигнальная мода с частотой $2\omega 1 - \omega 2$ усиливается при определенном соотношении сторон резонатора-параллелепипеда. По результатам работы опубликована статья [2].

Построение меры функционального интегрирования в теории гравитации

Нами была исследована инвариантность действия квадратичной гравитации в метрике Фридмана — Леметра — Робертсона — Уокера относительно группы диффеоморфизмов временной координаты и была найдена инвариантная динамическая переменная, в терминах которой переписывается теория квадратичной гравитации. Далее нами была построена мера функционального интегрирования, которая в качестве плотности меры содержит в показателе экспоненты члены действия, квадратичные по кривизне. При этом остальная часть действия рассматривается как взаимодействие. Такой подход принципиально отличается от предлагавшихся до сих пор. Показано, что построенная мера эквивалентна мере Винера, и в первом нетривиальном порядке теории возмущений вычислено среднее значение масштабного фактора как функция времени. По результатам работы опубликована статья [28].

Гибридная модель структурных функций протона

В работе развивается комбинированный подход к неупругим структурным функциям протонов, охватывающий как резонансное рождение, так и область глубоконеупругого рассеяния (DIS). Рассчитываются как поперечные (FT), так и продольные (FL) структурные функции, которые образуют полный набор функций, необходимых для вычисления инклюзивных дифференциальных сечений.

В области DIS мы следуем стандартному подходу и вычисляем структурные функции через функции распределения партонов с учетом пертурбативных КХД-поправок и поправок от операторов высших твистов определяемых из независимого глобального КХД-анализа.

В области достаточно низких масс рожденных адронов W < 2 ГэВ и квадрата инвариантного переданного импульса $Q^2 < 4$ ГэВ² экспериментальный спектр неупругого электрон-нуклонного рассеяния имеет три ярко выраженные резонансные структуры. Первая резонансная область связана с возбуждением резонансного состояния $\Delta(1232)$, а две другие связаны с суперпозицией ряда резонансных состояний. В нашей работе

резонансная область описывается в терминах пяти резонансов Брейта-Вигнера, состояния Δ(1232), состояния Ропера N(1440) и еще трех тяжелых резонансов, описывающих вторую и третью резонансные области. Мы рассматриваем резонансы более тяжелые, чем состояние Ропера, как эффективные состояния, которые включают вклады от ряда возбужденных состояний нуклона.

Ключевое наблюдение, на основе которого мы развиваем наш подход, заключается в том, что резонансные вклады исчезают при достаточно высоких W, а в сечениях преобладает нерезонансный фон. Если квадрат инвариантного переданного импульса Q^2 достаточно велик, фоновое рассеяние идентично DIS. По этой причине в нашем подходе нерезонансный фон при низких W и Q^2 вычисляется через структурные функции DIS, должным образом продолженные в непертурбативную область W < 2 ГэВ и Q < 1 ГэВ вплоть до предела фоторождения $Q^2 = 0$. Разработан новый метод экстраполяции структурных функций DIS в непертурбативную область обеспечивающий гладкость продолжаемых функций и учитывающий известные общие результаты в пределе $Q^2 \rightarrow 0$.

Параметры нашей модели – резонансные массы, ширины, параметры спиральных амплитуд отдельных резонансов, масштаб перехода Q_0 , а также параметры, ответственные за экстраполяцию в области с низким W и с низким Q, определяются из глобального фита к данным по дифференциальному сечению электророждения на водороде и полному сечению фоторождения на водороде. Нужно отметить, что по построению наша модель надежно описывает область DIS, т.к. мы используем результаты глобального КХД-анализа, и по этой причине нам не нужно повторно фитировать данные DIS и достаточно исследовать резонансную область. Впервые в анализе использован наиболее полный набор данных по сечениям включающий порядка 15000 экспериментальных точек. Такой широкий набор данных позволяет надежно определить параметры модели.

Разработанная количественная модель структурных функций FT и FL протона может быть применена в различных исследованиях, в которых требуется интегрирование по всему спектру промежуточных состояний и переданному импульсу. Примеры включают исследование структуры нейтрона с использованием экспериментальных данных на протоне и дейтроне, исследование ядерных эффектов в резонансной области, расчет полных и дифференциальных нейтринных сечений. В этой связи отметим, что в области энергий современных нейтринных экспериментов с длинной базой нейтриноядерное взаимодействие определяется возбуждением нуклонных резонансов и переходной областью DIS, и необходимо надежное моделирование соответствующих сечений для уменьшения систематических неопределенностей И правильной интерпретации экспериментальных результатов. Результаты работы опубликованы в статье [29].

Анализ экспериментальных данных эксперимента MARATHON с использованием теоретической модели глубоконеупругих структурных функций ядер

B эксперименте MARATHON (Jefferson Lab) были измерены сечения глубоконеупругого рассеяния на ядрах 3Н и 3Не с использованием двух спектрометров высокого разрешения для обнаружения электронов и криогенной мишени. Отношение глубоконеупругих структурных фукций нейтрона и протона F2ⁿ/F2^p было извлечено из отношения ядерных сечений 3Не/3Н. Для этого необходим совместный расчет ядерных эффектов и КХД-эффектов в ядрах 3Не и 3Н, который был проведен на основе подхода разработанного в ИЯИ. В ходе работы были исследованы зависимость результатов от трактовки высокоимпульсной компоненты в ядрах, аналитического продолжения структурных функций связанных нуклонов во внемассовую область, выбора спектральных функций 3Н и 3Не. Это позволило надежно определить теоретическую поправку необходимую для извлечения отношения F2ⁿ/F2^p и соответствующую погрешность. Сравнение с предыдущими измерениями SLAC и Jefferson Lab, использующими водородную и дейтеривую мишени, показывают, что результаты MARATHON на настоящий момент являются наиболее точным измерением партонной структуры нейтрона. По результатам работ подготовлена публикация [30]. Результаты работы найдут применение в различных областях физики высоких энергий.

1.2. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели

1.2.1. Процессы многочастичного рождения в теории скалярного поля

Для численного вычисления вероятности процессов множественного рождения в столкновениях частиц был использован разработанный ранее квазиклассический метод, предложенный Д.Т.Шоном. В этом методе вычисление вероятности множественного рождения сводится к нахождению решения классических уравнений поля с источником и определенными граничными условиями, связанными с энергией процесса и числом образующихся частиц. После нахождения решения квазиклассическая экспонента подавления вычисляется, используя действие на найденной полевой конфигурации, устремляя амплитуду источника к нулю. Однако, до нашей работы, классические решения такой граничной задачи были найдены только для режима относительно небольшого количества образующихся частиц. Одна из трудностей здесь связана с тем, что в пределе нулевого источника искомые классические решения оказываются сингулярными. Сам метод, по-существу, является регуляризацией метода Ландау квазиклассического вычисления матричных элементов в квантовой теории. В нашей работе была написана программа численного нахождения решений указанной граничной задачи, изучено, в том

числе аналитически, поведение решения вблизи сингулярности, разработан метод экстраполяции численных результатов для нахождения экспоненты подавления. В результате впервые были численно найдены (близкие к сингулярным) решения граничной задачи в очень широкой области энергии и числа частиц. Проведено сравнение полученных результатов для вероятности многочастичного рождения в тех областях энергий и числа частиц, где уже были ранее другими исследователями получены аналитические или численные результаты. Сравнение показало успешную работу разработанного численного метода, который может быть применен, в том числе при очень больших числах образующихся частиц. Этот режим и планируется исследовать в последующей работе. По результатам работы опубликована работа [31].

1.2.2. Феноменологические следствия электрослабого фазового перехода в суперсимметричных моделях

Если суперсимметрия является фундаментальной симметрией природы, она должна быть спонтанно нарушена. Следствием этого спонтанного нарушения является существование сектора голдстино — фермиона, который в рамках супергравитации играет дополнительных поляризаций массивного гравитино. В роль ряде сценариев, супермультиплет голдстино может быть легким с массами скалярных компонент голдстино порядка электрослабого масштаба. В этом случае, как было показано в предыдущих наших работах, новые скалярные степени свободы могут смешиваться с бозоном Хиггса и существенно влиять на его феноменологию. В данной работе было изучено их влияние на эффективный потенциал теории и на динамику электрослабого перехода. Используя существующие численные программные пакеты, проведено изучение пространства параметров модели с целью найти сценарии, в которых электрослабый фазовый переход будет переходом 1-го рода. Такие модели с новыми легкими скалярными степенями свободы были найдены, и данное исследование показало, что эти модели являются достаточно выделенными точками в пространстве параметров. А именно, для самосогласованного описания таких моделей В рамках низкоэнергетической суперсимметричной теории, в ее кэлеров потенциал приходится добавлять операторы старшей размерности. В работе был расчитан спектр гравитационных волн, которые образовались во время электрослабого фазового перехода 1-го рода, и было показано, что для некоторых из таких моделей гравитационно-волновой сигнал может быть зарегистрирован в экспериментах ближайшего будущего по поиску гравитационных волн. Кроме того, достаточно общим предсказанием изученного сценария является сильное влияние скалярных степеней свободы сектора, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии, на физику бозона Хиггса, в частности на ширины его распада и сечения

образования на адронных коллайдерах. По результатам работы подготовлена публикация [32].

1.2.3. Ограничения на легкие скаляры из результатов эксперимента PS191

Используя отрицательные результаты поиска стерильных нейтрино в эксперименте PS191, были получены ограничения на параметры моделей с гипотетическими лёгкими скалярами, которые могли рождаться в распадах каонов и внутри детектора PS191 распадаться в две заряженных частицы Стандартной модели, тем самым повторяя сигнатуру стерильных нейтрино. Этот анализ исключил новую, ранее разрешённую область на плоскости масса скаляра – угол смешивания с хиггсовским бозоном Стандартной модели. Результат важен для моделей новой физики со свзяью со скрытым скутором через хиггсовский (скалярный) портал. Работа опубликована в статье [33]

1.2.4. Сигнатуры миллизаряженных частиц в трехмерно-сегментированном нейтринном детекторе

В работе изучается возможность поиска гипотетических частиц с очень малым (по сравнению с зарядом электрона) электрическим зарядом на новом ближнем детекторе эксперимента Т2К при использовании сигнатуры двух рассеяний миллизаряженной частицы внутри детектора. Найдена область в пространстве параметров модели, доступная для исследования в ближайшие пару лет, а также область, которую можно будет проверить на следующей стадии проекта HyperK. Работа опубликована в статье [34].

1.3. Построение новых космологических моделей ранней Вселенной. Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии. Астрофизика космических лучей

1.3.1. Черные дыры солнечной массы из нейтронных звезд и бозонной темной материи

Существующие детекторы гравитационных волн позволяют регистрировать компактные объекты – черные дыры и нейтронные звезды – с массами от массы Солнца до нескольких десятков солнечных масс. Ожидается обнаружение сотен объектов в ближайшем будущем, что должно быть достаточным, чтобы измерить массовую функцию астрофизических черных дыр. Эта функция должна иметь провал в массах ниже 2,5 массы Солнца, т.к. давление Ферми стабилизирует достаточно легкие нейтронные ядра сверхновых звезд. Таким образом, формирование черных дыр с массами, примерно равными массе Солнца, может произойти только за счет экзотического механизма. Популярный класс сценариев, рассматриваемых в литературе, основан на трансмутации нейтронных звезд в черные дыры – либо за счет захвата реликтовой черной дыры,

пожирающей звезду, либо за счет гравитационного коллапса темной материи в ее центре. Мы изучаем коллапс темной материи, который не нуждается в популяции реликтовых черых дыр. Мы демострируем, что любая модель взаимодействующей асимметричной бозонной темной материи может быть деформирована при сильных полях таким образом, чтобы выключить давление в плотных сгустках ее частиц и сделать гравитационный коллапс максимально эффективным. В этом случае захват даже небольшого количества темных частиц достаточен, чтобы индуцировать гравитационный коллапс в центре нейтроной звезды.

Наш результат говорит о необходимости правильной идентификации объектов малой массы в сигналах детекторов гравитационных волн. Результаты работы опубликованы в статье [35].

1.3.2. Космологические решения в геометрии Вейля

Вейлевская геометрия – это нериманова геометрия (без кручения), в которой требование конформной инвариантности включено по построению. Условие согласованности метрики вейлевской структуры вводит дополнительное векторное поле. Это векторное поле при конформных преобразованиях ведет себя как абелево калибровочное поле.

Для получения уравнений движения можно теперь варьировать функционал действия квадратичной гравитации Вейля по метрике и векторному полю. Тогда для того чтобы уравнения движения были конформно инвариантными, удвоенная ковариантная производная вариации действия по векторному полю должна быть равна следу тензора энергии-импульса. В римановой геометрии это условие вырождается в обычное требование бесследовости тензора энергии-импульса в случае конформной симметрии.

Для случая когда к теории добавлена материя в виде идеальной жидкости, в действие нужно добавить слагаемые, зависящие от свертки вейлевского векторного поля и 4-скорости. Форма этих слагаемых ограничена уравнениями движения. Более того оказывается, что для того чтобы при варьировании получался эффективный тензорэнергии импульса идеальной жидкости, в действие необходимо включить лагранжев множитель, учитывающий несохранение числа частиц. После варьирования возникают дополнительные связи, из которых в принципе можно определить уравнение состояния для идеальной жидкости.

В случае требования однородности и изотропии, и как следует из уравнений движения, можно сделать ещё одно упрощение. Конформным преобразованием можно обратить вейлевское векторное поле в нуль. Из результирующей системы уравнений можно получить уравнение для масштабного фактора. В случае когда тензор-энергии

равен нулю (вейлевский вакуум), существуют решения отличные от решений ОТО. Другой новый класс решений соответствует эффективному тензору энергии-импульса излучения плюс космологическая постоянная. Результаты работы опубликованы в статье [36].

1.3.3. Исследование расширенных теорий гравитации Хорднески

Изучалась возможность построить решения в теории Хорндески, действие для возмущений, в которых всюду сингулярно в унитарной калибровке. При этом, конечно, имеются в виду устойчивые решения, то есть те, возмущения над которыми не имеют патологий (духовых и градиентных степеней свободы). Такие решения, вообще говоря, могут нарушать сформулированную ранее запрещающую теорему в теории Хорндески. В этом случае для рассмотрения возмущений была использована Ньютонова калибровка. Одним из результатов работы является как раз построение уравнений для возмущений в теории Хорндески в Ньютоновой калибровке. Кроме того, был построен пример устойчивого решения, для которого унитарная калибровка неприменима. Однако, к сожалению, построенное решение геодезически не полно и пока не является примером, нарушающим запрещающую теорему.

Изучалась возможность построить устойчивую модель статической сферическисимметричной кротовой норы в расширенной теории Хорндески. Ранее найденное квадратичное действие в стандартной калибровке (типа Ньютоновой) имеет особые точки в глобальных решениях без сингулярностей (в частности, в решениях типа кротовой норы). Таким образом, исследование глобальной устойчивости статических решений без сингулярности в таких калибровках затруднено. В этом году коллективом было вычислено полное квадратичное действие над статическим, сферически-симметричным фоном в расширенных теориях Хорндески без фиксации калибровки. Это позволило рассмотреть альтернативные варианты выбора калибровки. В результате была выбрана унитарная калибровка Редже-Уилера, и, благодаря особому способу учета уравнений связи, построено действие для динамических степеней свободы, не содержащее особых точек (нулей и бесконечностей). Унитарная калибровка Редже-Уилера используется впервые в ковариантных скалярно-тензорных теориях со старшими производными, и позволяет проводить полный анализ глобальной устойчивости для статических, сферически-симметричных решений в широком классе скалярно-тензорных теорий.

1.3.4. Астрофизика космических лучей

В 2021 году были продолжены научные исследования в астрофизике косических лучей.

Обнаружено, что как блазары, демонстрирующие аномально низкое поглощение гамма-излучения с энергиями выше 100 ГэВ, так и лацертиды, коррелирующие с космическими лучами сверхвысоких энергий в данных эксперимента HiRes, распределены по небу не изотропно и одинаково – все они наблюдаются сквозь области повышенной плотности галактик в Местной ветви крупномасштабной структуры Вселенной. Статистическая значимость отличия от изотропии составляет 4,0 стандартных отклонения после учета всех штрафных факторов. Это наблюдение находится в согласии со сценарием смешивания фотонов с аксионоподобной частицей с массой около 1 нэВ и константой связи с фотонами около 10⁻¹¹ 1/ГэВ.

Предложено использовать данные по зарядовому радиусу K^0 -мезона для ограничения электромагнитных свойств K^+ , что позволило существенно уточнить вычисление электромагнитного формфактора заряженного каона в рамках непертурбативной релятивистски инвариантной модели. Показано, что в секторе К-мезонов данная модель, как и ранее для π -мезонов, численно предсказывает корректное поведение формфакторов в области больших переданных импульсов (асимптотика КХД) без введения подгоночных параметров.

С использованием публично доступных данных нейтринного телескопа IceCube показано, что обнаруженная ранее ассоциация астрофизических нейтрино высоких энергий с радио-яркими блазарами, наблюдавшаяся для энергий нейтрино выше 200 ТэВ, сохраняется для всего диапазона энергий нейтрино, регистрируемых IceCube, – от ТэВ до ПэВ. Предложен механизм рождения нейтрино в фотоадронных процессах на фотонах комптоновского пика. Показано, что весь наблюдаемый поток астрофизических нейтрино высоких энергий может порождаться блазарами.

По данным эксперимента «Ковёр-2» на Баксанской нейтринной обсерватории обнаружена вспышка длительностью несколько месяцев, сопровождающаяся фотонами с энергиями выше 300 ТэВ, совпадающими по направлению и времени прихода с алертным нейтринным событием IceCube. Плотность потока энергии гамма-вспышки того же порядка, как и для нейтрино, что соответствует ожиданиям для стандартного механизма образования нейтрино. Полученный экспериментальный результат является первым свидетельством совместного образования нейтрино высоких энергий и гамма-лучей в Галактическом источнике. Дано теоретическое описание наблюдаемой вспышки как результату фотоадронных процессов в долгопериодической гамма-яркой двойной системе, направление на которую совпадает с зарегистрированным.

Также получен ряд результатов по физике космических лучей сверхвысоких энергий и широких атмосферных ливней в рамках экспериментальной коллаборации

Telescope Array, представлена физическая мотивация эксперимента по поиску солнечных аксионов BabyIAXO. Все результаты работ опубликованы в статьях [37-42].

1.4. Участие в международных экспериментах в CERN: эксперимент CMS

1.4.1. Участие в анализе данных СМЅ в 2021 году

Очередной этап поиска тяжелых нейтрино в эксперименте CMS

Были обработаны экспериментальные данные 2016-2017 гг. по триггеру «двойной т_h» с порогом 30 ГэВ. Распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов на предварительной стадии отбора хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Такое согласие с наблюдаемыми данными говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях. В электрон-мюонном канале экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора, которые хорошо согласуются с предсказаниями СМ. В электронном и мюонном каналах зарегистрирован пик от распада Z-бозона. Наблюдается хорошее согласие с результатами моделирования методом Монте-Карло. Для моделирования фона использовались генераторы AMC@NLO (tt +jets), madgraph (W+jets), pythia8 (WW, WZ, ZZ), powheg (tW), а для сигнала – pythia8 (LRSM). В результате анализа данных, полученных в течение 2018 г. и соответствующих полной светимости БАК порядка 80 фб⁻¹, были получены ограничения на массу тяжелого нейтрино в зависимости от массы W_R. Сделано сообщение на совещании CMS о поиске правовинтового W-бозона и тяжёлого нейтрино, проведён сравнительный анализ этого поиска и соответствующих поисков в других каналах (две струи, два электрона + струи, два мюона + струи), связанных с третьим поколением лептонов (конечное состояние содержит два тау-лептона).

1.4.2. Сертификация КФЭУ для новой электроники адронного калориметра Участие группы ИЯИ РАН в работах по модернизации

Группа ИЯИ РАН принимает активное участие в разработке и исследовании КФЭУ для модернизации 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.

В настоящее время группа ИЯИ РАН работает по фазе II в рамках общей группы SiPM CMS как по детектору MTD (Muon Timing Detector), так и по детектору HGCAL (High Granularity Calorimeter). Проводятся научно-исследовательские и опытноконструкторские работы по КФЭУ, изучение их радиационной стойкости, контроль качества, разработка измерительных стендов. В календаре общего плана CMS по фазе II модернизации работы по MTD/SiPM идут раньше работ по HGCAL/SiPM, поэтому все наработки по MTD/SiPM затем будут использоваться и для системы HGCAL/SiPM.

Стенд для измерения и проверки качества КФЭУ для проекта CMS MTD

В проекте CMS MTD BTL будет задействовано примерно 23000 линеек КФЭУ. Каждая линейка представляет собой массив из 16 отдельных каналов (рисунок), так что общее количество каналов в детекторе составит около 370000. Для снижения темнового тока в процессе эксплуатации все линейки в детекторе будут охлаждаться до температуры -30°C, это позволит соблюсти соответствие запланированным параметрам временного разрешения. В течение 2021 года образцы КФЭУ проходили отборочные испытания с целью выбора производителя всей партии КФЭУ для модернизации детектора MTD BTL.





Рисунок 6 – Образец линейки КФЭУ фирмы Hamamatsu на 16 каналов. Размер светочувствительной зоны одного канала — около 3 × 3 мм², ширина линейки 51,5 мм

Поставки основной партии линеек предполагаются в течение одного года, начиная с осени 2022 года. Все линейки и каналы КФЭУ будут проходить приемочные измерения для подтверждения параметров. Таким образом, для выполнения плана работ требуется обеспечить скорость измерений около 2000 линеек (32000 каналов) в месяц. Для проведения приемочных работ был разработан измерительный стенд, состоящий из коммутатора каналов, датчиков температуры, источников света, источника напряжения и пикоамперметра (рисунок 7). Управление компонентами стенда осуществлялось с помощью компьютера, для чего было разработано соответствующее программное обеспечение. Таким образом, стенд позволяет проводить измерения вольт-амперных характеристик КФЭУ и управлять температурой и уровнем освещения. Размер стенда

позволяет в процессе измерений помещать его в лабораторный морозильник (для обеспечения температуры -30°С), как показано на рисунке 8.

Рисунок 7 – Измерительный стенд на 12 линеек КФЭУ



Рисунок 8 – Измерительный стенд с двенадцатью установленными линейками КФЭУ внутри лабораторного морозильника. Кабели питания, управления, измерительных каналов (слева) выводятся за пределы морозильника

В течение 2021 года было изготовлено четыре стенда для измерения вольтамперных характеристик КФЭУ. Каждый стенд рассчитан на одновременную установку 12 линеек КФЭУ (то есть на 192 канала) и проведение измерений в условиях низкой температуры. Все стенды были проверены в работе и применялись для отборочных испытаний КФЭУ. Работы по отборочным испытаниям находятся в завершающей стадии, выбор производителя будет сделан в начале 2022 г. Работа с имеющимися стендами показала, что их возможности позволяют достичь необходимого ритма измерений (2000 линеек в месяц). Следует отметить, что имеющиеся стенды будут использоваться для массовых измерений КФЭУ и для проекта HGCAL. Для этого в настоящее время разрабатываются адаптеры для КФЭУ HGCAL.

С помощью измерительного стенда изучались характеристики КФЭУ. На рисунке 9 показан пример измерения фототока для КФЭУ производства фирмы FBK. Измерения проводились для 57 линеек (912 каналов) при температуре -36°С. Два канала имеют аномалии фототока, и еще два канала имеют короткое замыкание. Результаты измерения

вольт-амперной характеристики в прямом направлении для того же набора линеек представлены на рисунке 10. Как видно, два канала имеют аномалии, еще два короткозамкнуты.



Рисунок 9 – Результаты измерения фототока для приборов производства фирмы



FBK

Рисунок 10 – Результаты измерения вольт-амперной характеристики в прямом направлении для приборов производителя FBK

Результат измерения фототока и темнового тока для 244 линеек КФЭУ (3904 каналов) производства фирмы Hamamatsu показаны на рисунке 11. Измерения проводились при температуре -36°С. Как видно, все каналы функционируют нормально.



Рисунок 11 – Результаты измерения фототока и темнового тока для приборов производства фирмы Hamamatsu

На рисунке 12 представлены результаты измерения вольт-амперной характеристики в прямом направлении для того же набора линеек КФЭУ при температуре -36°С. Измерялось три типа линеек, отличающихся площадью светочувствительной зоны, поэтому наблюдается, как и ожидалось, разделение кривых на три группы. Все каналы функционируют нормально.



Рисунок 12– Результаты измерения вольт-амперной характеристики в прямом направлении для приборов производства фирмы Hamamatsu

Таким образом, изготовленные измерительные стенды позволяют обеспечить широкомасштабную проверку характеристик КФЭУ для детектора MTD BTL.

1.4.3. Сборка и проверка блоков считывания и модулей новой электроники адронного калориметра

Потеря мощности оптического сигнала с модулей управления и контроля (ngCCM) была связана с чрезмерным нагревом универсального оптического приемника VTRx. Для устранения данной проблемы была разработана система улучшенного охлаждения

оптического приемника без изменения существующей механики модуля, но с необходимостью монтирования системы охлаждения в изъятый для модификации модуль. Для установки новой системы охлаждения на каждый оптический приемник считывающего модуля ngCCM была проведена работа по демонтажу всех модулей управления ngCCM из торцевой части (HE) адронного калориметра HCAL.

Торцевые калориметры включают в себя 36 отдельных секций по 10° каждая. В свою очередь каждая секция состоит из полосок латуни, выступающих в роли абсорбера, и ячеек пластического сцинтиллятора. Световые сигналы от сцинтилляторов считываются световолокнами и передаются фотодетекторам. Затем аналоговые сигналы оцифровываются элементами считывающей электроники калориметра и передаются посредством так называемой регистрирующей электроники.

Элементы считывающей электроники размещены непосредственно на детекторе CMS в боксах считывания RBX. Элементы регистрирующей электроники находятся в соседнем служебном помещении. Схема установки боксов RBX приведена на рисунке 13. Каждый модуль ngCCM управляет одним считывающим боксом RBX.



Рисунок 13 – Схема организации считывающей и регистрирующей электроники НЕ

Всего было извлечено 36 модулей ngCCM с обеих торцевых частей адронного калориметра, которые впоследствии были пересобраны с новой системой охлаждения.

1.4.4. Исследование характеристик работы адронного калориметра *Tecmupoвaнue фильтра HFNoisyHitsFilter для набора miniAOD*

Передняя и задняя части адронного калориметра HF (Hcal Forward) расположены в непосредственной близости от пучка вдоль его оси. Каждая часть состоит из 13 конусов (Ieta = 29÷41), каждый конус имеет азимутальное разбиение по Iphi = 1÷71 с шагом 2. Съём сигналов с HF происходит с помощью оптических волокон, расположенных в канавках стальных абсорберов модулей HF. Оптические волокна подходят к

фотоэлектронным умножителям, которые обеспечивают съём информации. Существует два типа волокон – длинные и короткие. Длинные волокна проходят по всей длине абсорбера, короткие волокна начинаются в абсорбере на глубине 22 см. Электромагнитные ливни будут иметь заведомо разные сигналы в длинных и коротких волокнах в отличие от адронных ливней, что позволяет различить сигналы от электромагнитных и адронных ливней.

Основным источником шума в HF являются ранние по времени сигналы от релятивистских заряженных частиц, производящих черенковский свет в окнах и стенках волокон, фотоумножителей и в пучках оптических подводящих сигналы к фотоумножителям. Эти процессы характеризуются более ранними по времени сигналами по сравнению с сигналами от реальных физических процессов, обусловленных прохождением частиц через абсорберы HF. Изначально предполагалось, что ранние сигналы, образующиеся в окнах и стенках фотоумножителей HF, будут отбракованы новыми системами считывания QIE10, которые совместно с амплитудой сигнала позволяют получать временные характеристики этих сигналов. Но в случае с Ieta = 29÷33 сигналы от ранних срабатываний расположены по времени достаточно близко к сигналам от абсорберов, и возможно наложение этих сигналов.

С целью уменьшения количества событий с ложными струями подобного типа был разработан специальный фильтр HFStripFilter. Для использования результатов работы фильтра HFStripFilter был разработан и добавлен фильтр HFNoisyHitsFilter, предназначенный уменьшенными наборами данных miniAOD, для работы с получающимися после реконструкции событий. Набор переменных, хранящихся в miniAOD, ограничен. В частности, для HF хранятся только наборы хитов RecHits, имеющие любой выставленный флажок в FlagWord. Для активации фильтра необходимо добавить флажок HFAnomalousHit и вызов hfNoisyHitsFilter * в metFilters_cff.py.

Для проверки работы фильтра HFNoisyHitsFilter были подготовлены наборы данных: отфильтрованные события с удаленными фоновыми хитами и очищенные события с удаленными событиями, помеченными HF-фильтрами. Для первичного тестирования использовалась специальная выборка событий. После реконструкции из событий этой выборки были подготовлены наборы данных в miniAOD-формате. С использованием этих данных было сделано сравнение фильтрования и очистки для пакета PAT Jets (PAT – Physics Analysis Toolkit) (рисунок 14). Из рисунка 14 видно, что в случае фильтрования происходит перераспределение энергии струй в область низких энергий. В обоих случаях (фильтрования и очистки) из HF-фильтров был активирован только HFStripFilter. Другие HF-фильтры в данном сравнении не использовались.



Рисунок 14 – Сравнение распределений струй для событий из специальной выборки: все события (синяя линия), отфильтрованные (красная) и очищенные события (зеленая)

Из этого рассмотрения видно, что фильтр HFNoisyHitsFilter успешно работает с наборами данных miniAOD.

1.4.5. Программное обеспечение эксперимента CMS

В рамках выполнения обязанностей помощника руководителя генераторной группы в коллаборации CMS координировались работы по интеграции в программное обеспечение детектора CMS (CMSSW) генераторов событий методом Монте-Карло, вспомогательных пакетов для генераторов, а также разработка компонентов CMSSW для их работы. Таких генераторов и пакетов в CMS насчитывается более двух десятков. В рамках этой деятельности два раза в неделю проводились митинги по генераторам и общие митинги по развитию CMSSW, в среднем раз в две недели докладывался статус генераторной части CMSSW, а также раз в месяц проводился специальный координационный по генераторам. Осуществлялась общая МИТИНГ координация деятельности ответственных за интерфейсы к генераторам, в случае необходимости проводились консультации по интеграции генераторов. Одним из аспектов координации являлось участие в распределении количества пледжей (способ оценки объёма сервисных работ в CMS), имеющих отношение к генераторам.

Выполнялись обязанности ответственного за интерфейсы к генераторам pythia8, tauola++, за интеграцию и обновления вспомогательного пакета LHAPDF. Начата большая

и сложная работа по замене пакета HepMC2 на пакет HepMC3. Этот интерфейс используется во многих местах CMSSW. Проведены работы по поддержке твикистраницы по интеграции генераторных и вспомогательных пакетов в CMSSW.

Участие в международных экспериментах в CERN: эксперимент NA64 1.5.1. Статус эксперимента NA64 в 2021 г.

Набор статистического материала проводился в сеансе на установке NA64 в течение 2016-2018 гг. вплоть до остановки ускорителя SPS на период 2019-2020 гг. Решением комитета Research Board CERN было рекомендовано продолжить, начиная с 2021 г., набор новых данных, позволяющих обнаружить массивные бозоны с массами вплоть до 1 ГэВ. Результаты, полученные в результате обработки данных 2016-2018 гг., позволили сделать вывод о возможности расширения чувствительности NA64 к константе перемешивания и массам бозонов в диапазоне 1...600 МэВ. Отсутствие избыточных событий в режиме, когда магнит установки был включен, подтверждает правильность концептуальной идеи проведения такого эксперимента и позволяет сделать вывод о возможности установления верхнего предела на константу смешивания γ -A' ϵ < 10⁻⁶ на 95%-ном доверительном уровне. Точное значение предела зависит от значения интенсивности пучка в сеансе 2021 г. и количества набранных событий. Полученные Сотрудничеством NA64 предварительные результаты дают основание получить в 2021 г. наилучшие экспериментальные пределы на константу связи темный бозон-фотон, которые впервые находятся в области значений, предсказываемых моделями скрытого сектора. Ожидаемая чувствительность составит величину примерно на порядок выше, чем ныне достигнутая. Долгосрочные планы следующего этапа эксперимента в 2021 г. включают также подготовку и проведение измерений по поиску: а) невидимых распадов фотонов скрытого сектора на пару частиц темной материи; б) видимых распадов фотонов скрытого сектора на пары e⁺e⁻ с последующей их регистрацией в детекторе NA64; в) аксионоподобных и скалярных частиц и ряд других процессов.

1.5.2. Результаты работы и достижения по эксперименту NA64

Изготовление и доставка нового оборудования для установок NA64e и NA64µ

В результате работ, проведенных в 2020-2021 гг., были разработаны подсистемы модернизированного детектора NA64 для сеансов 2021 г. и далее, и начато полномасштабное производство новых детекторов в рамках реализации Соглашения о предоставлении гранта № 05.613.21.0098 Министерством науки и высшего образования РФ по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2021 годы». Изготовленное оборудование было доставлено из России в ЦЕРН в августе 2021 г. и

включало 4 модуля адронного калориметра HCAL, 3 модуля охранного адронного калориметра VHCAL, большой электромагнитный калориметр ECAL, детектор синхротронного излучения SRD, вольфрамовый калориметр и вспомогательное оборудование общим весом около 40 т для будущих сеансов на электронном и мюонном пучках. Оборудование было размещено в зале экспериментального комплекса (рисунок 15), а техническая группа NA64 приступила к сборке детекторов (рисунок 16).



Рисунок 15 – Размещение прибывших детекторов в зале экспериментального комплекса



Рисунок 16 – Начало сборки установки и подготовка к сеансам

Запуск установки NA64e и первые результаты сеанса на канале H4

Новая установка NA64е на электронном пучке канала H4 ускорителя SPS CERN показана на рисунке 17. Целью измерений на канале H4 являлось:

 запуск и сертификация нового электронного пучка, и сравнение его измеренных характеристик с расчетными;

- сборка и запуск новой установки NA64е на новой площадке канала H4;
- изучение и настройка уровня триггера полезных событий;
- запуск новых трековых детекторов типа Straw Tube;

 первые оценки уровня герметичности нового детектора и его чувствительности к сигналу.

Дальнейшее увеличение чувствительности поисков неизбежно влечет за собой необходимость существенного увеличения как интенсивности пучка, так и "скорострельности" установки. С этой целью в NA64e были также проведены измерения новых модулей электроники считывания и сбора данных.



Рисунок 17 – Установка NA64е в новой зоне канала H4 во время сеанса в 2021 г.

В результате первого сеанса на канале H4 в 2021 г. было набрано около 7×10^{10} электронов на мишени. Предварительные результаты анализа выборки объемом около 20% данных, показанные на рисунке 18, свидетельствуют об их хорошем качестве и отсутствии фона. Это позволяет планировать последующие новые поиски с набором существенно большего объема данных порядка 10^{12} электронов на мишени с целью впервые проникнуть в неисследованную область параметров моделей легкой материи, показанную на рисунке 19.



Рисунок 18 – Первые результаты сеанса на установке NA64е в новой зоне канала

H4



Рисунок 19 – Планируемая чувствительность (пунктирная кривая) поисков в 2022 г.

Одним из основных выводов сеанса 2021 г. является необходимость дальнейшей разработки и создания более быстрой системы сбора данных и автоматической системы контроля детекторов установки. Это включает в себя:

– разработку быстродействующей системы сбора данных DAQ и ее основных компонент, таких, например, как контролер, прескейлер и высокочастотные амплитудноцифровые преобразователи MSADC;

 проверку и автоматический контроль низкошумящей электроники, используемой для считывания информации с детекторов NA64, особенно узлов, связанных с работой системы калориметров WCAL, VHCAL, ECAL и HCAL;

- контроль состояния магнитного спектрометра и электроники камер трекера;
 - контроль состояния системы высокого напряжения калориметров.

Мониторирование установки, в частности счетчиков электромагнитного калориметра, необходимо осуществлять также и в течение сброса ускорителя на мишень путем периодического сравнения текущих показаний и контрольных значений параметров с возможностью вывода информации по любому детектору или узлу установки на дисплей, а также с записью информации на диск. При наличии отклонений от предусмотренных спецификацией параметров необходимо, чтобы система контроля оповещала сотрудников, находящихся на смене, о необходимости произвести остановку или контроль набора данных. Разработка и внедрение такой системы контроля позволило существенно повысить эффективность работы установки и поднять эффективность использования пучка.

Запуск новой установки NA64µ и набор данных в сеансе на канале M2

Участники эксперимента NA64 в ЦЕРНе успешно провели первый сеанс на мюонном канале M2 ускорителя SPS на новой установке, получившей название NA64µ. Проведение эксперимента было поддержано комитетом SPSC как первые поиски новой физики, связанной с недавним подтверждением Лабораторией Ферми (США) расхождения между теорией и экспериментом в величине аномального магнитного момента мюона. Сеанс проходил с 27 октября по 15 ноября. В ходе сеанса были смонтированы новые детекторы, проведена их настройка и калибровка, выполнен набор данных. Как отмечалось выше, это новое оборудование, в том числе адронные калориметры, было изготовлено в рамках реализации Соглашения о предоставлении гранта № 05.613.21.0098 Министерством науки и высшего образования РФ по Федеральной целевой программе и доставлено из России в ЦЕРН в августе 2021 года.

В октябре-ноябре 2021 г. в рамках общей исследовательской программы эксперимента NA64 был впервые осуществлен запуск и проведены первые измерения на установке NA64µ, собранной на мюонном канале M2 ускорителя CERN SPS. Целью эксперимента является поиск нового Z'-бозона с массой меньше 200 МэВ, который мог бы объяснить как расхождение между теорией и экспериментом для величины аномального магнитного момента мюона, недавно подтвержденное в эксперименте E989 в Лаборатории Ферми (США), так и происхождение темной материи в диапазоне масс ниже 1 ГэВ. Этот эксперимент на ускорителе SPS в ЦЕРН был предложен Сотрудничеством NA64 в 2019 г. Новая установка NA64µ, собранная в октябре 2021 г. в зоне мюонного канала M2 ускорителя SPS CERN, показана на рисунке 20.



Рисунок 20 – Новая установка NA64µ в зоне мюонного канала M2 ускорителя SPS CERN

Целью измерений NA64µ в сеансе на пучке M2 являлось:

 запуск и сертификация мюонного пучка M2, сравнение его измеренных характеристик с расчетными;

- изучение уровня триггера полезных событий;
- измерение уровня примеси адронов в мюонном пучке;
- первые оценки уровня герметичности детектора и его чувствительности к сигналу.

После наладки и калибровки был проведен набор данных с рабочими триггерами, зарегистрировано около 6×10^9 мюонов на мишени. Следующий сеанс эксперимента NA64µ на мюонном пучке запланирован на апрель-май 2022 года с целью впервые исследовать область параметров Z', объясняющую (g-2)µ -аномалию (показана на рисунке 21 как область, ограниченная двумя кривыми зеленого цвета). Результаты анализа, полученные ограничения и планируемая чувствительность также показаны на рисунке 21 (пунктирные кривые серого цвета). Эти результаты опубликованы в журнале Physical Review D [43].



Рисунок 21 – Область параметров Z', объясняющая мюонную аномалию (g-2)_µ, и планируемая чувствительность NA64µ

Ограничения на новую физику из поисков невидимых распадов

В рамках эксперимента NA64 был произведен поиск нового X-бозона в реакции $eZ \rightarrow eZX$, распадающегося в основном в невидимые моды. Рассмотрены случаи векторного (V), аксиально-векторного (A), скалярного (S) и псевдоскалярного (P) типов этой частицы, показанные на рисунке 22, для которых получены новые ограничения на связь с электроном и на вклад X-бозона в аномальный магнитный момент электрона.



Рисунок 22 – Вклады Х-бозона в аномальный магнитный момент электрона для случаев S, P, V и A

При анализе данных, соответствующих $2,84 \times 10^{11}$ электронов на мишени, пока не было обнаружено никаких свидетельств таких процессов. В результате были получены уникальные, наиболее строгие на данный момент ограничения на константу связи частиц с электроном как функцию массы m_X , показанные на рисунке 23 (слева) для масс $m_X < 1$ ГэВ. Из полученных результатов следует, что пределы на возможный вклад *X*-бозона в

аномальный магнитный момент электрона составляют $|\Delta a_e| \leq 10^{-15} \dots 10^{-13}$ для области масс m_X < 1 ГэВ. Эти ограничения, показанные на рисунке 23 (справа), также являются существенно более строгими, чем аналогичные пределы, полученные недавно из результатов прецизионных измерений постоянной тонкой структуры в экспериментах, выполненных в лабораториях LKB (Франция) и Berkeley (США) (рисунок 23 справа). Полученные по ограничениям на константу связи частиц с электроном как функцию массы m_X результаты опубликованы в журнале Physical Review Letters [44].



Рисунок 23– Область исключения на уровне достоверности 90% для связи бозона X с электронами в плоскости (ϵ_x ; m_x) (слева) и для вклада в аномальный магнитный момент электрона (справа) как функция массы частицы m_x , полученная из анализа данных NA64

Повышение чувствительности для дальнейшего поиска легких частиц в 2022 г.

Возможность дальнейшего улучшения чувствительности поиска легких скалярных (s) и аксионоподобных (a) частиц на установке NA64 была доложена в 2021 г. на июньском заседании комитета SPSC CERN и положительно отмечена членами комитета. В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для эффективной регистрации частиц a/s в ceancax 2022-2025 гг. Реализация такого детектора возможна, например, с использованием дополнительного более короткого модуля адронного калориметра на основе уранового поглотителя вместо модуля HCAL1. Это позволит улучшить эффективность регистрации короткоживущих скалярных и аксионоподобных частиц, что, в свою очередь, позволит улучшить чувствительность модернизированной установки 2022 г. по сравнению с установкой 2018 г.

1.6. Исследование роли первичных черных дыр в эволюции ранней Вселенной. Теоретическое исследование взаимодействия черных дыр с темной материей

1.6.1. Кластеры первичных черных дыр и проблема постоянной Хаббла

В последние годы точность построения космологических моделей существенно возросла благодаря прецизионным измерениями анизотропии реликтового излучения и повышения точности локальных астрономических наблюдений. Благодаря этому была обнаружена проблема несоответствия между различными наборами измерений, известная как Hubble Tension [45]. Оказалось, что постоянная Хаббла по измерениям телескопа Plank на основе процессов в ранней Вселенной меньше, чем постоянная Хаббла, получаемая по измерениям в локальной Вселенной на основе наблюдения цефеид и сверхновых класса Ia. решения данной проблемы без привлечения новых Предпринимались попытки физических явлений, которые пока не дали результата. Но было предложено и множество вариантов, включающих гипотезы, которые выводят за пределы обычных космологических моделей. К ним относятся распады частиц темной материи, эволюция темной энергии и многое другое.

В рамках данной темы рассмотрена модель с перекачкой энергии вещества в излучение — в гравитационные волны. Предполагается, что темная материя во Вселенной состоит из первичных черных дыр (ПЧД) с массами 10^{20} - 10^{24} г, которые собраны в очень компактные кластеры, причем дисперсия скоростей этих кластеров достигает слаборелятивистских значений (сотые и десятые доли от скорости света). Путем исследования эволюции кластеров и расчета излучения гравитационных волн показано, что эта модель является внутренне самосогласованной и допустимой в общей космологической картине. При этом она способна объяснить проблему H_0 tension за счет перекачки массы ПЧД в гравитационные волны при их слияниях в указанных экстремальных кластерах.

Динамическая эволюция и изменение структуры кластера ПЧД происходит за счет двухчастичной релаксации и за счет захвата ПЧД в короткоживущие тесные двойные системы, которые излучают кинетическую энергию в гравитационные волны и в итоге сливаются. В процессе слияния пара ПЧД может излучить несколько процентов своей массы в гравитационные волны, причем ПЧД могли испытывать по несколько последовательных слияний. Это тот эффект, который в данной модели отвечает за перекачку массы в релятивистскую компоненту – в гравитационные волны. При слияниях массы ПЧД растут, часть ПЧД вылетает из кластера (данный процесс называется динамическим испарением), и в результате полная масса кластера уменьшается.

Одним из широко обсуждаемых способов решить проблему постоянной Хаббла является сдвиг масштаба звукового горизонта в эпоху рекомбинации. Указанный сдвиг возникает в моделях с так называемым темным излучением, не взаимодействующим заметно с обычным веществом. К настоящему времени его плотность уменьшилась до малых значений из-за космологического красного смещения. Если эта перекачка энергии в гравитационные волны при слияниях ПЧД происходила, в основном, после рекомбинации, но при z > 10, то плотность темной материи в сопутствующем объеме с момента рекомбинации уменьшилась, а гравитационное излучение испытало к настоящему времени космологическое красное смещение и не дает существенного вклада в современную плотность Вселенной. С другой стороны, в момент же рекомбинации плотность темной материи в сопутствующем объеме была на ~ 10% выше, что повышает темп космологического расширения и постоянную Хаббла в ту эпоху по сравнению с моделями без перекачки энергии. Увеличение постоянной Хаббла в эпоху рекомбинации приводит к сдвигу первого акустического пика в угловом спектре реликтового излучения. Таким образом, по измерениям в ранней Вселенной современная постоянная Хаблла была бы меньше, чем по измерениям в локальной Вселенной в современную эпоху.

Указанные процессы были исследованы в рамках количественной модели эволюции кластера ПЧД, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений, и были найдены параметры кластеров, необходимые для эффективной перекачки нескольких процентов массы кластера в гравитационные волны. Необходимые массы кластеров составляют 18-560 масс Солнца. Сопутствующим результатом является то, что примерно ~10⁻⁴-10⁻³ часть наиболее плотных кластеров могли целиком коллапсировать в ПЧД с массами 18-560 масс Солнца и быть теми черными дырами, которые наблюдаются в части событий LIGO/Virgo.

Результаты опубликованы в журнале Physics of the Dark Universe.

1.6.2. Угловой момент (спин) первичных черных дыр

Наблюдение детекторами LIGO/Virgo всплесков гравитационных волн выявило две интересные особенности популяции сливающихся объектов: относительно большие массы и малый угловой момент отдельных объектов. Хотя эти особенности могут объясняться особенностями звездообразования и наблюдательной селекции, как отмечалось во многих работах, они могут указывать и на первичный механизм происхождения черных дыр LIGO/Virgo. В наиболее популярных механизмах рождения ПЧД получаются черные дыры с малым спином, а их массы могут быть распределены в широком диапазоне. Кроме того, на первичное происхождение черных дыр, наблюдаемых LIGO/Virgo, может указывать их функция масс, близкая по форме к лог-нормальной.
Спин ПЧД в модели коллапсов адиабатических возмущений был рассчитан в ряде работ, однако для коллапсов доменных стенок такой расчет выполняется впервые. В модели коллапсов адиабатических возмущений на радиационно-доминированной стадии спин ПЧД получался малым, прежде всего потому, что имеется сильная корреляция между направлениями главных осей квадрупольного момента коллапсирующей области и внешнего распределения вещества, создающего приливные силы, а форма возмущений в случае высоких пиков плотности близка к сферически симметричной. В данной работе мы показываем, что при коллапсах доменных стенок ПЧД могут иметь спин различной величины, в зависимости от массы ПЧД и параметров модели.

Доменная стенка несферична, она обладает квадрупольным моментом. Гравитационные силы со стороны окружающих адиабатических возмущений создают момент сил, который вызывает появление спина ПЧД. Коллапсирующая доменная стенка представляет собой энтропийное возмущение на фоне обычных адиабатических возмущений, причем оба типа возмущений в значительной степени статистически независимы. По этой причине должны отсутствовать сильные корреляции между направлениями главных осей квадрупольного момента стенки и квадрупольного момента в распределении окружающего вещества.

Используется эллипсоидальное приближение: доменная стенка моделируется поверхностью эллипсоида с постоянной поверхностной плотностью. Приливные силы, закручивающие стенку, создаются возмущениями в распределении излучения, которые после пересечения горизонта разбегаются как звуковые волны, поэтому набор спина коллапсирующей стенкой эффективно происходит примерно за одно хаббловское время после пересечения стенкой космологического горизонта. Распределение по величине спина находится численным путем с помощью разбиения пространства параметров на дискретные бины. Полученное распределение показано на рисунке 24.



Рисунок 24 – Функция распределения ПЧД по угловым моментам, нормированным на среднюю величину углового момента

Результаты расчетов показали, что безразмерный параметр спина ПЧД не достигает экстремальной величины $a_S=1$ только для черных дыр с массами более 10^{-3} масс Солнца. Для ПЧД меньших масс приливные силы закручивают ПЧД до экстремальных значений спина. Столь эффективный набор спина при малых массах объясняется тем, что при коллапсе доменных стенок, в отличие от коллапсов адиабатических возмущений, нет подавления, связанного с корреляцией направлений квадрупольного момента внутреннего и внешнего распределения вещества, а также благодаря сильной несферичности доменных стенок. При коллапсах адиабатических возмущений независимо от масс получались характерные значения $a_S \sim 10^{-3} - 10^{-2}$. После образования ПЧД ее спин мог бы изменяться под влиянием рассеиваемых звуковых волн в излучении, а также в результате аккреции вещества. Однако было показано, что эти два эффекты слабы и не ведут к заметному изменению спина ПЧД.

Малая величина спина, набираемого ПЧД звездных масс, означает, что события LIGO/Virgo с малым спином также могут объясняться ПЧД, рождающимися в результате коллапсов доменных стенок. Для маломассивных ПЧД в ранней Вселенной спин может быть очень важен для эффекта их хоукинговского испарения, поскольку он влияет на мощность и спектр излучения. Что касается сверхмассивных ПЧД, то они могут служить затравками квазарных черных дыр и существенно нарастить свою массу за счет дисковой аккреции вещества. При этом итоговая черная дыра может нести гораздо больший безразмерный спин, чем спин затравки.

Результаты опубликованы в журнале Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.

1.6.3. Коллапсы доменных стенок и гравитационные волны

Исследованы коллапсы доменных стенок, образующихся в результате квантовых флуктуаций комплексного скалярного поля на стадии инфляции. Параметры лагранжиана, включающего поправку от инстантонных эффектов, определяют поверхностную плотность доменных стенок и их начальное распределение по размерам. Образование замкнутых стенок возможно из-за наличия различных минимумов (вакуумов) у потенциала аксионоподобного поля на стадии инфляции.

Рассчитан спектр гравитационных волн, генерируемых при коллапсах доменных стенок. Гравитационные волны генерируются благодаря несферичности стенок — наличию у них квадрупольного момента в распределении массы. Учтено, что гравитационные волны испытывают гравитационное красное смещение при расширении Вселенной, поэтому суммируются волны, излучаемые в различные моменты времени доменными стенками с разными размерами. Тем самым, вблизи каждой из наблюдаемых частот гравитационных волн вклад дают разные части распределения стенок по размерам. В результате, был получен степенной спектр гравитационных волн $h \sim f^{5/4}$.



Рисунок 25 – Слева: Показано общее ограничение сверху на параметры доменных стенок (поверхностную плотность и параметр распределения) в зависимости от массы образующихся ПЧД. Справа: параметры модели, допускающие объяснение сигнала NANOGrav, показаны прямой линией. Стрелки ограничивают область, соответствующую данным наблюдений NANOGrav. Верхние кривые показывают известные ограничения сверху по ПЧД для двух крайних наблюдаемых частот

Выполнено сравнение найденного в расчетах спектра с предварительными данными проекта NANOGrav, в которых получены указания на наличие фона гравитационных волн. Рассчитанный показатель спектра -5,4 попадает в среднюю часть интервала, допускаемого наблюдениями NANOGrav. Нормировка спектра указывает на то, что соответствующие энергетические масштабы в лагранжиане отвечают

аксионоподобному скалярному полю. Так как при коллапсах доменных стенок происходит образование ПЧД, то известные из предшествующих работ ограничения на ПЧД дают ограничения на параметры рассматриваемой модели, эти ограничения показаны на рисунке 25.

Результаты работы опубликованы в журнале Physical Review D.

1.6.4. Микроскопические черные дыры в модели с зеркальной материей

Модели зеркальной материи были предложены Ли и Янгом в 1956 г. и подробно разработаны в статьях И.Ю. Кобзарева, Л.Б. Окуня, И.Я. Померанчука и других исследователей. Эти модели имеют много интересных следствий для космологии и астрофизики, в частности, зеркальная темная материя может образовывать объекты разных типов, включая доменные структуры.

В некоторых работах рассматривалась возможность того, что наши и зеркальные слова взаимодействуют не только гравитационно, но и посредством некоторого обмена энергией и материей. В данной работе изучается обмен энергией между нашим и зеркальным миром путем рождения и испарения микроскопических черных дыр. Ранее этот канал энергообмена применительно к зеркальной материи не рассматривался.

Первичный нуклеосинтез требует, чтобы температура реликтового излучения в зеркальном мире была ниже, чем в нашем. В противном случае появляются дополнительные релятивистские степени свободы, которые изменяют динамику первичного нуклеосинтеза и выход химических элементов. При наличии дополнительных измерений многомерная масса Планка может быть на много порядков меньше обычной 4мерной массы Планка, что снижает энергию, необходимую для производства микроскопических черных дыр. Этот эффект широко обсуждался в связи с Большим адронным коллайдером. Если черная дыра рождается при столкновении двух частиц нашего мира, то испаряется она как в наших, так и в зеркальных частицах. Таким образом, происходит передача энергии из нашего мира в зеркальный. Обратный поток энергии будет меньше, потому что температура зеркального мира ниже. Благодаря обмену энергией температуры нашего и зеркального мира могут быть выровнены. Это противоречит ограничениям по нуклеосинтеза и подразумевает наличие нижней границы массы Планка в многомерных моделях.

В данной работе выполнен расчет перекачки энергии между нашим и зеркальным мирами и исследован процесс выравнивания температур миров, в зависимости от величины многомерной массы Планка. Оказалось, что выравнивание температуры между нашим и зеркальным мирами происходит в течение примерно одного хаббловского времени. Основным результатом работы является ограничение на многомерную массу

Планка. А именно, было получено, что многомерная масса Планка должна превышать температуру повторного разогрева Вселенной ~10¹³ ГэВ. В моделях с плоскими дополнительными измерениями температура повторного разогрева значительно ниже многомерной массы Планка из-за космологических ограничений (перепроизводство ККмод). Поэтому многомерные модели с плоскими дополнительными измерениями уже сильно ограничены по максимальной температуре из-за эффекта перепроизводства ККмод. В связи с этим, выполненные расчеты актуальны не для всех моделей с дополнительными измерениями, а только для тех, где отсутствует космологические ограничения на КК-моды, например, для модели с гиперболическим компактным многообразием.

Результаты данной работы опубликованы в журнале Physical Review D.

1.6.5. Сверхмассивные первичные черные дыры и поглощение в линии 21 см

Одним из этапов эволюции Вселенной были так называемые Темные века (Dark ages). Он характеризуется, в частности, отсутствием видимых объектов, источников электромагнитного излучения, как в оптическом, так и в радиодиапазонах. Однако уже в ту эпоху могли существовать ПЧД с массивными гало из темной материи и захваченными барионами. При отсутствии собственного энерговыделения первые объекты могут давать наблюдаемые проявления только за счет их взаимодействия с реликтовым излучением. Перспективным методом поиска ранних нелинейных объектов является наблюдение линии 21 см сверхтонкого расщепления у нейтрального водорода. В данной работе указано на возможность наблюдения такого класса объектов в линии 21 см. Выбраны красные смещения вблизи $z \sim 20$, где условия для обнаружения таких объектов являются оптимальными.

После наступления момента равенства плотностей материи и излучения начинает эффективно работать процесс вторичной аккреции, и формируется универсальный профиль плотности темной материи. Поведение барионного газа вокруг ПЧД более сложное и зависит от массы ПЧД и рассматриваемой эпохи. В работе найдено распределение плотности и температуры барионного газа на периферии рассматриваемых объектов, где газ в значительной степени оставался нейтральным, а его плотность лишь немного превышала среднюю космологическую плотность. В поздние времена z < 150 барионный газ перестал обмениваться теплом с реликтовым излучением, и его сжатие было адиабатическим с хорошей точностью. В областях гало с разной плотностью температура газа различается. Однако из-за межатомных столкновений в газе возможно частичное выравнивание температуры. Расчет показывает, что в рассматриваемых масштабах время выравнивания температуры превышает текущее космологическое время.

Следовательно, теплопередача слабая, а барионные конденсации не изотермические, а описываются адиабатическим законом. При этом также показано, что влияние аккреционного излучения на центральную ПЧД не оказывает существенного влияния на состояние газа на периферии объекта.

Для рассчитанной структуры объектов были решены уравнения переноса реликтовых фотонов, распространяющихся через периферийные их области, и найдены характеристики поглощения в линии 21 см. Нелинейность приводит к сильному просветлению среды из-за вынужденных излучательных переходов вниз. В результате оптическая толщина оболочки в центре линии мала, и система уравнений переноса излучения может быть решена с помощью итераций. Оказалось, что имеются резонансные области, в которых аргумент коэффициента поглощения обращается в нуль, и образуется кольцо поглощения с угловым диаметром порядка 18 угловых секунд.

Радиотелескопы площадью более 1 км² (телескопов типа SKA) позволили бы искать такие объекты. Но наблюдение ширины кольца (~2 кпк) требует на порядок лучшего разрешения и, вероятно, будет доступно для телескопов следующих поколений.

Результаты данной работы опубликованы в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

2. Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи

Одним из кандидатов на темную материю являются скрытые фотоны. Для этих частиц в Лагранжиан электромагнитного взаимодействия вводятся два новых параметра: масса и константа кинетического смешивания. Введение двух новых параметров в теорию неизбежно влечет за собой появление новых процессов, которые могут быть обнаружены в эксперименте. Сложность регистрации таких процессов объясняется малостью константы кинетического смешивания. Нами предложен новый метод регистрации скрытых фотонов по одиночным электронам, эмитируемых с поверхности металла при конверсии скрытых фотонов в обычный фотон с последующим фотоэффектом. Мишенью в данном случае являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла. Этим данный эксперимент кардинально отличается от других экспериментов, где мишенью являются валентные электроны атомов. Различие в физике этих процессов приводит к тому, что эти эксперименты взаимно дополняют друг друга. Нами разработан специальный детектор для эффективной регистрации одиночных электронов – мультикатодный счетчик с тремя катодами. Конструкция детектора позволяет достичь эффективности регистрации одиночных электронов, значительно превосходящий существующие методы с помощью ФЭУ, ВЭУ и другие за счет использования оригинальной его конструкции. Подробно общая идеология эксперимента, а также работа мультикатодного счетчика нами описаны в работах [46, 47]. Центральная часть счетчика в момент его сборки изображена на рисунке 26.





Рисунок 26 – Центральная часть счетчика (слева) и схема счетчика (справа) HV1, HV2, HV3 – высокое напряжение на катодах 1, 2, 3, PA – предусилитель, PA-5152 – плата оцифровки напряжения на выходе предусилителя

В этом счетчике, схематически изображенным на рисунке 26, рабочей поверхностью является внешний катод цилиндрической формы, из которого эмитируются

электроны. За счет относительно большой (примерно 0,3 м²) площади катода достигается высокая чувствительность детектора. Одиночные электроны, эмитируемые из катода, дрейфуют в газе по направлению к внутреннему цилиндрическому счетчику, где регистрируются за счет высокого (примерно 105) газового усиления. Рядом со сплошным металлическим катодом располагается второй катод, образованный натянутыми нитями с определенным интервалом, который выполняет функцию сетки в электронной лампе. На этот катод подается либо положительный (относительно потенциала сплошного катода), либо отрицательный (запирающий) потенциал. На рисунках 27, 28 представлены картины потенциала полей для этих двух конфигураций. На рисунке 29 показаны напряженности полей в этих конфигурациях.



Рисунок 27 – Потенциалы поля в конфигурации 1



Рисунок 28 – Потенциалы поля в конфигурации 2



Рисунок 29 – Напряженности поля в конфигурации 1, 2

В первом случае (конфигурация 1) электроны, эмитируемые из катода, свободно диффундируют в поле по направлению к центральному счетчику. В этой конфигурации детектор измеряет скорость эмиссии одиночных электронов плюс фон R1. Во втором случае (конфигурация 2) измеряется только фон R2. Скорость регистрации одиночных электронов находится как разность этих двух измеренных величин R1 - R2. Калибровка счетчика производилась по одиночным электронам, выбиваемым из катода счетчика ультрафиолетовыми фотонами от кварцевой лампы.

Электронная схема измерения состояла из зарядочувствительного предусилителя, платы оцифровки импульсов и блоков высокого напряжения. Чувствительность зарядочувствительного предусилителя составляла 0,38 В/пКл. Оцифровка импульсов производилась в диапазоне амплитуд ± 50 мВ с частотой дискретизации 10 МГц и шагом квантования 400 мкВ. Обработка данных проводилась в режиме оффлайн. Полезным сигналом считались импульсы с амплитудой от 3 до 30 мВ с коротким фронтом импульса, соответствующим времени дрейфа отрицательных ионов к катоду центрального счетчика, и пологим спадом, соответствующим времени восстановления нулевой линии зарядочувствительного предусилителя. Рассматривались только интервалы с малым отклонением нулевой линии от нулевого потенциала.

Проведены измерения скорости счета одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода при разных температурах. Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода (0.81 ± 0.08)· 10^{-4} Hz/cm². Результаты опубликованы в [48]. По результатам измерений получен верхний предел на параметр кинетического смешивания: $< 1 \times 10^{-11}$ в диапазоне масс для скрытого фотона от 9 до 40 эВ. Результат включен в компиляцию данных по свойствам элементарных частиц в Review of Particle Physics в [49]. Проведена новая серия измерений с более высокой статистикой, см. рисунок 30. Улучшен верхний предел для константы кинетического смешивания: 6×10^{-12} . По результатам этой серии измерений нами были также впервые получены суточные вариации скорости счета одиночных электронов в солнечной и звездной системах координат. Здесь следует учитывать, что, поскольку Земля вращается не только вокруг своей оси, но также и вокруг Солнца, длительность звездных суток оказывается на 4 минуты короче длительности солнечных суток и составляет 23 часа 56 минут. Группируя события во временные на рисунке 31.



Рисунок 30 – Результаты новой серии измерений на счетчике с алюминиевым катодом



Рисунок 31 – Вариации скорости счета одиночных электронов. Красная кривая и нижняя шкала – в солнечной системе координат, синяя кривая и верхняя шкала – звездная система координат

Форма кривой суточных вариаций зависит от широты места расположения детектора и от его ориентации, как это было нами показано в [50]. На рисунке 32 представлены кривые вариаций, рассчитанные для широты Москвы 55° 45' N, где в настоящее время расположен наш детектор.



Рисунок 32 – Суточные вариации для счетчика, расположенного на широте Москвы в положении вертикально (а), горизонтально с Востока на Запад (b) и с Севера на Юг (c). Для разных углов η между направлением вектора поляризации и осью вращения Земли. За момент 00-00 здесь принят момент, когда вектор поляризации находился в плоскости Московского меридиана

Видно, что кривые вариаций сильно отличаются, но всегда наблюдается симметрия относительно момента 12-00. Такая особенность позволяет ее использовать для дискриминации фона от ложных событий, что существенно усиливает метод в плане возможности обнаружения эффекта от скрытых фотонов. Кроме того, это позволяет определить, в какой из систем, солнечной или звездной, вектор поляризации имеет выделенное направление и каково это направление. В качестве примера можно привести следующее. Предположим, что синяя кривая на рисунке 31 имеет симметрию относительно момента времени 18-00 звездного времени. Этот факт может быть использован, как доказательство того, что именно в звездной системе координат вектор поляризации имеет выделенное направление. Кроме того, поскольку этот момент наступил 6 часов после момента 12-00 можно утверждать, что в момент 6-00 звездного времени вектор поляризации находится в плоскости Московского меридиана. Если измеренная кривая полностью совпадает с расчетной для заданной широты и заданной ориентации счетчика, можно считать доказанным, что теория верна и правильно описывает процесс. Если наблюдаемая картина отличается от рассчитанной по данной модели, то это означает, что модель не точна и требует корректировки. Здесь важно то, что даже не требуется точности в абсолютной величине измеренного эффекта, так как выводы получаем из относительного изменения эффекта на протяжении суток [51]. Это значительно облегчает интерпретацию данных измерений. Результаты доложены на 20-ой международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц и приняты для публикации в журнале «Moscow University Physics Bulletin».

3. Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP

3.1. Разработка и создание новых нейтринных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: Гипер-Камиоканде и Т2НК

3.1.1. Ближний нейтринный детектор Baby-MIND

С 2019 г. на нейтринном канале эксперимента Т2К на протонном ускорителе J-PARC, Япония – на расстоянии 280 метров от пионообразующей мишени, под углом 1,5 градуса по отношению к протонному пучку – работает ближний детектор, в состав которого входит магнитный детектор Baby-MIND и Wall MRD, разработанные и созданные при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН. Baby-MIND детектирует треки заряженных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино в веществе детектора WAGASCI (вода + сцинтилляционный пластик), что позволяет восстановить кинематику исходных нейтрино. Это, в свою очередь, поможет подавить систематические погрешности, связанные с неопределенностью значений сечений взаимодействия нейтрино с ядрами кислорода (в составе воды) и углерода (в составе пластического сцинтиллятора). Детекторы Baby-MIND и Wall MRD в настоящее время используются в нейтринном осцилляционном эксперименте T2K (рисунок 33), а в будущем станут частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения *T2HK*, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый гигантский водный черенковский детектор *Гипер-Камиоканде*.

В марте-апреле 2021 г. детектор Baby-MIND был задействован во время очередного физического сеанса эксперимента T2K (сеанс №11), при этом, в связи с пандемией Covid-19, сотрудники ИЯИ РАН участвовали *удаленно*, через интернет, как в общих, так и в экспертных сменах. В ходе двух последних сеансов (№№ 10–11) в детекторе Baby-MIND была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени (POT) около 0.5 × 10²¹. Максимальная мощность протонного пучка в сеансе №11 составила 512 кВт. Детектор Baby-MIND стабильно работал с магнитным полем 1,5 Тесла на протяжении всего сеанса №11. Проводится оптимизация программного обеспечения для отбора нейтринных событий в Baby-MIND – как реальных, так и моделированных методом Монте-Карло. Собранные данные анализируются с целью измерения сечений взаимодействия нейтрино с водородом, водой и углеродом при энергии около 1 ГэВ, а также с ядрами железа. Анализ событий продолжается.



Рисунок 33 – Слева: схема ближнего нейтринного детектора, который включает в себя следующие элементы: WAGASCI (вода+пластиковый сцинтиллятор), Baby-MIND (железо+пластиковый сцинтиллятор+магнитное поле), Wall MRD (пластиковые сцинтилляторы), NINJA (эмульсионная пленка + пластиковый сцинтиллятор), Proton Module (пластиковый сцинтиллятор), на нейтринном пучке J-PARC (под углом 1.5 градуса относительно протонного пучка). Справа: визуализация нейтринного взаимодействия (v +

p → μ⁻ + p + π⁺), произошедшего в WAGASCI, а исходящие из вершины треки заряженных частиц пересекают другие детекторы, включая Baby-MIND.

3.1.2. Сцинтилляционный сегментированный нейтринный 3D детектор SuperFGD

Группа ИЯИ РАН разработала и создала детектор SuperFGD, который состоит из 2 миллионов сцинтилляционных кубиков размером 1 см с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон (X: 192 см; Y: 56 см; Z: 182 см). Этот детектор создан в рамках программы по модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, он также будет использоваться в качестве ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK (с дальним детектором Гипер-Камиоканде). Сцинтилляционный свет с кубиков по оптоволокнам (З волокна на кубик) поступает на чувствительную область микропиксельных лавинных фотодиодов Нататаtsu MPPC. Всего в детекторе будет около 60 тысяч таких фотодиодов и каналов электроники. В 2021 г. весь детектор (~2 млн кубиков) был собран в ИЯИ РАН на *лесках*, которые в дальнейшем будут заменены на спектросмещающие оптические волокна (Kuraray). В ИЯИ РАН разработана процедура сборки детектора SuperFGD, которую планируется проводить в J-PARC (Япония) в 2022 г.

В ИЯИ РАН регулярно проводятся тесты отдельных кубиков по измерению световыхода с помощью космических мюонов и радиоактивного источника. Средний световыход отдельного кубика составляет примерно 35 фотоэлектронов на потери

минимально ионизирующей частицы, что является отличным результатом. Для проверки различных параметров детектора SuperFGD в ИЯИ РАН были собраны прототипы детектора, протестированные на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе в 2017–2018 гг. и на пучке нейтронов в Лос-Аламосе (США) в 2019–2020 гг. Данные этих тестовых сеансов скопированы на компьютерные серверы в ИЯИ РАН и анализируются сотрудниками ИЯИ РАН. Анализ данных продолжается.

3.2. Разработка и создание новых мюонных детекторов для T2K и эксперимента следующего поколения по поиску темной материи SHiP

3.2.1. Сцинтилляционные времяпролетные счётчики для T2K как прототип мюонных счетчиков эксперимента SHiP

В 2021 г. в рамках подготовки эксперимента SHiP (Search for Hidden Particles) на пучке протонов ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron) Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN), начало которого планировалось на 2026-2027 гг., сотрудниками ИЯИ РАН была продолжена разработка сцинтилляционных счётчиков для временно́го детектора эксперимента SHiP, основная задача которого заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. С участием сотрудников ИЯИ РАН были изготовлены 120 сцинтилляционных пластин для прототипа временного детектора, который является частью обновленного ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. Эта система служит времяпролетным детектором ToF, окружающим нейтринный 3D сегментированный детектор SuperFGD и две горизонтальные времяпроекционные камеры HTPC (рисунок 34, слева).

Каждая из 120 пластин (размером 220 см \times 12 см \times 1 см) из сцинтилляционного пластика обернута несколькими слоями тонкой алюминиевой фольги и чёрной полиэтиленовой плёнки. К торцам каждой пластины присоединяется сборка из 8 лавинных фотодиодов, которые детектируют сцинтилляционные сигналы. Весь времяпролетный ТоF детектор состоит из 6 модулей размером 2,4 м \times 2,2 м, по 20 пластин на модуль (рисунок 34, справа), которые образуют 4 π детектор, окружающий SuperFGD и две HTPC. Задача времяпролетного ToF детектора – регистрировать мюоны и другие заряженные частицы, вылетающие из нейтринного детектора SuperFGD.





Рисунок 34 – *Слева:* обновленная часть ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, включающая в себя времяпролетные счетчики ToF, 3D нейтринный детектор SuperFGD, и две горизонтальные времяпроекционные камеры HTPC. *Справа:* модули времяпролетного детектора ToF (прототипа временного детектора SHiP) в сборке для тестов с космическими мюонами (ЦЕРН)

Все модули были протестированы на космических лучах в ЦЕРН в 2021 г. и показали очень хорошее временное разрешение – около 140 пикосекунд. Планируется, что пластины ToF будут доставлены в J-PARC (Япония) в 2022 г. и установлены вместе с детектором SuperFGD и горизонтальными времяпроекционными камерами HTPC внутри ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. Даже если эксперимент SHiP не будет осуществлен в том виде, в каком он планируется в настоящее время, мюонные счетчики, которые играют роль прототипа временного детектора SHiP, будут установлены в J-PARC и продолжат работать в качестве времяпролетного детектора ToF ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также в нейтринном эксперименте следующего поколения T2HK, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться детектор Гипер-Камиоканде (HK).

3.3. Эксперимент JUNO

Основными результатами работ 2020 года, в которых принимала активное участие группа, является окончательная оптимизация жидкого сцинтиллятора и начало массового производства этого сцинтиллятора для центрального детектора эксперимента JUNO; завершение массового производства малогабаритных фотоумножителей (~26 тысяч штук) для этого эксперимента и разработка и создание калибровочной системы для тестирования этих фотоумножителей. Для увеличения эффективности массового тестирования фотоумножителей для эксперимента JUNO разработана система, дополнительная к разработанным нами в предыдущие годы системам, на основе

двухканальных быстродействующих источников световых импульсов и пластиковых оптоволоконных кабелей. Двухканальный быстродействующий источник световых импульсов выполнен в стандартном блоке NIM одинарной ширины. Оба канала независимые. Длительность световых импульсов каждого канала составляет ~1 нс (FWHM). Частота повторения импульсов регулируется в диапазоне 10 Гц – 100 кГц. Световыход каждого канала может изменяться от 0 до 10⁸ фотонов в световом импульсе. В настоящее время разработанная система успешно эксплуатируется, наряду с предыдущими нашими системами, в экспериментальном комплексе по массовому тестированию малогабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO в Гуанси, Южный Китай.

4. Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино

4.1. Продолжение набора статистики в эксперименте T2K по изучению осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в 2021 г.

4.1.1. Осцилляционный анализ данных 2010-2021 гг.

В марте-апреле 2021 года в эксперименте Т2К был проведен сеанс (№11, начиная с 2010 г.) с пучком мюонных нейтрино. В связи с эпидемической ситуацией с Covid-19 этот сеанс был проведен в ограниченном режиме с использованием только части ближних детекторов (INGRID, WAGASCI, Baby-MIND, Wall MRD), причем все иностранцы, включая сотрудников ИЯИ РАН, могли участвовать только в удаленных сменах через интернет. Сотрудники ИЯИ РАН участвовали как в обычных сменах T2K, так и в экспертных сменах детектора Baby-MIND. Максимальная мощность протонного 30-ГэВного пучка в сеансе №11составила примерно 512 кВт. За время сеанса №11 (мартапрель 2021 гг.) был набран интегральный поток протонов на мишени (POT) около 1,78 × 10²⁰, а всего за время набора статистики в сеансах №№1-11 была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени 3,82 × 10²¹ РОТ (рисунок 35).

Данные сеансов №№1-11, накопленные с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино в 2010–2021 годы, анализируются несколькими группами, в том числе сотрудниками ИЯИ РАН, для получения осцилляционных параметров нейтрино. Данные сеанса №11 находятся в стадии анализа, а *предварительный* анализ сеансов №№1-10 показывает, что при работе в нейтринном режиме в дальнем детекторе Супер-Камиоканде наблюдается 94 кандидата в события с электронным нейтрино v_e CCQE (одно электроноподобное кольцо, рисунок 36 слева) и 14 кандидатов в события с электронным нейтрино и одним заряженным пионом v_e CC1 π^+ (одно электроноподобное кольцо + одно задержанное электроноподобное кольцо, рисунок 36 в центре). В антинейтрином режиме отобрано 16 кандидатов в события с электронным антинейтрино \overline{v}_e CCQE (рисунок 36 справа).



Рисунок 35 – Данные о протонном пучке в эксперименте T2K, разбитые по годам с 2010 г. по 2021 г. (сеансы №№1-11). Левая вертикальная шкала (голубая линия): интегральный поток протонов на мишени (РОТ). Правая вертикальная шкала (красная линия): усредненная мощность пучка (кВт), точками показана мгновенная мощность пучка в нейтринном (красные) и антинейтринном (темно-бордовые точки) режимах



Рисунок 36 – Энергетические спектры кандидатов в электронные нейтрино (слева и в центре) и в электронные антинейтрино (справа) в дальнем детекторе Супер-Камиоканде. *Слева:* 94 события с одним электроноподобным кольцом (*v*_eCCQE); *в центре:* 14 событий *v*_eCC1*π*⁺; *справа:* 16 событий с одним электроноподобным кольцом в антинейтринном режиме (*v*_eCCQE). Точками показаны экспериментальные события, а разноцветные гистограммы соответствуют вкладам различных нейтринных взаимодействий из Монте-Карло моделирования

4.2. Поиск СР нарушения в нейтринных осцилляциях

4.2.1. Улучшение чувствительности к СР нарушению в эксперименте Т2К и получение нового результата

Для поиска СР нарушения в нейтринных осцилляциях анализ ведется по двум основным направлениям: во-первых, сравнивается число «появившихся» в дальнем детекторе Супер-Камиоканде электронных нейтрино и антинейтрино в изначально почти чистом пучке мюонных нейтрино и антинейтрино (измерение асимметрии). А во-вторых, можно извлечь значение фазы δ_{CP} (один из параметров матрицы смешивания нейтрино – матрицы Понтекорво-Маки-Накагава-Саката, PMNS), ответственной за СР сохранение (или нарушение) в нейтринных осцилляциях, одновременно анализируя данные из всех образцов событий: на «исчезновение» мюонных (анти)нейтрино, а также на «появление» (анти)нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде. электронных В силу недостаточной статистики первый метод пока не дает определенного ответа по поводу СР сохранения (или нарушения) в нейтринных осцилляциях (рисунок 37 слева). Второй метод позволяет найти наиболее вероятные интервалы, в рамках которых может заключаться значение фазы бср. Комбинированный анализ данных (сеансы №№1-10, интегральный поток 3,60 × 10²¹ POT) указывает (рисунок 37 справа) на то, что наиболее вероятное значение фазы δ_{CP} соответствует максимально нарушающей величине ($-\pi/2$), а CP сохранение ($\delta_{CP} = 0, \pm \pi$) исключается на уровне достоверности 90% (при этом значения $\delta_{CP} = \pm \pi$ находятся на границе значимости 2 σ). Кроме того, результаты анализа дают небольшое предпочтение нормальной иерархии масс ($\Delta m^2_{32} > 0$) и верхнему октанту угла смешивания θ_{23} (sin² θ_{23} >0,5). Следует отметить, что обновление анализа T2K (учет тонких эффектов взаимодействия нейтрино с ядрами и др.) и добавление свыше 30% новых данных сеанса №10 привело к небольшому сдвигу границ интервалов значения δ_{CP} по сравнению с анализом данных сеансов №№1-9, причем главный вклад дают именно новые данные. Анализ всех данных (сеансы №№1-11) с учетом многокольцевых событий в дальнем детекторе Супер-Камиоканде и других изменений будет продолжен в 2022 году.



Рисунок 37 – *Слева:* сравнение числа событий электронных нейтрино (94+14) и электронных антинейтрино (16) в дальнем детекторе с расчетными при разных значениях фазы δ_{CP} и иерархии масс (штрих-линия – обратная, сплошная – нормальная иерархия масс; разными цветами показаны разные значения sin²θ₂₃). *Справа:* предварительные результаты измерений CP нечетной фазы в эксперименте T2K (данные 2010–2020 гг., сеансы №№1-10): показаны доверительные интервалы значения CP нечетной фазы δ_{CP}, от 1σ (68,27%) до 3σ (99,73%)

4.3. Поиск стерильных нейтрино в эксперименте Т2К

4.3.1. Поиск стерильных нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K

В 2021 году в эксперименте Т2К продолжены работы по поиску стерильных нейтрино и частиц темной материи, не участвующих в слабых взаимодействиях. Поиск массивных нейтрино в диапазоне масс до 150 МэВ осуществляется по разным направлениям: детектированием продуктов ИХ распада, образовавшихся BO времяпроекционных камерах (TPC) ближнего нейтринного детектора ND280 (например, $\pi^0 \rightarrow \gamma V \rightarrow XX$); детектированием рассеянных электронов или ядер, получивших значительный импульс. По-прежнему одной из основных проблем при поиске стерильных нейтрино и частиц темной материи в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K является подавление фона взаимодействий обычных нейтрино. В 2021 году было продолжено исследование возможных фоновых процессов в ближнем детекторе ND280 и методов их подавления, моделирование эффективности регистрации сигнальных и фоновых событий, ведется разработка программного обеспечения для реконструкции событий и изучение теоретических предсказаний масс и других параметров возможных кандидатов в стерильные нейтрино и частицы темной материи.

5. Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионоподобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам

5.1. Измерение распада каона на пион и два нейтрино в эксперименте NA62 (ЦЕРН)

5.1.1. Результат анализа данных NA62, полученных в сеансах 2016-2018 гг.

В 2021 году был опубликован новый результат по измерению распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$. Удалось значительно снизить фон до уровня 10⁻⁸ при сохранении высокой эффективности регистрации сигнала. События распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, прошедшие критерии отбора показаны на рисунке 38.



Рисунок 38 – Реконструированное значение квадрата недостающей массы m²_{miss} в зависимости от измеренного импульса пиона р_π в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора. Точки – экспериментальные данные, серая область – ожидаемая область в Стандартной модели, красные линии – границы сигнальных областей. Наблюдаются 17 событий в сигнальной зоне

На этом рисунке показано реконструированное значение квадрата недостающей массы m^2_{miss} в зависимости от измеренного импульса пиона p_{π} в конечном состоянии. Видно, что в сигнальную область попадают 17 событий. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 7,6, а фон – на уровне 5,28 ± 0,99. Измеренная величина вероятности распада = $(10,6^{-3,4}_{+4,0}(\text{stat}) \pm 0,9 \text{ (syst)}) \times 10-11$ для 68% доверительного интервала. Статистическая значимость измеренного распада

составила 3,4 σ . Стандартная модель предсказывает величину вероятности этого распада $(8,4 \pm 1,0) \times 10^{-11}$.

Эксперимент NA62 возобновил набор данных в 2021 году после длительного перерыва (LHC LS2). Сеанс набора данных продолжался с 12 июля по 14 ноября, что составляет примерно 50% от продолжительности набора данных в 2018 году. В 2021 году интенсивность пучка каонов была 75% от номинальной (примерно на 10% выше, чем в 2018 году). Из-за проблем с ускорителем SPS (и качеством выдаваемого им пучка), который обеспечивает протонами эксперименты в северной части ЦЕРНа (North Area), эффективный набор данных составляет меньшее время. Предварительная оценка показывает, что ожидаемое число $K+ \rightarrow \pi+ \nu \nu$ событий для данных 2021 года (при вероятности распада, равной вероятности в Стандартной модели) составляет 2-3. Однако, более точную оценку можно будет получить после окончательной реконструкции данных 2021 года и более точного понимания неэффективности детекторов, из-за присутствия новых детекторов, не использующихся в 2016-2018гг, ожидается уменьшение фона примерно в 5 раз.

5.2. Поиск тяжелых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечетным эффектам

5.2.1. Поиск «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечетным эффектам

В эксперименте NA62 были получены новые ограничение на элемент матрицы смешивания между тяжелым и мюонным нейтрино (сравнимы с текущими, однако расширены в область высоких масс), улучшение в 2,5 раза текущего ограничения на вероятность распада $K+\rightarrow \mu+\nu \nu \nu$, первые в мире ограничения на вероятность распада $K+\rightarrow \mu+\nu \nu \nu$, первые в мире ограничения на вероятность распада $K+\rightarrow \mu+\nu \nu X$, где X-скалярная или векторная частица в диапазоне масс 10-370 МэВ. Были улучшены в 10 раз ограничения на вероятности запрещенных в Стандартной модели распадов $K+\rightarrow \pi^- \mu+e+$, $K+\rightarrow \pi+\mu^-e+u \pi^0\rightarrow \mu^-e+$. Примерно в 60 раз было улучшено модельно-независимое ограничение на вероятность распада $K+\rightarrow \pi+X$ в области масс X 110-150 МэВ.

5.3. Исследование распадов каонов на лету в эксперименте ОКА

В каонном эксперименте ОКА (ИФВЭ, Протвино) проведен анализ данных с целью измерения вероятности распада K+ → π^0 e+ v γ измерена вероятность распада и сравнения с предсказанием киральной пертурбативной теории ChPT O(p4). После проведенного

анализа было наблюдено 32000 событий – кандидатов в этот распад. Диаграммы, описывающие этот распад, показаны на рисунке 39.



Рисунок 39 – Диаграммы, описывающие распад $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$

Измеренная вероятность этого распада составила величину R = $(0,587\pm0,010\pm0,015)$ ×10⁻². Полученный результат находится в хорошем согласии с вероятностью распада, полученной в киральной пертурбативной теории ChPT O(p4) R = $(0,592\pm0,005)$ × 10⁻². Измерение этого распада является хорошим тестом эффектов за рамками ChPT.

В эксперименте ОКА была измерена Т-нечетная корреляция в распаде распаде К+ $\rightarrow \pi^0$ е+ v γ на основе анализа 54000 событий, накопленных в эксперименте ОКА. Из измеренной величины Т-нечетной асимметрии A = (-0,033 ± 0,429(stat.) ± 0,117(syst.)) × 10^{-2} получен верхний предел |A| < 0,0078 для доверительного интервала 90%.

6. Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов

1) Для экспозиции нейтрино + антинейтринного пучка 13,6×10²⁰+12,5×10²⁰ протонов на мишень получены следующие результаты.

На дальнем детекторе зарегистрировано 211 мюонных нейтринных событий (включая 8 фоновых событий) и 105 событий (включая 2 фоновых события), рожденных мюонными антинейтрино. Кроме того, на этом детекторе зарегистрировано 82 электронных нейтринных событий (влючая 27 фоновых событий) и 33 события (ожидаемый фон – 14 событий), от взаимодействия электронных антинейтрино v_e, которые появились в пучке мюонных антинейтрино из-за v_µ → v_e осцилляций.

В результате подгонки спектров мюонных и электронных событий, измеренных в нейтринных и антинейтринных пучках, как функций параметров $\Delta m_{32}^2 / = /m_3^2 - m_2^2 / 2$ разности квадратов масс нейтрино, угла смешивания θ_{23} и фазы нарушения CP-инвариантности δ CP, получены 1 σ доверительные интервалы для значений этих параметров при нормальной иерархии масс нейтрино (m₁<m₂<m₃): Δm_{32}^2 (10⁻³эB²) -[2,34, 2,48], sin² (θ_{23}) - [0,54, 0,60], δ_{CP} =0,82 π . Данные исключают такие комбинации параметров осцилляций, которые вызывают большую асимметрию в появлении нейтрино и антинейтрино электронных. Это включает в себя значение фазы δ_{CP} =0,5 π , которая исключается на уровне >3 σ для обратной иерархии масс нейтрино и значения фазы в области δ_{CP} =1,5 π , которые при нормальной иерархии масс исключаются на уровне 2 σ . Как показано на рисунке 40 совместный анализ данных экспериментов HOBA и T2K (Япония) может привести к обратной иерархии масс нейтрино и значению δ_{CP} =1,5 π .

2) Впервые получены доверительные интервалы для смешивания стерильных антинейтрино в рамках 3+1 модели. На дальнем детекторе было зарегистрировано 121 событие, обусловленные взаимодействием нейтрино нейтральным током, а ожидалось 122 $\pm 11(\text{stat}) \pm 15(\text{syst})$ событий, предполагая смешивание только трех активных ароматов. Никаких свидетельств о переходе в стерильное антинейтрино не наблюдалось. В рамках 3+1 модели для 0,05 эВ² < $\Delta m^2_{41} < 0,5$ эВ² получены ограничения на углы смешивания $\theta_{24} < 25^\circ$, $\theta_{24} < 32^\circ$ на 90% доверительном уровне.

3) Исследовались взаимодействия нейтрино, которые похожи на взаимодействия нейтрино от вспышки Сверхновых (сверхновые события) и которые по времени совпадают с 76 событиями от гравитационных волн, зарегистрированными коллаборацией LIGO/Vigro. На дальнем детекторе было зарегистрировано 40 сверхновых

событий за полное время считывания гравитационных волн. По этим событиям было получено ограничение на флюенс (интеграл по времени от плотности потока частиц) от нейтрино всех ароматов F< 7(4) × 10^{10} см⁻² на 90% доверительном уровне, предполагая распределение по энергии и времени, которые соответствуют модели Сверхновой Гархинна с массами 9,6 (27) масс Солнца.



Рисунок 40 – Контуры 68% и 90% доверительных уровней (С.L.) в плоскости (δ_{CP}, sin2θ₂₃). Рисунок (а) для нормальной иерархии масс, а рисунок (б) для обратного массового упорядочивания. Крестом (квадратом) обозначена наиболее вероятная точка NOvA (T2K), а цветом отображены области допустимые на 68% и 90% доверительных уровнях. Черные сплошные и пунктирные контуры изображают области разрешенные экспериментом T2K

7. Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс

7.1. Экспериментальная установка

Установка «Троицк ню-масс» состоит из двух основных частей: безоконного источника трития и электростатического спектрометра с магнитной адиабатической коллимацией, рисунок 41.



Рисунок 41 – Основные элементы установки, тритиевый источник расположен слева, спектрометр - справа: 8 – безоконный тритиевый источник, 15 – система замкнутой циркуляции трития, 10 – электростатический спектрометр, 12 – регистрирующий детектор

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

Каждый пиксель представляет собой кремниевый дрейфовый детектор, характерной особенностью которого является крайне малая ёмкость регистрирующего анода – порядка 20 фемто-Фарад. Это обеспечивает сильное шумоподавление, которое обратно пропорционально корню из величины ёмкости. Усиление сигнала происходит

зарядочувствительным предусилителем, где сигнал интегрируется на ёмкости в 20 фемто-Фарад. Это примерно в 100 раз меньше, чем в обычных усилителях такого типа. Для охлаждения сверхпроводящих магнитов жидким гелием на установке используется криогенная система TCF-50 фирмы LINDE, рисунок 42.



Рисунок 42 – Фотография части TCF-50 гелиевой ожижительной системы фирмы LINDE

7.2. Полученные в 2021 году результаты

7.2.1. Проведение сеанса измерений спектра электронов от распадов трития

Для обеспечения работы установки во время сеанса была задействована криогенная система, которая снабжала жидким гелием криостаты источника и спектрометра. Как электростатический спектрометр является отмечалось выше, спектрометром интегрального типа. Программно-регулируемый высоковольтный блок выработки напряжения обеспечивал необходимый потенциал на электроде спектрометра. Измерения проводились последовательным варьированием этого потенциала, и измерялся счет электронов в зависимости от напряжения, рисунок 43. Для контроля стабильности интенсивности источника во время цикла измерений периодически потенциал спектрометра возвращался на «мониторную» точку при напряжении 14,0 кВ. Текущая форма амплитудных спектров с каждого калана детектора и форма интегрального спектра постоянно контролируется оператором. Данные накапливаются и дополнительно копируются на жёсткие диски для последующей обработки.



Рисунок 43 – Один из типичных набранных спектров электронов в зависимости от напряжения на электроде спектрометра. Измерения при 14,0 кВ проводятся многократно для контроля интенсивности источника

7.2.2. Сборка, тестирование и калибровка нового детектора

Была изготовлена система ввода и перемещения 7-пиксельного детектора в вакуумную часть спектрометра, рисунок 44.



Рисунок 44 – Фотография детектора, установленного на вакуумном фланце с системой перемещения. Видна только часть детектора, который заслоняется защитной медной пластиной под нулевым потенциалом

Выполнены калибровки детектора на воздухе и в вакууме с помощью радиоактивных гамма источников Fe-55 и Am-241. На рисунке 45 приведен спектр от Fe-55 с основной линией в 5,9 кэВ. Спектр наглядно демонстрирует полное разделений линий.



Рисунок 45 – Калибровочный спектр от Fe-55 с основной линией 5,9 кэВ и слабой линией 6,49 кэВ. Пик слева обусловлен шумом детектора и электроники

Оцифровка сигналов производилась многоканальным блоком 16TQDC, разработанным в ОИЯИ, г. Дубна, для строящегося ускорительного комплекса НИКА.

7.2.3. Оценка и исследование свойств сверхпроводящего кабеля

В 2021 году проведено исследование возможности использования имеющихся запасов сверхпроводящего провода для будущего эксперимента IAXO. На данный момент участие ИЯИ РАН в эксперименте [42, 52] заключается в подготовке отдельных частей программного обеспечения и сверхпроводящего кабеля. В институте имеется несколько десятков километров Nb-Ti провода. Была проведена большая организационная работа по доставке провода в Германию. В итоге, провод был перемотан на подходящие для транспортировки катушки и через коллег в ОИЯИ, г. Дубна, был отправлен в Германию, где начата проверка и измерение свойств провода при наших удаленных консультациях. Отдельно проведена работа по созданию системы сбора данных для детекторной части эксперимента IAXO, то есть разработка фреймворка для серверов устройств, Device server.

Проведена апробация концепции асинхронного обмена сообщениями и интеграция сереверов устройств детекторов с системой DOOCS, принятой на вооружение в DESY.

7.2.4. Работы по профилактике, ремонту и модернизации криогенного и вакуумного оборудования

По данному пункту можно предоставить огромный перечень мелких работ, выполненных на криогенной и экспериментальной системах. Проведена замена нескольких вакуумных насосов, масляных фильтров. Заменены отдельные вакуумные вентили и криогенные датчики. Установлена и подключена дополнительная ёмкость для сбора и хранения газообразного гелию объёмом 10 м³. Выполнена плановая профилактика компрессорной части криогенного ожижителя. В частности, заменены колонки угольных фильтров объемом до 1 м³, произведено их осушение горячим воздухом, а затем сухим азотом.

7.2.5. Система сбора данных для многоканального детектора

В 2021 году проведена большая по объему и сложности работа, связанная с полной заменой детектора и электронного тракта.

Для улучшения разрешения спектрометра детектора эксперимента «Троицк Ню-Масс» был получен многоканальный детектор электронов на основе кремниевого детектора дрейфа. Необходимо было интегрировать детектор в существующую систему сбора данных эксперимента с полной обратной совместимостью.

Данный детектор содержит семь чувствительных областей размером по 2 мм, которые генерируют напряжение пропорциональное энергии электрона на семи независимых каналах. На рисунке 46 изображена схема расположения «пикселей» детектора.



Рисунок 46 – Схема расположения чувствительных элементов детектора

Принцип работы детектора заключается в преобразовании заряда на чувствительных элементах в напряжение на выходных каналах. Из-за темнового тока напряжение на выходе усилителей постоянно растёт до тех пор, пока не сбрасывается автоматически или по внешнему триггеру. Возникает сигнал в виде «пилы». Во время сброса считывание новых сигналов невозможно, что эффективно означает уменьшение процента живого времени в рабочем режиме детектора.

Для упрощения процесса обработки датчика сигнала подавался на дифференцирующую цепочку для фильтрации формы «пилы». В этом случае приход электрона на чувствительный элемент сопровождается скачком напряжения таким, что его можно детектировать по превышению порогового напряжения.

Характерная циклограмма процесса представлена на рисунке 47.



Рисунок 47 – Сигнал на датчике до и после применения дифференциального фильтра

Для считывания данных датчика необходимо каналов с иметь семь высокоскоростного АЦП с временным разрешением порядка 10нс. Такими характеристиками обладал блок TQDC16VS от производителя AFI Electronics, Дубна.

АЦП содержит 16 независимых каналов с независимыми триггерами, возможностью установки независимых пороговых напряжений, а также фильтрацией «пьедестала» события.

Плата имеет временное разрешение 8 нс на отсчёт, 12 бит АЦП, оптоволоконный канал передачи данных на скорости до 10 Гб/сек. Предварительная обработка сигнала происходит на ПЛИС на плате, что позволяет снизить нагрузку на линию связи и увеличить предельную частоту обрабатываемых событий. В тестах система демонстрировала полную работоспособность при частоте тестового сигнала до 100 КГц.

В 2021 году был написан пакет программ для задания исходных параметров, управления сбором данных, их передачи на накопители и дальнейшей обработки. Основная программа собирает данные с каналов детектора, интерпретирует их, выполняет базовую фильтрацию шума, сериализует их в формат protobuf и отправляет на центральный сервер online, сопроводив соответствующей пометкой в метаданных протокола DataForge envelope.

Перечень требований к сбору данных.

1. Формат данных должен соответствовать уже существующему.

2. Запуск производится в автоматическом режиме по команде с сервера на заданное количество секунд.

3. В метаданные записывается вся информация о состоянии элементов управления программного интерфейса TQDC16VS, а также количество отфильтрованных событий.

4. Делает возможность запуска в режиме активной пост-фильтрации. В случае попадания в файл событий с разбросом Peak-to-Peak, менее заданного, они не отправляются на сервер.

- 5. В данные не попадают сигналы во время сброса электроники.
- Временные метки событий берутся из часов на плате сбора информации, а не из программной части.
- Исходные файлы сохраняются локально для создания возможности копирования. Для реализации этих пунктов были выполнены следующие шаги. Патч программной платформы интерфейса TQDC

Для реализации пункта 2 было необходимо внести изменения в код. Разработчики использовали патч, который позволяет создать локальный сервер, который принимает команду на запуск измерения с заданной продолжительностью. Ответом при окончании цикла сервер возвращает количество отклоненных событий. Это решает пункт 4.

Патч аппаратной части TQDC

Из-за того, что сброс заряда детектора производит лишний шумовой сигнал, он должен быть отфильтрован. Это описано пунктом 6.

Для решения этой проблемы разработчики платы 16TQDC перепрограммировали блок для возможности использования внешнего сигнала запрета BUSY для блокирования входов платы на запрет записи. Для реализации этого был использован дополнительный внешний генератор. Генератор с периодом 600 мксек постоянно производит принудительный сброс входной электроники и вырабатывает запрет записи в 16TQDC на 5 мксек.

Для удовлетворения пункта 7 также был выпущен патч, который переключает вывод на внутренние осцилляторы ПЛИС.

Парсинг данных

Для того, чтобы уменьшить место, занимаемое данными на хранилище, было принято решение сохранять исходные файлы в бинарном формате. Чтобы из них извлекать и перепаковывать события, был написан парсер в соответствии со спецификацией с сайта производителя: https://afi.jinr.ru/DataFormatTQDC16VSE.

Упаковщик

Для создания обратной совместимости (пункт 1) необходимо было использовать формат protobuf. Это потребовало модификацию исходных данных из-за применения беззнаковых величин в существующей системе, но использования знаковых в плате TQDC.

Также применение платы TQDC позволило записывать временные развёртки сигналов каждого электрона. Возможность записи этих данных также была предусмотрена в протоколе protobuf и была использована. Эти данные записывались в знаковом формате в массиве байт.

Дополнительные шаги

Были созданы дополнительные утилиты для проведения сеанса измерений:

1. Трекер свободного места на жёстком диске. Трекер уведомлял операторов при проходе 70, 85 и 95% занятого объёма дискового объёма.

2. Монитор размера файлов представляет собой график размера файла собранных данных от времени его записи. По данному графику можно прослеживать наличие сбоев в референсных точках.

3. Система переноса файлов из промежуточного хранилища на архивный жёсткий диск.

4. Система уведомления операторов о приходе пустых файлов. В случае если происходил сбой работы TQDC на Online, приходил пустой файл с сообщением об ошибке, которую он игнорировал. Утилита наблюдала за содержанием пришедших файлов и уведомляла о необходимости принять меры в случае, если файлы не содержали данных.

5. Универсальный скрипт запуска. Скрипт собрал в одну команду следующие действия:

– Конфигурация сетевой карты внутренней сети эксперимента.

– Конфигурация сетевой карты для связи с платой TQDC.

Перезапись файла конфигурации интерфейса TQDC.

– Запуск интерфейса TQDC с флагом запуска сервера управления.

– Запуск программы для связи с Online, TQDC.

8. Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных

8.1. Работы по проекту КАТРИН сотрудников ИЯИ РАН

8.1.1. Прецизионные измерения электромагнитных полей в спектрометре КАТРИН

Уменьшение уровня фона при измерении спектра электронов бета-распада трития в эксперименте КАТРИН необходимым является условием для достижения запланированной чувствительности к массе нейтрино на уровне 200 мB/c². Фоновые электроны, образующиеся в объёме спектрометра в результате ионизации нейтральных сильно возбуждённых атомов водорода (в ридберговских состояниях), ускоряются электрическим полем и могут достичь детектора. Приблизительно равномерное распределение точек рождения таких электронов в спектрометре указывает на концепцию по уменьшению фона. Для этого необходимо уменьшить эффективный объём спектрометра, проецируемый на детектор. Этого можно достичь, увеличивая магнитное поле, но ухудшая тем самым разрешение по энергии и чувствительность к массе нейтрино, или смещая анализирующую плоскость в направлении детектора, сохраняя энергетическую ширину фильтрации спектрометра. Второй способ оказывается наиболее подходящим, и позволяет уменьшить число фоновых событий в два раза.

В 2021 году конфигурация со смещённой анализирующей плоскостью (SAP, рисунок 48) была использована как основная при сканировании тритиевого спектра для измерения массы нейтрино в пятом и шестом сеансах.

Особенностью конфигурации SAP является изменение магнитного поля и электрического потенциала в анализирующей плоскости. Для симметричных конфигураций вариация электрического потенциала составляет 0,2-0,6 В от центра спектрометра до внешней части магнитного потока, в то время как для конфигурации SAP вариация достигает 3 В. Магнитное поле меняется в конфигурации SAP в пределах 4,0-6,2 Гаусс.

Электрический потенциал и магнитное поле могут быть измерены с помощью калибровочных источников электронов, таких как криптон-83м в газовом состоянии в источнике КАТРИН, и электронная пушка – источник узконаправленного потока фотоэлектронов с характерной шириной распределения по энергиям ~0,1 эВ.

В 2021 году для достижения большей точности определения электромагнитных полей в спектрометре был использован дублет линий криптона N-2,3 (см. рисунок 49). Преимуществом использования этих линий оказывается исчезающе малая ширина каждой

из них. Это связано с тем, что N оболочка является самой высокой по энергии, и для заполнения вакансии на этой оболочке нет более высоко лежащих электронов. Таким образом, каждая из двух линий может служить идеальным моноэнергетическим калибровочным источником. Однако разница энергий двух линий составляет всего 0,67 эВ, и, кроме того, интенсивность двух линий на порядки ниже интенсивности обычно используемых линий L3-32 и K-32.

Исчезающе малая ширина линий N-2,3 позволяет измерить вариацию электрического потенциала в анализирущей плоскости с высокой точностью. При этом вариация практически не коррелирует с измеряемой величиной магнитного поля (коэффициент корреляции <0,4). Малая интенсивность линий требует использования высокоактивных источинков криптона. Обычно, в качестве источника используется рубидий-83 с характерной активностью порядка 2 ГБк. Для измерений свойств плазмы в источнике КАТРИН летом 2021 года был проведён специальный сеанс измерений с рубидиевым генератором активностью 10 ГБк. Столь высокая активность криптона позволила также провести короткие (3 дня) измерения электромагнитных полей в спектрометре для конфигурации SAP с большой статистикой.

Сканирование линий N-2,3 с высокой статистикой даёт возможность определить функцию пропускания отдельно для каждого из 148 пикселей детектора КАТРИН. Информация о функции пропускания позволяет проводить более гибкий анализ данных при фитировании тритиевого спектра и оценивании массы нейтрино.



Рисунок 48 – Схема модификации трубки тока магнитного поля в спектрометре КАТРИН при переходе от симметричной конфигурации полей к конфигурации SAP



Рисунок 49 – Пример измеренного спектра дублета N-2,3 линий криптона-83м с примерным изображением дифференцифльного спектра

8.1.2. Исследование природы подавления дополнительного фона Основного Спектрометра проволочным электродом

Основным детектором наблюдается «дополнительный фон», представляющий собой моноэнергетическую линию электронов с энергией потенциала стенки спектрометра и центральной части его объема (≈ 18,6 кэВ). Такой энергией могут обладать электроны, рожденные на стенке спектрометра или в его объеме после ускорения запирающим потенциалом спектрометра. Внутренняя поверхность покрыта двухслойным проволочным электродом. Экспериментально установлено, что при подаче на проволочный электрод отрицательного, относительно корпуса спектрометра, потенциала происходит снижение дополнительного фона электронов, имеющего потенциал корпуса спектрометра. Это можно интерпретировать как запирание электронов вылетающих со стенки. Такой механизм этого эффекта недостаточно понятен, поскольку попаданию образовавшихся на стенках электронов в детектор препятствует адиабатическая магнитная коллимация.

В последнее время была предложена модель дополнительного фона, связанная с вылетом со стенок нейтральных Ридберговских атомов, которые ионизуются тепловым излучением. Явление дополнительного фона рассматривалось в диссертации N.Trost'a [53], в которой были приведены убедительные аргументы в пользу его Ридберговской природы.


Рисунок 50 – Проволочный электрод Основного Спектрометра (слева – процесс монтажа, справа – монтаж завершен)

Также в диссертации N.Trost'а приведен график подавления дополнительного фона при подаче отрицательного потенциала на проволочный электрод.



Рисунок 51 – График из диссертации N.Trost [53]

При рассмотрении механизма подавления фона потенциалом проволочного электрода была выдвинута гипотеза о том, что дополнительный фон подавляется не запирающим потенциалом проволочного электрода, а распадом Ридберговских атомов в электрическом поле, создаваемом этим электродом. Характерные параметры приведены в таблице [54].

| Физическая величина | Физическая зависимость | Численное значе- ние для n=100; Z=1 |
|--|--|---|
| Энергия связи ридбергов- ского электрона ¹ Характерный размер рид- берговской орбиты ² | $\frac{Z^2 R_{\infty}/n^2}{n^2 a_0/Z}$ | 1,36·10 ⁻ эВ 0,53·10 ⁻⁴ см |
| Геометрическое сечение | $\pi a_0^2 n^4/Z^2$ | 0,88.10 ⁻⁸ cm ² |
| Частота переходов между соседними ридберговскими состояниями | $\frac{2R_{\infty}Z^{2}/\hbar n^{3}}{n^{5}(3\ln n - 0, 25)}$ | 4,13·10 ⁷ c ⁻¹ 17 c |
| Напряжённость атомного электрического поля, дей- ствующего на ридбергов- ский электрон ⁴ . Напряжённость электричес- кого поля, соответствую- щая порогу ионизации ато- | E ₀ Z³/n⁴ | 51,4 B·CM-1 |
| ма из ридберговского со- стояния | $E_0 Z^3 / 16 n^4$ | 3,2 B·CM ⁻¹ |

Таблица 1 – Характерные параметры Ридберговских атомов

¹ $R_{\infty} = \frac{1}{2} \cdot me^4/\hbar^2 \simeq 13, 6 \ \text{эВ} - Puddepra постоянная (m,e-мас$ $са и заряд электрона), Z-спектроскопический символ. ² <math>a_0 = = \hbar^2/me^2 = 0, 53 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ -Бора радиус. ³ $A_0 = 16\alpha^3 R_{\infty}/3\pi\sqrt{3} \hbar = = 8\alpha^3/3\pi\sqrt{3} \tau_0 = 0, 79 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, \tau_0 = a_0/v_0 = 2, 42 \cdot 10^{-17} \text{ с-атомная}$ единица времени (v_0 -скорость электрона в атоме водорода). ⁴ $E_0 = e^2/a = 1,714 \cdot 10^7$ ед. СГСЕ=5,142 · 10⁹ В · см⁻¹-атомная единица напряжённости электрич. поля.

Таким образом, электрические поля в диапазоне 100 -1000 В/см могут эффективно ионизовать Ридберговские атомы с $n \approx 50$ и больше. Большие отрицательные потенциалы на проволочных электродах нежелательны, т.к. их ионная бомбардировка может приводить распылению металла с их поверхности. Предлагается исключить распыление с проволочных электронов реверсом потенциала на них. Ионизация Ридберговских атомов зависит только от абсолютной величины электрического поля.

Предложено провести соответствующие исследования в начале 2022 г.

8.1.3. Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино

Одной из основных проблем проведения эксперимента по поиску тяжелых стерильных нейтрино является необходимость регистрировать с разумным уровнем просчетов высокие потоки электронов с энергией от единиц кэВ до 30-35 кэВ детектором

диаметром 100 мм. Верхний предел по энергии электронов определяется необходимостью детектировать линии 30,5 и 32,1 кэВ криптона 83mKr, которые используются при исследовании параметров спектрометров.

В 2021 году работы по исследованию новых детекторов на стенде исследований детекторов были затруднены в связи с пандемией, болезнями сотрудников, переводом на удаленный режим работы и уходом из жизни разработчика стенда В.С. Асеева. Тем не менее был приобретен ламинарный бокс, позволяющий локально реализовать условия «чистой комнаты».

Исследования, проводившиеся на установках Троицк ню-масс (Троицк) и ТРИСТАН (Карлсруэ/Мюнхен, Германия) показали, что детекторы, предлагаемые для поиска тяжелых стерильных нейтрино, позволяют работать с интенсивностью источников трития на два порядка ниже их максимальных параметров. Таким образом, остается актуальной задача поиска детекторов и разработка систем регистрации, позволяющих использовать 100% интенсивности имеющихся источников.

К работам на стенде исследований детекторов присоединилась группа проекта ИЯИ-ЦЕРН RD-21, что позволит объединенными усилиями решать вопросы модернизации стенда.

8.1.4. Разработка программы обработки данных эксперимента по поиску массы нейтрино

В ИЯИ РАН имеются программы обработки данных эксперимента «Троицк нюмасс». Применявшиеся решения могут повысить чувствительность данных эксперимента КАТРИН. В тоже время программы ИЯИ РАН должны быть усовершенствованы для более точного учета систематических поправок, как это сделано в программах КАТРИН.

В 2021 году начаты работы по совмещению программ ИЯИ РАН и КАТРИН.

9. Поиск 2К-захвата в Хе-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

9.1. Поиск 2К-захвата в Хе-124.

В связи с завершением работ по программе измерений обогащенного по Xe-124 образца ксенона с целью поиска 2v2К-захвата, были проведены специальные калибровочные процедуры для более надежного извлечения полезных трехточечных событий.

Для это был предложен новый метод коррекции сигнала заряда от МПС. Метод коррекции позволяет учитывать потерю электронов первичной ионизации в присутствии слабо возрастающих микропримесей электроотрицательных газов при длительных измерениях.

Импульс, получаемый с анода, в основном обусловлен отрицательным зарядом, индуцируемым положительными ионами, образующимися вблизи электрода в области газового усиления. Они движутся к катоду с меньшей скоростью, чем электроны. На форму импульса электронного тока также влияет распределение плотности электронов первичной ионизации, пересекающих границу области усиления газа. Параметры распределения зависят от времени дрейфа электронов начального точечного заряда к аноду. Первичный кластер ионизации размывается во время дрейфа из-за радиальной диффузии электронного облака. На рисунках 52 (a) и (c) показаны импульсы трехточечных событий, предположительно вызванные 2v2К - захватом в Xe-124. Темные кривые представляют собой записанные импульсы заряда от зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ). Импульсы тока от электронов первичной ионизации, восстановленные из оцифрованных сигналов заряда на границе области усиления газа, показаны на рисунках Рисунок 52 (b) и (d). Соответствующие нормализованные импульсы заряда, полученные путем интегрирования этих импульсов тока, показаны более светлыми цветовыми кривыми на рисунках 52 (а) и (с). Время, прошедшее от начала первичного импульса до начала первого последующего импульса ($\tau_{\rm p}$), равно времени дрейфа электронов от катода к аноду. Оно задает продолжительность временного интервала для полного выделения любого отдельного события, независимо от распределения первичной ионизации по объему МПС. В случае чистого ксенона расчетное время дрейфа электронов ионизации от катода к аноду составляет 163 мкс. Интеграл импульса тока в случае многоточечного события для интервала τ_n, начиная с начала импульса, дает общее число первичных электронов ионизации. Набор колоколообразных кривых может описывать результирующую форму импульса тока (рисунки 52(b) и (d)), что позволяет определять

высвобождаемый точечной заряд (энергию), В каждом кластере ионизации многоточечного события. Диффузия первичных электронов в области дрейфа напрямую влияет на распределение времени их прихода в область ударной ионизации. Таким образом, можно различать события вблизи поверхности катода, связанные с большим временем нарастания импульса заряда (широкие колоколообразные распределения сигнала тока), и события во внутреннем объеме с более коротким временем нарастания (малые ширины сигнала тока). В качестве внутренней калибровки детектора был выбран эффект фотоионизации К-оболочки атомов рабочего газа (те случаи, когда испускается излучение). Двумерное распределение характеристическое отдельных амплитуд. выбранных из двухточечных событий с общей энергией 1-200 кэВ, в зависимости от FWHM импульса (время нарастания) показано на рисунке 52(е). Хорошо виден локус от характеристического излучения ксенона, вызванного фоновыми -квантами. Это позволяет определить степень деградации первичного ионизационного заряда в зависимости от времени нарастания импульса. Анализируя эту взаимосвязь для набора двухнедельных фоновых данных, собранных между двумя очистками газа в Ті -реакторе, можно получить поправочный коэффициент потери заряда и, таким образом, скорректировать амплитуду отклика детектора. Скорость изменения коэффициента деградации отклика детектора для собственного характеристического излучения ксенона со временем, показана на рисунке 52(f).



Рисунок 52 – Сигнал от ЗЧУ: (а) и (с) - исходный зарядовый импульс (темная кривая) и восстановленный в режиме офлайн (светлые кривые); (b) и (d) - дифференцированный импульс заряда, соответствующий восстановленному сигналу заряда. τ_p - время дрейфа электронов от катода к аноду. (e) - площадь сигнала в форме колокола (заряд) в зависимости от FWHM. (f) - Изменение коэффициента ухудшения амплитуды отклика от характеристического излучения ксенона в зависимости от времени

Известно, что, помимо 2К-захвата, двойная фотоионизация К-оболочки атома может создать "полый атом" путем поглощения одного фотона с выделением двух коррелированных электронов. Эти события могут быть использованы в качестве эталона в эксперименте по поиску 2К-захвата. Для выбора таких событий весь набор калибровочных измерений с внешнего гамма-источника, накопленный за шесть лет, был повторно проанализирован для проверки процедур обработки фоновых сигналов в эксперименте. Кроме того, данные калибровки были проанализированы при заполнении МПС криптоном до давления 5,5 бар. Во время калибровки счетчик облучался через стенку корпуса фотонами от источника Cd-109 с энергией 88 кэВ. В дополнение к регулярным калибровочным измерениям в течение нескольких месяцев проводились долгосрочные измерения.

Чтобы подтвердить эти предположения была построена характеристика двухточечных событий с общей амплитудой 60-95 кэВ. На рисунке 53 (верхние панели) показано двумерное распределение этих событий в зависимости от амплитуды первого (А1) и второго (А2) подимпульсов для криптона (слева) и ксенона (справа). Из этого распределения видно, что максимумы интенсивности наблюдаются для комбинации амплитуд подимпульсов (К-линия характеристического излучение и фотоэлектрон + Ожеэлектрон). Вертикальные и горизонтальные локусы отражают особенности событий, связанных с неполным поглощением энергии 88 кэВ, и форму спектра входного излучения. Наклонная диагональная полоса включает события с полным поглощением 88 кэВ за счет фотоэлектрического эффекта с образованием фотонов тормозного излучения и за счет комптоновского рассеяния. Для ксеноновой мишени видны две косые диагональные полосы. Одна полоса включает события с полным поглощением фотона с энергией 88 кэВ фотоэлектрическим эффектом с излучением еА(К) и с образованием фотонов тормозного излучения и через комптоновское рассеяние. Вторая полоса соответствует энергии 58,2 кэВ и включает события с энергией 29,8 кэВ от комптоновского рассеяния фотона с энергией 88 кэВ внешними электронами. Процедура преобразования плоской подложки в двумерные распределения позволяет избежать проблемы комптоновского фона и имеет то преимущество, что ошибки определяются процедурой подгонки.



Рисунок 53 – Двумерные распределения восстановленных амплитуд энерговыделения в отдельных кластерах точечной ионизации от внешнего источника фотонов с энергией 88 кэВ (Cd-109): верхние рисунки - двухточечные события и нижние рисунки - трехточечные события для образцов криптона и ксенона соответственно

На нижних панелях на рисунке 53 показано двумерное распределение трехточечных событий при свертке в терминах амплитуды первого подимпульса. Для криптоновой мишени наблюдаются ярко выраженные сгустки точек при комбинациях амплитуд [A2,A3], соответствующих [$K_{\alpha}^{h} \otimes K_{\alpha}^{S}$] и [$K_{\alpha} \otimes (\gamma 88 - 2 \times K_{\alpha})$]. Для правильного объяснения наблюдаемой закономерности следует иметь в виду, что все три подимпульса имеют идентичные амплитудные спектры. Первая область включает события, в которых амплитуды второго и третьего подимпульсов соответствуют энергии К-серии атома криптона. Невидимый первый подимпульс A1 имеет амплитуду, соответствующую энергии 62,8 кэВ, и дополняет общую энергию события 88 кэВ. Соответствующий выбор события для ксеноновой мишени показан на нижней правой панели того же рисунка 53.

Суммирование скорректированных выходных данных для каждого этапа дает значение интегральной интенсивности $I_1K(\alpha,\beta)$ для одинарной фотоионизации Коболочки. Аналогичным образом, были проведены суммирования спектров для трехточечных событий, чтобы получить интегральную интенсивность $I_2K(\alpha,\beta)$ для двойной фотоионизации К-оболочки. Общее количество зарегистрированных событий составило $2,5 \times 10^7$ и $4,2 \times 10^7$ для криптона и ксенона соответственно. Оценка общего числа двойной фотоионизации К-оболочки с учетом выхода флуоресценции составила 550 и 320 событий для криптона и ксенона соответственно. Более низкий выход для ксеноновой мишени можно объяснить тем фактом, что энергия падающих фотонов была ниже области насыщения, в отличие от криптоновой мишени, для которой $\Delta E = E\gamma - Q_{2K}$ находится в асимптотической области.

Таким образом, благодаря полученным данным, мы можем оценить соотношение двойной и однократной ионизации К-оболочек одним фотоном с энергией 88 кэВ для процессов встряхивания (shake-off), которое составило 5,2×10⁻⁴ и 1,2×10-⁴ для криптона и ксенона соответственно. На рисунке 54 показано соотношение вероятности двойной и однократной фотоионизации К-оболочки в зависимости от атомного номера. Черные символы используются для экспериментов, проведенных в асимптотической области для сечения двойной К-фотоионизации. Красные точки показывают данные, полученные нами.



Рисунок 54 – Отношение двойной фотоионизации к одиночной для К-оболочки в зависимости от атомного номера. Символы используются для экспериментов, проводимых в асимптотической области для сечения двойной фотоионизации. Сплошная линия – это степенной закон 1/*Z*^{1,61}

9.2. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

1) В 2021 году был проведен углубленный анализ данных AMoRE-pilot. С этой целью было проведено многопараметрическое моделирование фона данной установки, полученного на этапах (run) 5, 6, 7. Это позволило с большой точностью проанализировать вклад основных компонент фона в область интересов эксперимента. Благодаря этому была улучшена оценка на период полураспада для безнейтринного бета-распада Mo-100 с $T_{1/2}^{0\nu} > 9,5 \cdot 10^{22}$ лет до $T_{1/2}^{0\nu} > 3,43 \cdot 10^{23}$ лет, для эксперимента

AMoRE-pilot. Результаты работы были доложены на конференцииTAUP-2021 в докладе – «Status of AMoRE».

2) Произведен загрязнений поверхности альфаанализ кристаллов источниками, а также материалов, окружающих кристаллы (поверхностная альфаактивность). За основу брались данные AMoRE-pilot. Знание активности данных источников позволит оценить их вклад в область интересов (3034,4±4 кэВ) на этапе AMoRE-I. Чтобы понять фоновый вклад как внутренних, так и поверхностных радиоактивных загрязнений в кристаллах и близлежащих материалах, было проведено моделирование, с помощью пакета Geant4, цепочек распада²³⁸U, ²³²Th и ²³⁵U не только для внутренних загрязнений, но и для поверхностных. При анализе результатов моделирования, полученный модельный спектр фона каждого кристалла составлялся с измеренным спектром фона. Было обнаружено, что общий смоделированный фоновый спектр хорошо описывает данные для всех шести детекторов в области энергии 2,5 МэВ -7,0 МэВ. В результате анализа было получено, что усреднённый уровень фона, для поверхностного загрязнения, в области интересов эксперимента (3034,4±4 кэВ) составляет $(2,22 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$ соб./кэВ/кг/год, что выше требуемого значения для этапа AMoRE-II. По результатам работ был подготовлена публикация.

3) В 2021 году продолжился набор статистики на этапе AMoRE-I, на данный момент чистое время измерения составляет больше 8000 часов. Планируется, что набор данных в фазе AMoRE-I продлиться не менее трех.

4) Обновлена группа онлайн дежурных (членов коллаборации AMoRE) от лаборатории низкофоновых исследований БНО ИЯИ РАН. В нее вошли 4 человека.

10. Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA

10.1. Эксперименты GERDA и LEGEND

Гипотетический распад $0\nu\beta\beta$ - это процесс, выходящий за рамки Стандартной модели физики элементарных частиц: два нейтрона внутри ядра, здесь ⁷⁶Ge, одновременно превращаются в два протона и два электрона ("бета-частицы") без излучения двух антинейтрино. Его обнаружение имело бы глубокое значение для физики элементарных частиц и космологии: установление нарушения лептонного числа и майорановской природы нейтрино, т. е. идентичности нейтрино и антинейтрино, доступ к нейтринной массе и важный ключ к пониманию того, почему во Вселенной гораздо больше материи, чем антиматерии.

Эксперимент GERDA (Germanium Detector Array) в лаборатории Nazionali del Gran Sasso (LNGS) INFN, Италия, сообщил о своих окончательных результатах поиска безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) ⁷⁶Ge в конце прошлого года в журнале Physical Review Letters [55]. Распад не был обнаружен, но все цели заключительной фазы эксперимента были достигнуты.

Сообщенный нижний предел для периода полураспада 0vββ составил 1,8×10²⁶ лет и совпадает с ожидаемым значением чувствительности эксперимента. Более строгое ограничение для 0vββ любого изотопа никогда ранее не было получено. Также, сообщенная скорость счёта фоновых событий 5,2×10⁻⁴ отсчета/(кг·год·кэВ) в области сигнала не имеют себе равных в низкофоновой физике.

В 2021 году продолжен анализ экспериментального материала эксперимента GERDA и проведены исследования новых ⁷⁶Ge детекторов, подготовлены и опубликованы 2 статьи в журналах из базы WoS [56, 57].

Опыт эксперимента GERDA привел к ожиданию того, что дальнейшее снижение фона может быть достигнуто, так что станет возможным эксперимент без фона с еще большей силой источника и экспозиции. Сотрудничество LEGEND [58] создано слиянием двух международных коллабораций: GERDA и Maiorana и направлено на повышение чувствительности к периоду полураспада $0v\beta\beta$ -распада до 10^{28} лет. На первом этапе оно развернет обогащенные германиевые детекторы общей массы 200 кг в слегка модифицированной инфраструктуре GERDA с началом сбора данных в 2022 году. Одновременно начата разработка детектора LEGEND-1000.

Международный эксперимент GERDA выполнял большой коллектив учёных из институтов стран Европейского Сотрудничества, России и Объединённого института

ядерных исследований. От Росси участвовали учёные из Института ядерных исследований РАН и Курчатовского Института. Для выполнения эксперимента по поиску 0vββ-распада следующего поколения LEGEND сотрудничество расширилось, в частности, в его состав вошли учёные из США.

В рамках этой задачи учёные из России дистанционно участвовали в рабочих совещаниях эксперимента GERDA и LEGEND.



Рисунок 55 – Разрез установки эксперимента LEGEND-200, расположенного в LNGS INFN. В центре (зелёным цветом) расположены гирлянды германиевых детекторов с суммарным весом около 200 кг, которые погружены в жидкий аргон. Криогенный сосуд диаметром 4 м представляет собой два стальных сосуда, вложенные один в другой с расстоянием между ними в 10 см. На внутренней стенке криогенного сосуда виден слой чистой меди. Криогенный сосуд помещён в бак с водой диаметром 10м. Воду просматривают фотоэлектронные умножители.

10.2. Эксперимент Double Chooz

10.2.1. Измерение угла смешивания нейтрино методом RRM

Атомная электростанция Chooz B во Франции, где выполняется эксперимент Double Chooz, состоит из двух ядерных реакторов. За время топливной кампании реакторы атомной станции никогда не работают на одной мощности. Время от времени они работают на пониженной мощности или один из реакторов останавливается. На рисунке 56. показана скорость счета каждого из детекторов Double Chooz в зависимости от времени, видны моменты работы реакторов на пониженной мощности или остановки одного из реакторов.



Рисунок 56 – Скорость счета дальнего детектора (верхняя панель) и ближнего детектора (нижняя панель) за время совместной работы. При одном отключенном реакторе суммарная скорость счета около 400 событий в сутки, а при другом отключенном реакторе около 600 событий в сутки для ближнего детектора. Для дальнего детектора эта разность менее выражена

Для определения амплитуды осцилляций использовался новый метод – RRM (Reactor Rate Modulation), который заключается в измерении скорости счета детектора в зависимости от мощности ядерного реактора. На рисунке 57 показаны результаты анализа методом RRM. В результате анализа получено новое значение амплитуды осцилляций, совпадающее в пределах ошибок с результатом стандартного анализа: $\sin^2 2\theta_{13} = 0,095 \pm 0,015$.



Рисунок 57 – Результаты подгонки данных, полученных на разной мощности реакторов с учетом осцилляций. Слева данные дальнего детектора, справа – ближнего

10.2.2. Ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние

Если стерильные нейтрино существуют, то они искажают спектр антинейтрино, первоначально рожденный в ядерном реакторе. Расстояние от центра ядерных реакторов в эксперименте Double Chooz для ближнего детектора составляет примерно 400 м, а для дальнего детектора 1050 м. Можно провести анализ исчезновения нейтрино, сравнивая энергетические спектры на двух расстояниях.

По возможному искажению спектра в пределах статистики был сделан анализ на существование стерильных нейтрино. На рисунке 58 приведены ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние. Значение параметров при минимальном значении $\chi^2 \sin^2 2\theta_{14} = 0.043 \pm 0.015$ и $\Delta m^2_{14} = 0.028$ зВ².



Рисунок 58 – Верхний предел на параметры осцилляций при 95% доверительной вероятности (черная линия). Цветные области соответствуют 1σ (зеленая область) и 2σ (болотная область) параметров относительно медианного значения

10.2.3. Измерение спектра долгоживущих осколков во время остановки реактора

Во время остановки обоих реакторов атомной станции измеряется не только фон коррелированных событий, но и остаточное антинейтринное излучение из реакторов, исходящее от долгоживущих осколков с периодами полураспада более одного дня. До сих пор не удавалось зарегистрировать это излучение из-за достаточно большого фона в предыдущих экспериментах. В Double Chooz фон коррелированных событий, связанный с быстрыми нейтронами, космогенными изотопами (⁹Li) и случайными совпадениями оказался очень низок, менее 3% от полного эффекта от реакторов. Это позволило увидеть запаздывающее антинейтринное излучение от долгоживущих осколков (⁹⁰Sr-⁹⁰Y, ¹⁰⁶Ru-¹⁰⁶Rh, ¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr).

На рисунке 59 показаны спектры нейтринных событий в ближнем и дальнем детекторах после вычитания всех фонов за время остановки двух реакторов на 20 дней. Для обоих детекторов наблюдается избыточная скорость счета в диапазоне от 1 до 3 МэВ наблюдаемой энергии, что соответствет спектрам от изотопов 90 Y, 106 Rh и 144 Pr, которые являются дочерними для долгоживущих 90 Sr, 106 Ru и 144 Pr соответственно.



Рисунок 59 – Спектры событий в дальнем (левая панель) и ближнем (правая панель) детекторах Double Chooz после вычитания всех фонов

10.2.4. Измерение сечения реакции обратного бета-распада с высокой точностью

В ближнем детекторе Double Chooz была набрана высокая статистика нейтринных событий от двух работающих ядерных реакторов (667 тыс. событий). Это позволяет измерить сечение реакции обратного распада (ОБР).

$$<\sigma_f>=rac{N(\overline{v_e})}{N_p imes \epsilon} imes \left(\sum_{r=B1,B2} rac{_r}{4\pi L_r^2 imes < E_f>_r}
ight)^{-1} [cm^2/деление],$$

где $< \sigma_f > -$ среднее сечение реакции ОБР, $N(\overline{v_e})$ – число нейтринных событий, N_p –

число протонов в мишени, ϵ – эффективность регистрации нейтринных событий, $\langle P_{th} \rangle$ – средняя мощность ядерного реактора, L_r^2 – квадрат расстояния до реактора и $\langle E_f \rangle$ – средняя энергия на акт деления.

Было измерено с высокой точностью сечение реакции обратного бета-распада. $\langle \sigma_f \rangle$ = (5,71 ± 0,06) × 10⁻⁴³ см²/деление, что соответствует составу активной зоны по числу делений изотопов: ²³⁵U – 52,0%, ²³⁸U – 8,7%, ²³⁹Pu – 33,3%, ²⁴¹Pu – 6,0%. Полученная точность 0,97% является лучшей в мире к настоящему времени и превысила наиболее точное измерение сечения реакции обратного бета-распада в эксперименте Bugey-3 (1,4%) выполненное в 1995 году [59].

В таблицеТаблица 2 приведены неопределенности компонент, составляющих сечение.

| Число протонов, Np | 0,66 | |
|--|------|--|
| Мощность, P_{th} | 0,47 | |
| Отбор событий | 0,24 | |
| Фоны | 0,18 | |
| Энергия деления, < <i>E</i> _f > | 0,16 | |
| Поправка на $	heta_{13}$ | 0,16 | |
| Статистика | 0,22 | |
| Всего: | 0,97 | |

Таблица 2 – . Неопределенности компонент сечения для ближнего детектора (%)

11. Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо

11.1. Механизм температурных вариаций средней энергии мюонов на больших глубинах

11.1.1. Связь энергетических характеристик LVD-мюонов под землей и на уровне моря

Температурные вариации интенсивности мюонов связаны с процессами их генерации в верхних слоях атмосферы. Последующее прохождение мюонами атмосферы практически не влияет на энергию LVD-мюонов, то есть мюонов, достигающих глубины LVD.

Энергопотери мюонов в грунте трансформируют их исходный энергетический спектр (на поверхности, ниже будем полагать – на уровне моря), но не меняют интенсивности мюонов, обладающих на уровне моря энергией, не ниже пороговой E_{μ}^{th} , то есть достаточной для достижения глубины LVD. Следовательно, механизм вариаций средней энергии мюонов $\bar{E}_{\mu} = 270 \text{ ГэВ}$ под землей должен заключаться в процессах как генерации мюонов в верхних слоях атмосферы, так и, в отличие от вариаций интенсивности, прохождения мюонами слоя грунта большой толщины.

Минимальная энергия мюонов на уровне моря $E_{\mu, sl}^{\min}$, необходимая для достижения глубины $H^{\min} = 3,1$ км в.э., $E_{\mu, sl}^{\min} = 1,3$ ТэВ [60]. Пороговая энергия $E_{\mu, sl}^{th}$ (50% вероятности выживания) составляет 1,8 ТэВ. Эту величину можно определить с помощью выражения, связывающего энергию мюона на уровне моря $E_{\mu,sl}$ с его энергией, в среднем, $E_{\mu, H}^{av}$ на глубине H [61]: $E_{\mu, H}^{av} = (E_{\mu,sl} + \epsilon_{\mu}) e^{-bH} - \epsilon_{\mu}$. Полагая $E_{\mu, H}^{av} = 0$, для $E_{\mu, sl}^{th}$ получаем: $E_{\mu, sl}^{th} = (e^{+bH} - 1) \epsilon_{\mu}$.

В этих выражениях параметр $\epsilon_{\mu} = a/b$ характеризует форму дифференциального спектра мюонов, которая на больших глубинах является квазиплоской: $dN_{\mu}/dE \propto 1/(\epsilon_{\mu} + E_{\mu})^{\gamma_{\mu}}$. Параметр ϵ_{μ} представляет энергию, выше которой начинают доминировать радиационные потери и квазиплоский спектр мюонов приобретает форму спектра на поверхности $P_{\rm sl}(E_{\mu}) \propto E_{\mu}^{-\gamma_{\mu}}$. Величины *a* и b входят в формулу для энергопотерь мюонов в слое вещества *H*: $- dE_{\mu}/dH = a + bE_{\mu}$, где *a* – полные ионизационные потери, b – суммарные потери для трех радиационных процессов. Отношение $(a/b) = \epsilon_{\mu}$ представляет критическую энергию мюона, при которой ионизационные потери равны радиационным; если $E_{\mu} << \epsilon_{\mu}$, то доминируют ионизационные потери, при $E_{\mu} >> \epsilon_{\mu}$ – радиационные.

Подставляя $\epsilon_{\mu} = a/b = 667 \ \Gamma \Rightarrow B$ ($a = 280 \ \Gamma \Rightarrow B/\kappa M$ в.э., $b = 0,42 / \kappa M$ в.э.) для глубины $H = 3,1 \ \kappa M$ в.э. находим $E_{\mu, sl}^{th} = 1785 \ \Gamma \Rightarrow B \approx 1,8 \ T \Rightarrow B$. При выбранных значениях величин a и b средняя энергия одиночных LVD-мюонов $\overline{E}_{\mu}^{cal} = 277 \ \Gamma \Rightarrow B$, вычисляемая по формуле $\overline{E}_{\mu}^{cal} = \epsilon_{\mu} [1 - \exp(-bH)] (\gamma_{\mu} - 2)^{-1}$, с высокой точностью согласуется с установленной экспериментально $\overline{E}_{\mu} = 270 \ \Gamma \Rightarrow B$.

11.1.2. Сезонные вариации энергетического диапазона LVD-мюонов под землей и на уровне моря

Дифференциальный спектр мюонов на глубинах $H > 1/b \sim 2,5$ км в.э. квазиплоский до энергии ~ ϵ_{μ} , выше которой спектр укручается, приобретая форму спектра $P_{\rm sl}$ (E_{μ}) $\propto E_{\mu}^{-\gamma_{\mu}}$ с показателем $\gamma_{\mu} = 3,75$. Поэтому спектр LVD-мюонов можно представить в виде ступеньки, обрывающейся при энергии ${}^{0}E_{\mu}{}^{\rm max} = 2\overline{E}_{\mu} = 540$ ГэВ (приближение ступенчатого спектра), ${}^{0}E_{\mu}{}^{\rm max}$ – среднегодовая энергия «ступеньки». В таком случае все LVD-мюоны на глубине 3,1 км в.э. с интенсивностью ${}^{0}I_{\mu,H}$ заключены в энергетическом диапазоне 0 – 540 ГэВ. Полагая $\overline{E}_{\mu, \, \rm sl}^{\rm av} = {}^{0}E_{\mu}{}^{\rm max} = 540$ ГэВ, определяем соответствующую энергию на уровне моря: ${}^{0}E_{\mu, \, \rm sl}{}^{\rm max} = 3771$ ГэВ $\approx 3,8$ ТэВ. Следовательно, среднегодовой спектр мюонов на глубине LVD эффективно формируется LVD-мюонами, на уровне моря заключенными в диапазоне $E_{\mu, \, \rm sl}^{\rm th} \div {}^{0}E_{\mu, \, \rm sl}{}^{\rm max} \rightarrow 1,8 - 3,8$ ТэВ с интенсивностью ${}^{0}I_{\mu,\rm sl} = {}^{0}I_{\mu,H}$.

Гипотеза о связи сезонных вариаций числа космогенных нейтронов со средней энергией мюонов, объясняющая аномальные вариации числа нейтронов, приводит к заключению, что энергия мюонов \overline{E}_{μ} на глубине LVD в летний период ${}^{s}\overline{E}_{\mu,H}$ возрастает на 10%. Необходимо отметить, что величина \overline{E}_{μ} является естественным энергетическим параметром, характеризующим поток как мюонов, так и образуемых ими нейтронов, несмотря на то, что основное количество нейтронов производится мюонами высокоэнергетического участка спектра.

При ступенчатом спектре мюонов возрастание ${}^{s}\bar{E}_{\mu, H}$ на 10% должно увеличивать максимальную энергию спектра также на 10%: ${}^{s}E_{\mu, H}^{max} = 1,1^{0}E_{\mu, H}^{max} = 594$ ГэВ. По формуле для $E_{\mu, sl}^{th}$ находим, что данной величине соответствует энергия на уровне моря ${}^{s}E_{\mu, sl}^{max} = 3970$ ГэВ. Таким образом, увеличение $E_{\mu, H}^{max}$ в 1,1 раза связано с возрастанием энергии ${}^{0}E_{\mu, sl}^{max}$ на 5,3%. В то же время увеличению $\bar{E}_{\mu, H} = 270$ ГэВ в 1,1 раза соответствует увеличение энергии $E_{\mu, sl}$ всего в 1,036 раза (от 2780 ГэВ до 2880 ГэВ). Полученные соотношения объясняются свойством формулы, связывающей энергии $E_{\mu, H}^{av}$ и $E_{\mu, sl}$ и отражающей воздействие на форму спектра мюонов под землей квазипостоянных

ионизационных потерь и радиационных энергопотерь, флюктуирующий характер которых, с одной стороны, значительно увеличивает вероятность достижения мюонами больших глубин и, с другой, – нелинейно «растягивает» спектр мюонов на глубине. Под действием этих потерь моноэнергетический поток мюонов с энергией на уровне моря, например 10 ТэВ, на разных глубинах трансформируется в спектры различной формы [62].

Величины ${}^{0}E_{\mu, sl}^{max}$ и ${}^{s}E_{\mu, sl}^{max}$ в действительности определяются участками спектра мюонов $P_{sl}(E_{\mu})$, энергия которых превышает эти величины. Их значения, найденные выше в рамках приближения ступенчатого спектра LVD-мюонов, в силу круто падающего спектра $P_{sl}(E_{\mu}) \propto E_{\mu}^{-3.75}$ близки реальным.

11.1.3. Сезонные вариации энергетического диапазона эффективной генерации LVD-мюонов

Средняя энергия мюона связана с энергией «родительского» пиона равенством E_{π} = (m_{π}/m_{μ}) E_{μ} , где m_{π} и m_{μ} – массы пиона и мюона. Используя это соотношение и пренебрегая энергопотерями (ионизационными) мюонов в воздухе (~ 2 ГэВ), можно перейти от энергии $E_{\mu,sl}^{th}$ к пороговой энергии пиона: $E_{\pi}^{th} \approx (m_{\pi}/m_{\mu}) E_{\mu}^{th} = 2,4$ ТэВ. Полагая, что только ~ 5 % пионов с энергией 2,4 ТэВ распадаются, а остальные пионы генерируют вторичные адроны, получаем, что для образования одиночного мюона с энергией $E_{\mu}^{\text{th}} =$ 1,8 ТэВ пионами первого поколения необходима энергия ~ 48 ТэВ, затрачиваемая на рождение заряженных пионов. Добавляя к этому энергию нейтральных пионов (~ 1/2 от энергии π^{\pm}), получаем энергию взаимодействия $E_{in}^{th} \approx 72$ ТэВ с образованием пионов. Средняя величина коэффициента неупругости *K*_{inl} в глубоконеупругом *pA*-взаимодействии ~ 0,5 (~ ¹/₂ энергии E_p уносится лидирующим нуклоном). С учетом этого получаем величину пороговой энергии протона E_pth ~ 144 ТэВ, необходимой для образования мюона, достигающего глубины LVD. Крутопадающая форма спектра первичных протонов $F(E_p) \propto E_p^{-2.75}$ и быстрый рост плотности атмосферы с уменьшением высоты (что приводит к увеличению вероятности πA -неупругих столкновений для пионов второго поколения) обусловливают определяющую роль пионов первого поколения в формировании потока мюонов на глубине LVD. Вклад пионов второго и последующих поколений в генерацию мюонов высокой энергии не превышает 20% [63].

Повторив такие же вычисления для среднегодовых ${}^{0}E^{\max}$ и летних ${}^{s}E^{\max}$ значений, находим величины: ${}^{0}E_{\pi}{}^{\max} = 4,98$ ТэВ, ${}^{s}E_{\pi}{}^{\max} = 5,24$ ТэВ. Следовательно, участки эффективной генерации LVD-мюонов в спектрах пионов ограничиваются энергиями: 2,4 \leq ${}^{0}E_{\pi} \leq 4,98$ ТэВ, 2,4 \leq ${}^{s}E_{\pi} \leq 5,24$ ТэВ. Используя зависимость множественности пионов $v_{\pi} \approx 3 \ln E_{in}$ от энергии взаимодействия E_{in} и полагая величину $k_{\pi}^{dec} = 0,05$ независящей от E_{in} , можно оценить число мюонов N_{μ} , образующихся при пороговой $E_{in}^{th} = 72$ ТэВ и максимальной $E_{in}^{max} =$ 152 ТэВ энергиях взаимодействия и достигающих глубины LVD: $v_{\pi}^{\pm} = 2/3$ (3ln E_{in}), $N_{\mu} =$ $k_{\pi}^{dec} \cdot v_{\pi} = 0,1 \ln E_{in}$ (ГэВ); отсюда $N_{\mu}^{th} = 1,12$, $N_{\mu}^{max} = 1,19$. Таким образом, в диапазоне энергий 72 $\leq E_{in} \leq 152$ ТэВ одному *pA*-взаимодействию соответствует один LVD-мюон.

Для эффективной генерации LVD-мюонов в распадах пионов энергия E_{π} не должна превышать критической энергии E_{π}^{cr} , соответствующей плотности атмосферы ρ_{at} на высоте генерации пионов первого поколения. Если приравнять пороговую энергию критической $E_{\pi}^{th} = E_{\pi}^{cr} = 120 \rho_{at}^{-1} (m_{\pi}c^2/\tau_0 c_0) = 2,15 \cdot 10^{-2} \rho_{at}^{-1}$ (ГэВ). = 2,4 ТэВ, то можно оценить плотность слоя воздуха генерации пионов $\rho_{at} \approx 9 \cdot 10^{-6}$ г/см³, которая соответствует плотности атмосферы на высоте ~ 35 км.

Таким образом, подавляющее число LVD-мюонов образуется в распадах пионов первого поколения генерации с энергией в интервале от E_{π}^{th} до E_{π}^{cr} . Величина ${}^{0}E_{\pi}^{\text{cr}}$ соответствует среднегодовой высоте слоя атмосферы, в котором эффективно генерируются пионы с энергией $E_{\pi} \ge E_{\pi}^{\text{th}}$. Летнее повышение температуры атмосферы вызывает повышение высоты и расширение слоя генерации пионов с энергиями $E_{\pi} \ge E_{\pi}^{\text{th}}$, сопровождающееся падением плотности ρ_{at} . Уменьшение плотности приграничного слоя атмосферы на высоте ~ 40 км влечёт за собой расширение энергетического диапазона распадающихся пионов в результате увеличения энергии E_{π}^{cr} от ${}^{0}E_{\pi}^{\text{max}} = 4,98$ ТэВ до летнего значения ${}^{s}E_{\pi}^{\text{cr}} = {}^{s}E_{\pi}^{\text{max}} = 5,24$ ТэВ и ужесточение спектра образующихся мюонов.

Эффект летнего ужесточения спектра LVD-мюонов на уровне моря (${}^{s}\gamma_{\mu,sl} < {}^{0}\gamma_{\mu,sl} =$ 3,75), обуславливающего увеличение энергии $\overline{E}_{\mu, sl}$ и интенсивности I_{μ} , имеет ту же природу, что и ужесточение энергетического спектра и возрастание интенсивности мюонов высокой энергии (> ~ 1 ТэВ) при увеличении угла наблюдения θ . Это увеличение длины свободного пробега пионов в слое атмосферы низкой плотности, приводящее к увеличению вероятности распада пионов высокой энергии.

Можно оценить летнее отклонение величины ${}^{s}\gamma_{\mu,sl}$ от среднегодовой ${}^{0}\gamma_{\mu,sl} = 3,75$, используя формулу для $\overline{E}_{\mu}{}^{cal}$ и амплитуду вариаций 10% энергии \overline{E}_{μ} на глубине LVD:

$$\frac{{}^{s}\overline{E}_{\mu,\mathrm{LVD}}}{{}^{0}\overline{E}_{\mu,\mathrm{LVD}}} = \frac{{}^{0}\gamma_{\mu,\mathrm{sl}}-2}{{}^{s}\gamma_{\mu,\mathrm{sl}}-2} = 1,1.$$

Отсюда, при ${}^{0}\gamma_{\mu,sl} = 3,75$ следует ${}^{s}\gamma_{\mu,sl} = 3,59$, то есть летом показатель $\gamma_{\mu,sl}$ уменьшается на 4,3 %, что находится в пределах погрешности измерений величины $\gamma_{\mu,sl}$ и что затрудняет определение вариаций показателя $\gamma_{\mu,sl}$ в эксперименте.

Летнее изменение формы спектра мюонов под землей (рисунок 60) сходно с трансформацией спектра при увеличении глубины. Отличие заключается в том, что переход к бо́льшим глубинам приводит к росту \overline{E}_{μ} и падению интенсивности I_{μ} , в то время как летнее изменение формы спектра $P_H(E_{\mu})$ на глубине H сопровождается увеличением как энергии \overline{E}_{μ} , так и интенсивности I_{μ} . Очевидно, что в силу постоянства среднегодовых характеристик потока мюонов их изменение в летней период соответствует изменению зимой с обратным знаком.



Рисунок 60 – Сезонная трансформация формы спектра мюонов, качественное представление. Красная кривая — среднегодовой спектр, синяя пунктирная — летний спектр

11.2. Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии 11.2.1. Радоновый фон эксперимента LVD

Основными источниками фона по низкому порогу на установке LVD являются продукты естественной радиоактивности грунта и радон, который образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов. Радон выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в окружающих горных породах, хорошо растворяется в воде и переносится подземными водами. Наиболее интенсивный выход радона наблюдается при землетрясениях. Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона, период полураспада которого составляет 3,8 дня. Наиболее вероятная цепочка радиоактивных распадов:

$\begin{array}{c} \overset{222}{}_{86}\text{Rn} \xrightarrow{\alpha} \overset{218}{}_{84}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} \overset{214}{}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta-} \overset{214}{}_{83}\text{Bi} \xrightarrow{\beta-} \overset{214}{}_{84}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} \overset{210}{}_{82}\text{Pb} \\ \overset{3}{}_{3,82\text{дH}} \xrightarrow{3,05\text{мин}} \overset{205}{}_{26,8\text{мин}} \xrightarrow{\beta-} \overset{214}{}_{19,7\text{миh}} \xrightarrow{\beta-} \overset{214}{}_{1,6\times10} \xrightarrow{\alpha} \overset{210}{}_{22,3\text{года}} \end{array}$

Гамма-излучение создаётся, в основном, ядрами висмута, превращающимися в полоний за счёт β-распада с характерным периодом полураспада 19,7 мин. Энергетический спектр гамма-квантов охватывает диапазон от 0,6 до 2,5 МэВ.

Система регистрации содержит низкоэнергетичный канал, порог срабатывания которого 0,5 МэВ (для внутренних, защищенных от радиоактивности породы, счетчиков). Фоновый темп счёта счётчиков измеряется автоматически в течение 10 сек. через каждые 10 мин. Для измерений величины концентрации радона используются внутренние счётчики (полное число – 80 счётчиков) одной башни. При обработке данных из них отбираются наиболее стабильно работающие в течение длительного времени. Число включаемых в обработку счетчиков варьируется от 60 до 76. Данные суммируются по часу. Суммарный темп счета нормируется на один счетчик в герцах (Гц). Общее число отсчетов в одном бине ~ 184000 (~ 420 отсчетов за 10 сек × 73 счетчика × 6 запусков в час), что дает относительную ошибку измерений ~ 0,2 %. Быстродействие метода (10 сек.) является уникальным, оно даёт возможность с высокой точностью фиксировать все детали временных изменений концентрации радона.

В результате анализа данных установки LVD по низкоэнергетическому порогу E_{LET} была установлена зависимость концентрации радона в подземном зале от ежедневной производственной деятельности в подземных залах Лаборатории. Средняя концентрация радона ²²²Rn в зале A, где расположен детектор LVD, составляет 25 ± 8 Бк/м³. Мы наблюдали довольно заметную корреляцию между фоновым сигналами в LVD и альфараспадами из-за ²²²Rn.

Идентификации аномальных возрастаний темпа счёта установки как "радоновых пиков" было посвящено несколько измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инжекцией радона. В одном из них через открытые ворота общей площадью 50 m^2 в экспериментальный зал впускался воздух из соседних невентилируемых помещений с повышенной концентрацией радона. Ворота открывались на фиксированное время 0,5, 3,0 и 6,0 часов. Время нарастания тема счета при этом составило: З часа - в первых двух случаях и 6 часов – в последнем. Отсюда можно заключить, что время перемешивания воздуха в зале около З часов. Это означает, что если нарастание пика превышает З часа, то длительность фронта пика соответствует времени инжекции радона в атмосферу зала. Рост концентрации радона при открытых воротах одновременно регистрировался α -частичным радометром, помещенным в структуру установки LVD. Это позволило разделить полный фоновый темп счёта установки LVD на

две составляющие: переменную, «радоновую», и постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы). Найдено, что в промежутках между пиками «радоновая» компонента составляет ~ 10% от полного темпа счёта (~ 50 Гц/сч.).

11.2.2. Предвестники землетрясений

Измерения темпа счета позволили разделить общий фон детектора на две компоненты: переменную, связанную с вариациями потока радона, и постоянную составляющую, связанную с радиоактивностью материалов установки и породы. Максимальная концентрация радона в подземных помещениях лаборатории Гран Сассо достигается в сентябре при максимальном насыщении породы водой подземными водами.

Итальянский институт геофизики и вулканологии ведет базу данных обо всех землетрясениях на Апеннинском полуострове. Она содержит время, координаты, магнитуду и глубину землетрясения.

Параметры землетрясений тоже очень отличаются друг от друга. До сильного землетрясения 6 апреля 2009 году, которое разрушило центральный город провинции Абруццо и унесло около 300 жизней (за 2-3 месяца) было много несильных толчков около 2-4 баллов (так называемых форшоков, кстати, поэтому геофизики решили, что сильного землетрясения не будет). На установке наблюдался общий повышенный темп счета (больше на 10 - 15 %) относительно минимального среднего значения в зимне-весенний период ~ 40 имп. с⁻¹сч⁻¹. Во время самого землетрясения (6 апреля 2009) и после темп счета увеличился еще на 20 %. Значения в максимумах пиков составляло около 55 – 57 имп. с⁻¹сч⁻¹. Напротив, перед землетрясением в 24 августа 2016 года геофизических форшоков не было. А по данным LVD за 3.5 дня был «предвестник» – пик на временном распределении темпа счета (рисунок 61). Расположение на карте установке и эпицентров землетрясений показано на рисунке 62.

На рисунке 63 можно видеть «классическую картину» поведения темпа счета в данных с предвестником землетрясения (повышение в конце 4 ноября) с последующим понижением и также большое повышение темпа счета 7 ноября за пару часов до землетрясения 05 ноября 2019 17:35:21, с магнитудой М=4,4.



Рисунок 61 – Темп счета LVD – временной ряд с 17 по 31 августа 2016 г. Вертикальными линиями нанесены толчки землетрясения в районе Риети 24 и 26 августа 2016 г.



Рисунок 62 – Расположение детектора LVD, кружочками эпицентры толчков 24 и 26 августа 2016 г.



Рисунок 63 – Темп счета LVD – временной ряд с 01 по 09 ноября 2019 г. Вертикальными линиями нанесены толчки землетрясения в Бальсорано 7 ноября 2019 г.

За 2019 год был проведен анализ данных установки LVD (N_{LVD}), совпадающих по времени с произошедшими сильными землетрясениями на расстояниях до 500 км от установки. На рисунке 64 показаны только толчки с магнитудой больше 3,5. Обычно сильные землетрясения сопровождаются серией толчков с небольшой магнитудой. Линиями на рисунках отмечены моменты сильных толчков.

Первое событие произошло вечером 7 ноября в Бальсорано (регион Абруццо, провинция Аквила) в 75 км от установки LVD. Было зарегистрировано повышение темпа счета по низкому порогу за несколько часов до землетрясения.

Следующие два сильных землетрясения произошли одно за другим, с разницей по времени порядка суток. Ночью с 7 на 8 декабря произошло землетрясение в Барете (регион Абруццо, провинция Аквила), а утром 9 декабря – множественные толчки в провинции Флоренция региона Тоскана в 250 км от установки LVD. Первое землетрясение произошло совсем рядом с установкой LVD, но оно было намного слабее второго события в Тоскане. Повышение темпа счета мы наблюдали за 1,5 суток до первого события. К сожалению, мы не можем достоверно определить, на какое сейсмическое событие дает отклик установка: на близкое, но слабое или на сильное, но более отдаленное.



Рисунок 64 – Сейсмические события 2019 года с магнитудой больше 3,5 и отклик установки LVD. Слева показаны эпицентры сильных толчков и их расположение относительно установки LVD. Справа – данные установки по нижнему порогу (по оси абсцисс – дата, по оси ординат – темп счета в секунду на счетчик). Линиями обозначены моменты сильных толчков

Третье событие тоже ставит перед нами вопросы: на каком расстоянии от эпицентра землетрясения установка LVD может дать отклик на сейсмическое событие. Утром 26 ноября произошло сильное землетрясение со множественными толчками в Албании в 500 км от установки LVD, а через несколько часов – в Боснии (~ 370 км от установки). Было зафиксировано повышение темпа счета установки за сутки до землетрясений.

Временной ряд данных LVD за 2021 год показан на рисунке 65. Большие пики можно соотнести с землетрясениями около установки (зона Средиземноморья):

 с 27 марта до середины апреля было много (больше 50) толчков в районе Адриатического моря от 3 до 6 баллов;

2) с 12 по 18 апреля в районе города Норча (где было разрушительное землетрясение 2016 г.);

 3) 15 сентября в районе Албании (разлом, проходящий через Италию), вызывающее много мелких толчков в Италии;

4) 7 сентября землетрясение 6,2 балла в районе греческого острова Крит.



Рисунок 65 – Темп счета LVD – временной ряд с января по ноябрь 2021 г.

11.3. Подготовка эксперимента NEWSdm по прямому обнаружению частиц темной материи с помощью мелкозернистых эмульсий

11.3.1. Обнаружение частиц темной материи в эксперименте NEWSdm

Темная материя (ТМ) образует новый тип стабильных частиц, которые имеют ненулевую массу (участвуют в гравитационных взаимодействиях) и предположительно могут испытывать слабые взаимодействия. Возможность слабых взаимодействий дает надежду на прямую регистрацию частиц ТМ в их взаимодействиях с атомными ядрами барионной материи. Гипотетические частицы, которые могут образовывать ТМ, в основном являются предметом теорий, выходящих за рамки Стандартной модели (СМ). Природа ТМ в настоящее время является одной из важнейших нерешенных проблем современной космологии, и поиск методов их обнаружения стимулирует развитие новых методов экспериментальной физики.

Слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMP) являются заслуживающими доверия, теоретически привлекательными кандидатами в ТМ. Прямой поиск WIMP в диапазоне масс от нескольких ГэВ/с² до нескольких ТэВ/с² может быть основан на обнаружении ядерной отдачи, вызванной упругим рассеянием WIMP.

Текущие экспериментальные усилия по прямому поиску темной материи посвящены поиску в наземных подземных детекторах редких взаимодействий между WIMP галактического гало и ядрами. Поскольку детекторы темной материи быстро улучшают свою чувствительность, в следующем десятилетии они столкнутся с нейтринным фоном, где нейтрино от солнечных, атмосферных и диффузных сверхновых имитируют сигнал темной материи.

Нейтрино являются основным фоном для прямого поиска WIMP с помощью методов обнаружения тока, поскольку они не могут быть защищены от них и вызывают отдачу с аналогичными скоростями и энергетическими спектрами.

Добавление информации о направлении в поисках темной материи – а не только измерение энергии – очень важно для исследования свойств темной материи и может открыть новую эру в исследовании космической темной материи.

Средняя скорость WIMP относительно нашей Солнечной системы составляет несколько сотен километров в секунду. На этих скоростях WIMP взаимодействуют с обычным веществом в основном посредством упругого рассеяния на ядрах, при этом ожидаемый спектр ядер отдачи уменьшается почти экспоненциально с увеличением энергии. Для масс WIMP в диапазоне от 10 ГэВ до 10 ТэВ типичные энергии отдачи ядер составляют от 1 до 100 кэВ.

Использование твердой мишени для направленных поисков, в принципе, может решить эту проблему и, таким образом, открыть путь для исследования новой области с очень низким поперечным сечением, вплоть до так называемого нейтринного дна и за его пределами. Тем не менее в твердой среде длина трека ядерной отдачи составляет порядка нескольких сотен нанометров, поэтому требуется детектор со сверхвысоким пространственным разрешением. Эту проблему решает эксперимент NEWSdm. Детектор будет установлен в подземной лаборатории Гран Сассо. Он использует новое поколение эмульсионных пленок сверхвысокого разрешения и революционную технологию считывания для сверхвысокого разрешения с очень высокой скоростью.

В эксперименте NEWSdm разрабатывается новая эмульсия под названием Nano Imaging Tracker (NIT) с зернами нанометрического размера, которые позволяют определять длину отдачи короче 100 нм. NIT представляют собой эмульсионные пленки с кристаллами AgBr диаметром около 40 нм и средним расстоянием между двумя соседними кристаллами около 70 нм. Ultra-NIT (U-NIT) имеют диаметр кристалла около 20 нм и среднее расстояние между двумя соседними центрами около 40 нм.

Новые концепции автоматизированной оптической микроскопии с поляризованным светом и цветных камер привели к разрешениям, позволяющим использовать свойства этих новых типов эмульсий. Эта технология разработана для разработки детектора эмульсии для первого направленного поиска TM при воздействии твердотельного детектора на 10 кг в год. Технические тесты подтверждают осуществимость этого подхода.

В настоящее время в исследованиях участвуют группы из пяти стран: Италии, Японии, Южной Кореи, России и Турции. Группы INFN - это Неаполь, LNGS и Рим. Из

Японии: университеты Чиба, Нагоя и Тохо. Из России: ОИЯИ, Национальный институт науки и технологий в Москве, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, МГУ, Институт ядерных исследований РАН, Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва. Из Турции – это Ближневосточный технический университет в Анкаре, из Южной Кореи – Национальный университет Кёнсан.

11.3.2. Фон эксперимента

Фоном эксперимента NEWSdm, в основном, является внешняя радиоактивность, которая обусловлена тремя источниками: (i) нейтронами от радиоактивности окружающей среды, (ii) нейтронами, образованными в результате расщепления мюонов космических лучей в окружающей горной породе, (iii) фотонами от радиоактивности окружающей среды. Полное моделирование фона выполняется на Geant4 для оценки материалов и толщины, необходимых для соответствующего экранирования.

11.3.3. Гамма-кванты и влияние защиты из свинца

Измерения фона гамма-квантов от радиоактивности проводились детектором NaI в подземном зале Лаборатории. Спектр гамма-квантов представлен на рисунке 66.



Рисунок 66 – Спектр гамма-квантов (измерения NaI детектором)

Влияние защиты из свинца исследовалось, применяя Монте-Карло моделирование с помощью Geant4. Для подбора пакетов «физики» Geant4 использовали три монолинии ²¹⁴ Pb – 352 кэB, ²¹⁴Bi – 609 кэB, ⁴⁰ K – 1460 кэB и сравнивались с аналитическими выражениями для различных толщин свинцовой защиты.

Гамма-кванты запускались нормально к плоскости поверхности защиты куба 20 см с переменной толщиной свинца. Точки выхода распределены по всему контейнеру. В таблице результаты: для каждого расчета приведены числа "фотонов (всех) | электронов",

попавших внутрь. Всего в моделировании было 100 тыс. событий. Энергетические спектры гамма-квантов с энергией 352 кэВ, 609 кэВ и 1460 кэВ после прохождения свинца толщиной 1 см показаны на рисунке 68.



Рисунок 67 – Распределение точек выхода на границе свинец-воздух

Таблица 3 – Число событий (гамма-квантов) «выживших» после прохождения защиты

| | 352keV | 609keV | 661.7keV | 1460keV |
|-----|-----------|-------------|-------------|--------------|
| 1cm | 5542 71 | 36474 528 | 41441 630 | 73851 1328 |
| 2cm | 263 2 | 11383 182 | 14853 208 | 48604 977 |
| 3cm | 9 0 | 3499 76 | | 31171 614 |



Рисунок 68 – Энергетические спектры после прохождения 1-см свинца



Рисунок 69 – Сравнение результатов моделирования на Geant4 и аналитических выражений. Зеленые точки – наше моделирование Geant4, оранжевые – аналитика для свинца

Второй этап моделирования состоял в запуске реального спектра гамма-квантов через 1-см слой свинцового куба для изотропного направления влета во внутренний объем куба со стороной 0,2м. В каждом расчете запускали 689557 гамма-квантов (суммарное число событий в файле с первичным спектром), чтобы проще было сравнивать. Черная кривая (на рисунке 70 с -квантами) – исходный спектр, светло-зеленая область – распределение первичных фотонов по энергии в расчете (для контроля того, что в расчете правильно воспроизводится первичный спектр). Спектры фотонов и электронов, входящих во внутренний объем, представлены на разных рисунках 70. Красные кривые: точка запуска – центр одной грани, направление – в центр куба. Зеленые кривые: точка запуска – центр одной грани, направление – случайное равномерное по углу (в сторону свинца). Синие кривые: точка запуска – на внешней границе свинца, направление – в центр куба (равномерно распределенное по телесному углу). Желтые кривые: точка запуска – случайная на внешней границе свинца (равномерно распределенная по всей поверхности), направление – случайное равномерное по углу (в сторону свинца). Размер бина для гамма-квантов (как в исходных данных) – 2,990294кэВ, для электронов – 50кэВ.



Рисунок 70 – Спектры ү-квантов и электронов

Нейтроны, так же как фотоны являются наиболее важным фоном в высокочувствительных экспериментах для поиска редких событий. Нейтроны возникают в результате спонтанного деления и реакций (α, n) при распаде урана и тория и их дочерних элементов. Мюоны космических лучей ответственны за производство нейтронов высокой энергии, которые могут проходить большие расстояния, минуя вето защиту.

Космогенные нейтроны составляют самую высокоэнергетическую составляющую общего нейтронного фона [64]. Эти нейтроны производятся мюонами посредством различных процессов:

- фотоиспарение: их кинетическая энергия простирается до ≈50 МэВ. Они создаются ядром, обменивающимся виртуальными фотонами с мюоном, или вторичными частицами, образующимися в мюонном каскаде.
- Расщепление: их кинетическая энергия простирается до нескольких ГэВ. Они возникают в результате фрагментации ядра неупругого рассеивания мюона. Их распределение по направлениям достигает максимума вдоль направления мюонов.

В задачи группы входит моделирование прохождение нейтронов и продуктов их взаимодействия в эмульсии и в материалах защиты.

12. Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^{\cdot}p$, в которых в спектре инвариантной массы $(J/\psi,p)$ пар были обнаружены резонансные структуры $P_c(4380)^+$ и $P_c(4450)^+$, объясненные минимальным набором из пяти кварков *cćuud*, это так называемый очарованный пентакварк. Новый результат обработки расширенного набора данных RUN1+RUN2 был представлен недавно [66]. Большая статистика и точность метода позволили подтвердить первое наблюдение дважды очарованного тетракварка, T_{cc}^+ , с составом кварков *ccúd*. Два тяжелых кварка одного аромата делают это состояние экзотичным, проявляющимся в масс-спектре $D^0D^0\pi^+$ мезонов с массой 3875 MeV/c². Близость к порогу $D^{*+}D^0$, возможно, указывает на молекулярное строение связей. Дальнейшее изучение требуется для определения деталей обнаруженной структуры.



Рисунок 71 – Распределения масс (D⁰D⁰π⁺). Точками показаны экспериментальные данные

В LHCb достигнута беспрецедентная точность изучения осцилляций $D^0 - D^0$. Недавно доложен результат [67] о первом в мире наблюдении разницы масс нейтральных очарованных мезонов, которая определяет частоту осцилляций. Опубликованное значение разницы масс 6.4×10⁻⁶ eV является наименьшим в мире между частицами, ~1×10⁻³⁸ g.

В эксперименте LHCb был выполнен тест лептонной универсальности в распадах В-мезонов $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ для статистики, соответствующей интегрально светимости 9 фб⁻¹. Была разработана программа идентификации каонов и заряженных лептонов (электронов и мюонов), вылетающих из одной вершины. В соответствии со Стандартной Моделью, отношение вероятностей распада В+ на каон и пары электрон-позитрон и $\mu^+ - \mu^- R_K$ должно быть равно 1,0. Однако в эксперименте было получено отличие от единицы на уровне 3,1 σ [68].



Рисунок 72 – Зависимость функция правдоподобия распадов $B^+ \to K^+ l^+ l^-$ от величины R_K. Темная, светло-темная и голубая области показывают допустимые отклонения от измеренной величины (минимум) 1 σ , 3 σ , 5 σ . Красная вертикальная линия показывает предсказание Стандартной Модели $R_K=1,0$

Разработана детальная программа физических исследований с использованием фиксированной мишени на коллайдере LHC [69] и подготовлен проект экспериментов с фиксированными мишенями для установки ALICE и LHCb. Для установки ALICE предложено выполнить отклонение гало пучка с помощью изогнутого кристалла длиной 1,2 см на угол около 150 мкрад и получить коллимированный пучок на твердую фиксированную мишень, после которой располагается второй изогнутый кристалл длиной 7 см с углом отклонения 15 мрад для направления рожденных частиц на существующие детекторы установки ALICE. Проведены разработки системы монтажа и перемещения кристалла и фиксированной мишени. Рассмотрена возможность использования газовой мишени на установках ALICE и LHCb [70]. Предусмотрено размещение поляризованной мишени для проведения экспериментов по исследованию процессов, зависящих от спина. Выполнены расчеты мгновенной светимости, а также интегрированной за год светимости, которые могут быть получены на установках ALICE и LHCb с протонным и ядерными пучками коллайдера LHC в экспериментах с фиксированными мишенями для выходов различных частиц. Проведены оценки аксептанса имеющихся детекторных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2020 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

1. Задача «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Сформулируем полученные за отчетный период результаты теоретических исследований.

 Изучена аналитическая структура высших поправок теории возмущений в современной теории сильных взаимодействий.

– Разработана новая количественная модель неупругих структурных функций протона в широкой кинематической области инвариантных масс W и переданного импульса Q, и впервые получено надежное описание наиболее полного глобального набора данных по неупругим дифференциальным сечениям.

 Проведен анализ экспериментальных данных эксперимента MARATHON с использованием теоретической модели глубоконеупругих структурных функция ядер.
 Впервые получено прецизионное измерение отношения F₂ⁿ/F₂^p в измерениях с ядрами 3H и 3He.

– Для конкретного вида метрики построен аппарат функционального интегрирования в теории квадратичной гравитации.

Было показано явным вычислением, что в нелинейной электродинамике в резонаторе – прямоугольном параллелепипеде с двумя модами накачки, третья гармоника и мода комбинированной частоты 2ω1 + ω2 не усиливаются резонансно, в то время как мода частоты 2ω1 – ω2 усиливается при определенной геометрии резонатора.

– Разработан и апробирован численный метод вычисления вероятностей множественного рождения в столкновениях частиц в главном квазиклассическом приближении, при этом метод применим для произвольных энергий и любого квазиклассически большого числа частиц в конечном состоянии.

 Показано, что в суперсимметричных моделях с легким сектором, ответственным за спонтанное нарушение суперсимметрии, электрослабый фазовый переход может быть переходом первого рода с интересными феноменологическими

следствиями, которые могут быть проверены как в ускорительных экспериментах, так и в экспериментах по поиску гравитационных волн.

 Была изучена возможность построения космологических решений в случае квадратичной гравитации основанной на геометрии Вейля. Получено несколько вариантов таких решений.

 Построены действия для возмущений в скалярно-тензорных теориях гравитации над различными типами фонов в калибровках нового типа и изучены некоторые свойства решений, сингулярных в старых калибровках.

— Показано, что любая модель асимметричной бозонной темной материи может быть модифицирована при сильных полях таким образом, что черные дыры солнечной массы могут появиться за счет трансмутации нейтронных звезд.

Результаты НИР по поиску аксионоподобных и скалярных частиц и улучшенные пределы на распад гипотетического бозона X17 и темного фотона на электронпозитронную пару, полученные в эксперименте NA64, вошли в число важнейших достижений Института в 2021 году.

Участие в международном эксперименте CMS

Работы, предусмотренные очередным этапом участия ИЯИ РАН в эксперименте CMS, выполнены в максимальном объеме, который был возможен в условиях пандемии. Этот этап в основном был связан с участием в анализе набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, дальнейшим участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий, а также с работами по модернизации адронного калориметра установки CMS, в частности, с деятельностью по модернизации фотоприемников.

Наряду с участием в физической программе на установке CMS группа ИЯИ РАН участвовала в сервисных работах групп адронного калориметра, в работах по модернизации электромагнитного и адронного калориметров, принимала активное участие в разработке и сертификации кремниевых фотоумножителей и в совершенствовании генераторов Монте-Карло для моделирования физических событий на установке CMS.

Участие в международном эксперименте NA64

Сотрудниками российских институтов – членами Сотрудничества NA64 разработана и предложена концепция эксперимента по поиску легкой темной материи на новой установке NA64 на ускорителе SPS с уровнем чувствительности, который превосходит уровень, достигнутый на сегодняшний день в экспериментах, проводимых и

планируемых в США, Японии и Италии. Проект эксперимента был подан в 2014 г. на рассмотрение в комитет SPSC CERN и получил рекомендацию по проведению в 2016-18 гг. первых измерений. Результаты этих сеансов, представленные в данном отчете и опубликованные в виде статей в журналах Physical Review Letters, Physical Review D и Physics Letters B, получили высокую оценку членов комитета SPSC в 2021 г. Комитет SPSC рекомендовал проведение следующих сеансов по набору данных в течение 2021 г. и далее. На заседании комитета Research Board CERN эта рекомендация была одобрена, также было принято решение о создании в течение 2020-2021 г. постоянной площадки на канале H4 для эксперимента NA64.

В 2021 году была осуществлена сборка примерно 70% доставленного в ЦЕРН оборудования, изготовленного по гранту ФЦП Министерства науки и высшего образования, а также успешно проведен первый сеанс на установке NA64e по поиску легкой темной материи. Накоплен большой статистический материал, анализ которого продолжается. Успешно проведен и первый сеанс на установке NA64µ по поиску легкой темной материи.

Также в 2021 году Сотрудничество NA64 провело анализ по модельнонезависимому поиску легких скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиальновекторных частиц (X), которые связаны с электронами, с использованием данных, полученных на 100-гэвном электронном пучка канала H4 ускорителя SPS. В результате были получены уникальные, наиболее строгие на данный момент ограничения на константу связи частиц a/s с электронами g_{ex} для масс X меньше 1 ГэВ. Полученные результаты опубликованы в журналах Physical Review D и Physical Review Letters.

Программа исследований расширенного эксперимента NA64, предложенная на электронном и мюонном пучках ЦЕРН на период 2021-2024 гг., получила высокую оценку комитета Physics Beyond Collider и рассматривается как одно из приоритетных направлений исследований ЦЕРН. Руководитель эксперимента NA64 С.Н. Гниненко (ИЯИ PAH) является членом рабочей группы Physics Beyond Collider.

Наблюдательные проявления сверхмассивных черных дыр

В рамках данной темы исследованы два типа изображений (теней) астрофизических черных дыр, подсвечиваемых либо удаленным ярким фоном или Проведено излучением аккрецируемой материи. численное моделирование линзированного изображения яркого пятна, движущегося вдоль оси вращения черной дыры Керра. Проведены детальные численные вычисления в метрике Керра возможных изображений черных дыр, включая изображения классических теней черных дыр, теней (силуэтов) горизонтов событий и движущихся ярких пятен в релятивистских струях от
черных дыр. Эти изображения могут быть зарегистрированы разрабатываемыми космическими интерферометрами типа отечественного Миллиметрона.

Полученные результаты послужат основой для дальнейших исследований возможных наблюдательных проявлений черных дыр, в том числе, и в рамках модифицированных теорий гравитации, отличных от общей теории относительности (ОТО). Результаты данной работы были доложены в 2021 году на нескольких российских и международных конференциях.

Исследование роли первичных черных дыр в эволюции ранней Вселенной. Теоретическое исследование взаимодействия черных дыр с темной материей

В рамках данной темы исследован комплекс задач, затрагивающих различные аспекты гипотезы рождения в ранней Вселенной ПЧД. В том числе, рассмотрена модель, согласно которой в ранней Вселенной имелись плотные кластеры ПЧД с массами отдельных ПЧД $10^{20}-10^{24}$ г и дисперсией скоростей, близкой к слабо релятивистским значениям. Если начальные массы этих кластеров заключены в интервале, 18-560 масс Солнца, то дальнейшая динамическая эволюция кластеров происходит таким образом, что несколько процентов их начальной массы могло трансформироваться в гравитационные волны при множественных слияниях ПЧД после эпохи рекомбинации. Данный механизм может дать объяснение проблеме H_0 tension.

Исследован процесс набора углового момента (спина) коллапсирующей доменной стенкой на радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной. Набор спина происходит под влиянием приливных гравитационных возмущений со стороны окружающих неоднородностей плотности в эпоху пересечения доменной стенкой космологического горизонта. Найдено, что безразмерный параметр спина может иметь малые величины $a_S < 1$ лишь для ПЧД с массами $>10^{-3}$ масс Солнца, в то время как менее массивные черные дыры получают экстремальные значения спина $a_S \sim 1$.

Рассчитан спектр гравитационных волн, генерируемых при коллапсе доменных стенок, образующихся за счет квантовых флуктуаций аксионоподобного скалярного поля на стадии инфляции. Показано, что форма спектра хорошо соответствует сигналу, наблюдаемому в проекте NANOGrav.

Показано, что выравнивание температур между нашим и зеркальным секторами происходит в течение одного времени Хаббла за счет образования микроскопических черных дыр при столкновениях высокоэнергетических частиц, если температура Вселенной была близка к многомерной массе Планка. Этот эффект исключает многомерные массы Планка, меньшие, чем температура повторного разогрева (рехитинга) Вселенной (~ 10¹³ ГэВ) в моделях с зеркальной материей.

Рассмотрены ПЧД с очень большой массой, 10^{9} - 10^{10} масс Солнца, окруженные темной материей и барионным гало при красных смещениях $z \sim 20$. Спектральное распределение и пространственное изменение яркости в линии атомарного водорода 21 см рассчитаны с использованием теории переноса излучения. Показано, что вокруг ПЧД возникает узкое и глубокое поглощение в виде сферической оболочки. Диаметр кольца 18 угловых секунд может быть разрешен радиотелескопами следующего поколения.

2. Задача «Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи»

Продемонстрирован существенный прогресс в разработке метода регистрации фотонов скрытых по одиночным электронам, эмитируемым с поверхности металлического катода мультикатодного счетчика. Разработан И изготовлен мультикатодный счетчик усовершенствованной конструкции с алюминиевым катодом и фокусирующими электродами. В измерениях получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов $(0.81 \pm 0.08) \cdot 10^{-4}$ Hz/cm². Ограничение на константу кинетического смешивания $< 1,0 \times 10^{-11}$, полученное на счетчике с алюминиевым катодов, включено в мировую компиляцию данных (Particle Data Group) по свойствам элементарных частиц. Получено новое, более сильное ограничение на константу < 6×10^{-12} . Результат доложен на 20-ой международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц и принят для публикации в журнале «Moscow University Physics Bulletin». По результатам новой серии измерений впервые получены данные суточных вариаций скорости счета одиночных электронов в солнечной и звездной системе координат. Показано, что требование симметрии кривой вариаций относительно момента 12-00 позволит существенно подавить фон от ложных событий и тем самым повысить достоверность данных в плане доказательства того, что скрытые фотоны являются действительно источником наблюдаемых вариаций. Определение момента времени, относительно которого наблюдается симметрия в солнечной или звездной системе координат, позволит также определить, в какой системе координат темная материя имеет выделенную поляризацию, и определить направление вектора поляризации. Эти результаты также включены в труды вышеупомянутой конференции. Находится в стадии сборки новый счетчик усовершенствованной конструкции. Модернизирована система сбора и обработки данных. Разработано более совершенное математическое обеспечение, которое позволит быстрее набирать статистику и осуществлять мониторинг суточных вариаций скорости счета в солнечной и звездной системе координат на широте Москвы.

3. Задача «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP»

План работ на 2021 год выполнен полностью несмотря на ковидные ограничения.

Созданный в рамках модернизации ближнего детектора ND280 нейтринного осцилляционного эксперимента T2K при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН, магнитный детектор Baby-MIND успешно отработал в сеансе №11 эксперимента T2K в марте-апреле 2021 года. Детектор Baby-MIND продемонстрировал высокую эффективность работы во время набора статистики нейтринных событий при включенном пучке. В настоящее время ведётся работа по анализу данных, полученных детектором Baby-MIND. Этот детектор в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также для ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK (с дальним детектором ГиперКамиоканде), группой ИЯИ РАН создан детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков размером 1 см с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон. Детектор SuperFGD (X: 192 см, Y: 56 см, Z: 182 см) собран в ИЯИ РАН на *лесках*, которые будут заменены на спектросмещающие оптические волокна. Работа по анализу данных, полученных при тестах прототипов SuperFGD в 2017–2018 гг. на пучках заряженных частиц ЦЕРН и на пучке нейтронов в лаборатории Лос-Аламос (США) в 2019–2020 гг., продолжается.

В 2021 г. сотрудниками ИЯИ РАН были продолжены работы в рамках подготовки эксперимента SHiP (Search for Hidden Particles) на пучке протонов ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron) Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN), начало которого планировалось на 2026–2027 гг.

Сотрудниками ИЯИ РАН была проведена НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для временно́го детектора эксперимента SHiP, основная задача которого заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. В 2021 г. было проведено тестирование с помощью космических лучей прототипа временно́го детектора SHiP, который будет использован в качестве времяпролётного ToF детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (Гипер-Камиоканде).

Эксперимент JUNO

Разработан специализированный измерительный стенд для исследования послеимпульсов фотоумножителей эксперимента JUNO для дальнейшего изучения обнаруженных в предыдущие годы послеимпульсов с аномально большими временами задержки от основного сигнала.

Разработаны измерительные стенды для исследования кремниевых фотоумножителей ближнего детектора ТАО эксперимента JUNO.

Продолжена работа по разработке калибровочной системы для ближнего детектора ТАО эксперимента JUNO.

В 2021 году сотрудники приняли участие в следующих научных мероприятиях.

- The International Conference ICRC, July 12-23, 2021, Berlin, Germany.

The Second International Workshop on X-PMTs "X-PMTs at X-mas time",
 December 30-31, 2021, Moscow, Russia, Beijing, China.

4. Задача «Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино»

План работ на 2021 год выполнен полностью. В марте-апреле 2021 года был проведен сеанс №11 эксперимента Т2К, уникальность которого заключалась в том, что большинство экспертов (в том числе и сотрудники ИЯИ РАН) участвовали в сменах в удаленном режиме через интернет. В сеансе №11 были накоплены данные, соответствующие интегральному потоку 1,78 × 10²⁰ протонов на мишени (РОТ), максимальная мощность пучка достигала 512 кВт.

В эксперименте Т2К продолжается осцилляционный анализ данных, накопленных в 2010–2021 гг. с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино (сеансы №№1-11). Предварительный анализ данных, накопленных в сеансах №№1-10 (интегральный поток $3,60 \times 10^{21}$ POT), показал небольшое предпочтение верхнему октанту угла смешивания θ_{23} (sin² θ_{23} >0,5) и нормальной иерархии масс (Δm_{32}^2 >0).

Предварительно получено, что наиболее вероятное значение CP нечетной фазы δ_{CP} близко к максимальному CP нарушению ($\delta_{CP} \approx -\pi/2$), а CP сохранение ($\delta_{CP} = 0, \pm \pi$) исключается на уровне достоверности 90% (при этом значения $\delta_{CP} = \pm \pi$ находятся на границе значимости 2σ).

В 2021 году в эксперименте Т2К продолжены работы по поиску *стерильных* нейтрино и частиц темной материи, не участвующих в слабых взаимодействиях. В рамках

этих работ было продолжено исследование возможных фоновых процессов в ближнем детекторе ND280 и методов их подавления, моделирование эффективности регистрации сигнальных и фоновых событий, ведется разработка программного обеспечения для реконструкции событий и изучение теоретических предсказаний масс и других параметров возможных кандидатов в стерильные нейтрино и частицы темной материи.

5. Задача «Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В 2021 году был опубликован новый результат по измерению распада $K^+ \rightarrow \pi^+ vv$. Удалось значительно снизить фон до уровня 10⁻⁸ при сохранении высокой эффективности регистрации сигнала. Измеренная величина вероятности распада = $(10,6^{-3,4}_{+4,0}(\text{stat}) \pm 0,9$ (syst))×10⁻¹¹ для 68% доверительного интервала. Статистическая значимость измеренного распада составила 3,4 σ . Стандартная модель предсказывает величину вероятности этого распада (8,4 ± 1,0)×10⁻¹¹.

Эксперимент NA62 возобновил набор данных в 2021 году после длительного перерыва (LHC LS2). Сеанс набора данных продолжался с 12 июля по 14 ноября, что составляет примерно 50% от продолжительности набора данных в 2018 году. В 2021 году интенсивность пучка каонов была 75% от номинальной (примерно на 10% выше, чем в 2018 году). Из-за проблем с ускорителем SPS (и качеством выдаваемого им пучка), который обеспечивает протонами эксперименты в северной части ЦЕРНа (North Area), эффективный набор данных составляет меньшее время. Предварительная оценка показывает, что ожидаемое число $K+ \rightarrow \pi+ \nu \nu$ событий для данных 2021 года (при вероятности распада, равной вероятности в Стандартной модели) составляет 2-3. Однако, более точную оценку можно будет получить после окончательной реконструкции данных 2021 года и более точного понимания неэффективности детекторов, из-за присутствия новых детекторов, неиспользующихся в 2016-2018гг, ожидается уменьшение фона примерно в 5 раз.

В рамках того же каонного эксперимента NA62 был проведён поиск и других, экзотических, мод распада, чувствительных к новой физике за рамками Стандартной Модели и к СР и Т нечётным эффектам. Кроме того, в рамках каонного эксперимента NA62 был продолжен поиск невидимых «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также аксионо-подобных частиц. Эти исследования привели к получению верхних границ констант взаимодействия, значения которых не хуже полученных в других экспериментах. Были получены новые ограничения на элемент матрицы смешивания между тяжелым и мюонным нейтрино (сравнимые с текущими, однако расширеные в область высоких масс), улучшение в 2,5 раза текущего ограничения на вероятность распада $K+\rightarrow \mu+\nu \nu \nu$, первые в мире ограничения на вероятность распада $K+\rightarrow \mu+\nu \nu$ х, где Х-скалярная или векторная частица в диапазоне масс 10-370 МэВ. Были улучшены в 10 раз ограничения на вероятности запрещенных в Стандартной модели распадов $K+\rightarrow \pi^- \mu+ e+$, $K+\rightarrow \pi+ \mu^- e+ u \pi^0 \rightarrow \mu^- e+$. Примерно в 60 раз было улучшено модельно-независимое ограничение на вероятность распада $K+\rightarrow\pi+X$ в области масс X 110-150 МэВ.

В каонном эксперименте ОКА (ИФВЭ, Протвино) проведен анализ данных с целью измерения вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$, измерена вероятность распада и сравнение с предсказанием киральной пертурбативной теории ChPT O(p4). Измеренная вероятность этого распада составила величину $R = (0,587 \pm 0,010 \pm 0,015) \times 10^{-2}$. Полученный результат находится в хорошем согласии с вероятностью распада, полученной в киральной пертурбативной теории ChPT O(p4) $R = (0,592 \pm 0,005) \times 10^{-2}$. Измерение этого распада является хорошим тестом эффектов за рамками ChPT.

В эксперименте ОКА была измерена Т-нечетная корреляция в распаде распаде K+ $\rightarrow \pi^0 \text{ e+ } \nu \gamma$ на основе анализа 54000 событий, накопленных в эксперименте ОКА. Из измеренной величины Т-нечетной асимметрии A = (-0,033 ± 0,429(stat.) ± 0,117(syst.)) × 10⁻² получен верхний предел |A| < 0,0078 для доверительного интервала 90%.

6. Задача «Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов»

Представлены результаты анализа спектров событий, обусловленных взаимодействием мюонных нейтрино и антинейтрино. Определены наиболее вероятные значения параметров осцилляций нейтрино и получены ограничения на значения фазы нарушения СР-инвариантности. Полученные результаты показывают предпочтения в отношении сохранения СР-инвариантности, по сравнению с ее нарушением. Кроме того, показано, что никаких свидетельств о переходе активных антинейтрино в стерильные не наблюдалось. В итоге впервые были получены доверительные интервалы для смешивания стерильных антинейтрино. Получены ограничения на флюенс от нейтрино всех ароматов от Сверхновых с разными массами. 7. Задача «Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс»

Подготовка и проведение лабораторных измерений с целью поиска стерильных нейтрино с массой в диапазоне от 0 до 6 кэВ

Проведен первый полноценный сеанс измерений спектра бета-электронов от распадов трития в диапазоне энергий 12-18,5 кэВ с использованием нового детектора, новой системой электроники и программного обеспечения. Начата обработка данных.

 В ходе сеанса проведены дополнительные калибровки детектора
 электронами с энергией от 4 до 20 кэВ, которые позволят более детально исследовать свойства такого типа детекторов.

– Завершен и опубликован анализ данных по результатам очистки спектрометра от загрязнения тритием. Полученный опыт очистки малых количеств трития является крайне важным для ядерной промышленности и других отраслей, связанных с использованием трития.

 Установлен, испытан и откалиброван новый тип кремниевого детектора с рекордным энергетическим разрешением. Изготовлена и испытана система ввода детектора в объем спектрометра в реальных условиях глубокого вакуума.

Разработан полный пакет программ разного уровня для управления, работы,
 сбора информации и её контроля в режиме реального времени.

Проведены работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования.

 Проведен комплекс технических и закупочных мероприятий для подготовки системы ожижения гелия для комплексного технического обслуживания с заменой всех элементов, выработавших ресурс.

8. Задача «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

 Проведено 2 сеанса на установке КАТРИН. Результаты обрабатываются и в начале 2022г. будут представлены результаты совместной обработки первого и второго из общего списка.

2. Проводились исследования по подавлению «дополнительного фона» на установке КАТРИН с целью улучшения чувствительности к массе электронного антинейтрино.

3. Разработаны планы модернизации стенда исследования новых детекторов в ИЯИ РАН.

9. Поиск 2К-захвата в Хе-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

Поиск 2К-захвата в Хе-124

Был использован новый метод коррекции энерговыделения для многокластерной ионизации в МПС. Для этого детектор непрерывно калибровался в течение нескольких тысяч часов от внешнего коллимированного источника Cd-109, заполненного как криптоном, так и ксеноном. Используя этот метод, можно спрогнозировать увеличение чувствительности к 2v2K-распаду в Xe-124 уровне на $2 \cdot 10^{22}$ лет, после шести лет набора данных. Используя полученные данные, была подготовлена презентация на конференции TAUP2021 - "Recent advancements of the experiment to search for 2K-capture in Xe-124 using a Large Low-background Proportional Counter". По результатам доклада был подготовлена публикация в журнал *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)* (находится на стадии публикации), arXiv:2110.02932v1.

Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

В 2021 году продолжился набор статистики на этапе AMoRE-I, на данный момент чистое время измерения составляет больше 8000 часов. Планируется, что набор данных в фазе AMoRE-I продлиться не менее трех. Был проведен глубокий анализ данных этапа AMoRE-pilot, что позволило улучшить ограничение на период полураспада для безнейтринного бета-распада Mo-100 с $T_{1/2}^{0\nu} > 9.5 \cdot 10^{22}$ лет до $T_{1/2}^{0\nu} > 3,43 \cdot 10^{23}$ лет. Результаты работы были доложены на конференции TAUP-2021 в докладе – «Status of AMoRE». Также был проанализирован вклад в область интересов эксперимента (3034,4±4 кэВ) от поверхностного загрязнения кристалла, и от материалов, окружающих кристаллы. В результате анализа было получено, что усреднённый уровень фона, для поверхностного загрязнения, в области интересов эксперимента (3034,4±4 кэВ) составляет (2,22 ± 0,03) · 10^{-2} соб./кэВ/кг/год, что выше требуемого значения для этапа AMoRE-II. По результатам работ был подготовлена публикация в журнал Eur.Phys.J. C (находится на стадии публикации).

10. Задача «Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA»

План работ на 2021 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

Эксперименты GERDA и LEGEND

Учёные из ИЯИ РАН в 2021 году участвовали в экспериментах GERDA и LEGEND, расположенных в LNGS INFN. В рамках экспериментах GERDA продолжен анализ экспериментального материала, полученного за предыдущие годы, и проведены исследования новых ⁷⁶Ge детекторов, подготовлены и опубликованы 2 статьи в журналах из базы WoS.

В рамках эксперимента LEGEND продолжалась подготовка к началу работы эксперимента LEGEND-200. Подготовлено предложение для эксперимента LEGEND-1000 и послан запрос на его финансирования в ведомства США и Европы. Российские учёные дистанционно участвовали в работе рабочих групп, рабочих совещаниях обоих экспериментов и конференциях, на которых были представлены результаты коллабораций.

Эксперимент Double Chooz

В 2020 году проводился анализ данных, полученных в эксперименте Double Chooz в 2015-2017 годах. Был применен новый метод анализа данных по использованию измерений на разных уровнях мощности ядерного реактора (RRM). Получено новое значение угла смешивания нейтрино: $\sin^2 2\theta_{13} = 0,095 \pm 0,015$.

Был сделан анализ на возможные осцилляции в стерильное состояние. Получено ограничение на параметры осцилляций в четвертое состояние нейтрино.

Впервые измерен спектр антинейтрино долгоживущих осколков в эксперименте с реакторными антинейтрино. На 20 дней были остановлены оба реактора, и вместе с ожидаемыми фонами от быстрых нейтронов, ⁹Li и случайных совпадений наблюдался избыточный счет в области 1-3 МэВ, где находятся спектры дочерних изотопов долгоживущих осколков.

Было измерено с высокой точностью сечение реакции обратного бета-распада. $\langle \sigma_f \rangle$ = (5,71 ± 0,06) × 10⁻⁴³ см²/деление, что соответствует составу активной зоны по числу делений изотопов: ²³⁵U – 52,0%, ²³⁸U – 8,7%, ²³⁹Pu – 33,3%, ²⁴¹Pu – 6,0%. Полученная точность 0,97% является лучшей в мире к настоящему времени и превысила наиболее точное измерение сечения реакции обратного бета-распада в эксперименте Bugey-3 (1,4%) выполненное в 1995 году [59].

11. Задача «Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо»

План работ на 2021 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задаче 1 вошли в число важнейших достижений Института в 2021 году.

1. Изучение свойств потока атмосферных мюонов, нейтронов, и фона естественной радиоактивности в подземных экспериментах

Более высокая амплитуда сезонных вариаций космогенных нейтронов по сравнению с амплитудой вариаций интенсивности мюонов была обнаружена в двух подземных экспериментах. Зависимость $N_n \propto \overline{E}_{\mu}^{0,78}$ связывает вариации нейтронов с вариациями средней энергии мюонов. Отсюда следует, что температурный эффект, влияющий на генерацию мюонов, изменяет не только их интенсивность, но и среднюю энергию. Сезонные вариации средней энергии атмосферных мюонов являются новым эффектом в мюонной физике.

Приближение ступенчатого спектра LVD-мюонов под землей позволяет при исследовании механизма вариаций перейти от вариаций средней энергии мюонов под землей к вариациям энергии «ступеньки». Рассмотрение вариаций энергетического диапазона мюонов на пути от слоя генерации в атмосфере до глубины 3,1 км в.э. в рамках приближения ступенчатого спектра LVD-мюонов под землей приводит к заключению, что вариации средней энергии мюонов определяются вариациями критической энергии для пионов. В результате этого диапазон генерации мюонов варьируется с амплитудой 5,3% с последующим увеличением вариаций до 10% в результате прохождения мюонами слоя грунта 3,1 км в.э.

Сезонные изменения потока нейтронов, ввиду их заметной величины, необходимо учитывать при измерении выхода нейтронов. Температура атмосферы, помимо сезонных модуляций, в течение года испытывает нерегулярные изменения. В результате число нейтронов, образуемых мюонами под землей, значительно отклоняется от среднегодовой величины и гармонической функции с нарушением постоянства амплитуды модуляций и фазы колебаний. Это следует учитывать при анализе фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Фон естественной радиоактивности, в основном радона, тоже варьируется сезонно – долговременные вариации и испытывает внезапные суточные изменения. На суточные изменения концентрации радона влияют геофизические, техногенные факторы и сейсмическая активность, что приводит к ускоренному высвобождению Rn из почвы (особенно в условиях осадочных пород).

Наши измерения показывают, что фон нейтринного детектора в разных диапазонах энергий чувствителен к различным эффектам, связанным с выделением радона. Необходимо дальнейшее изучение взаимосвязи этих эффектов с привлечением сейсмических станций и инструментов, таких как, например, лидар [65] для изучения

предвестников землетрясений. Совместное исследование различных технологий может дать шанс для разработки новых алгоритмов прогноза землетрясений.

2. Подготовка эксперимента NEWSdm по прямому обнаружению частиц темной материи с помощью мелкозернистых эмульсий.

Определение природы темной материи и экспериментальная регистрация ее частиц – одна из важнейших задач современной экспериментальной физики. NEWSdm – новый международный эксперимент с твердотельной мишенью для прямой регистрации частиц темной материи. Эксперимент NEWSdm направлен на поиск взаимодействий так называемых частиц WIMP с частицами обычной материи в ядерных эмульсиях. Чтобы минимизировать все факторы, приводящие к фоновому образованию и накоплению (воздействию космического излучения, тепловому возбуждению) и минимизировать время образования вуали, процесс синтеза и полива наноразмерной эмульсии осуществляется непосредственно в подземной лаборатории Гран-Сассо. На данном этапе реализации проекта группой ИЯИ РАН проводится моделирование фона эксперимента – нейтронов и гамма-квантов от радиоактивности грунта.

12. Задача «Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Основные результаты исследований за 2021 год.

1. Подтверждено наблюдение дважды очарованного тетракварка, T_{cc}⁺, после обработки расширенного набора данных.

2. Достигнута беспрецедентная точность измерения параметров осцилляций $D^0 - D^0$, измерена разность масс 6.4×10^{-6} eV.

3. Выполнен тест лептонной универсальности. Обнаружено отклонение от предсказания Стандартной Модели на уровне достоверности 3 сигма.

4. Разработана детальная программа физических исследований с использованием фиксированной мишени на коллайдере LHC. Подготовлен проект экспериментов с фиксированными мишенями для установки ALICE и LHCb.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Goriachuk I.O. The MS-scheme αs5 QCD contributions to the Adler function and Bjorken polarized sum rule in the Crewther-type two-fold beta-expanded representation / I. O. Goriachuk, A. L. Kataev, V. S. Molokoedov // arXiv:2111.12060.

Kopchinskii I. Resonant generation of electromagnetic modes in nonlinear electrodynamics: Classical approach / I. Kopchinskii, P. Satunin // Phys. Rev. A – 2022. – V. 105 – P. 013508.

3. Lobasev V.M., Spivak P.E. Nucl. Instr. Meth. A – 1985.– V. 240. – P. 305.

4. Lobasev V.M. Nuclear Physics A. – 2003. – V. 719. – P. 153-160.

5. https://arxiv.org/abs/hep-ex/0109033v1.

6. http://www.katrin.kit.edu/.

7. Improved Upper Limit on the Neutrino Mass from a Direct Kinematic Method by KATRIN. / M. Aker [et. al.] // Phys. Rev. Lett. – 2019. – 123. – 221802.

8. Status of the HOLMES Experiment to Directly Measure the Neutrino Mass. / A. Nucciotti [et. al.] // https://arxiv.org/abs/1807.09269.

9. Зельдович Я.Б. Гипотеза задержавшихся в расширении ядер и горячая космологическая модель. / Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков // Астрономический журнал. – 1966. – – Т. 43. – С. 758-760.

Rubin S.G. Primordial Black Holes from Non-Equilibrium Second Order Phase
 Transition. / S.G. Rubin, M.Yu. Khlopov, A.S. Sakharov //Gravitation and Cosmology./ – 2000.
 V. S6. – P. 51.

11. Gianfranco Bertone. A new Era in the Quest for Dark Matter. / Gianfranco Bertone and Tim M.P. Tait // arXiv:1810.01668.

12. An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from 'Troitsk nu-mass' data. / A.I. Belesev [et al.] // JETP Lett. – 2013. – V.97. – P. 67. [arXiv:1211.7193].

 First measurements in search for keV sterile neutrino in tritium beta-decay in the Troitsk nu-mass experiment. / D.A. Abdurashitov [et al.] // JETP Letter – 2017. – V. 105 – P.
 753. [arXiv:1703.10779].

14. https://www.kip.uni-heidelberg.de/echo/.

15. Relativistic cyclotron radiation detection of tritium decay electrons as a new technique for measuring the neutrino mass. / B. Monreal, J.A. Formaggio // Phys. Rev D. -2009. - V/80. - P.051301.

16. http://www.project8.org/.

17. First direct neutrino-mass measurement with sub-eV sensitivity. / M. Aker [et. al.] // https://arxiv.org/abs/2105.08533.

18. Sensitivity of Next-Generation Tritium Beta-Decay Experiments for keV-Scale Sterile Neutrinos. / S. Mertens [et. al.] // http://arxiv.org/abs/1409.0920.

19. Bound on 3+1 Active-Sterile Neutrino Mixing from the First Four-Week Science Run of KATRIN. / M. Aker [et. al.] // Phys. Rev. Lett. – 2021. – V. 126. – 091803.

20. Modeling and measurement of Rydberg-State mediated Background at the KATRIN Main Spectrometer. / https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000090450.

21. Серебров А.П. Анализ результатов эксперимента нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино и сравнение с результатами других экспериментов / Серебров А.П., Самойлов Р.М. // Письма ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112, № 3-4 – С. 211-225.

22. Mikelyan L. Neutrino Oscillations at Reactors: What Is Next? / L. Mikelyan and V. Sinev // Physics of Atomic Nuclei. – 2000. – V.63, № 6. – P. 1002. arXiv:hep-ex/9908047.

23. Indication for the disappearance of reactor electron antineutrinos in the Double Chooz experiment. / Y. Abe [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V.108. – P. 131801. arXiv:1112.6353 [hep-ex].

24. Bari G., Bazile M., Bruni G. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. – 1988. – V. 264. – P. 5.

25. Агафонова Н.Ю., Алексеев В.А., Добрынина Е.А. и др. // Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН, 2001.

26. The detection of neutrino interaction in the emulsion/lead target of the OPERA experiment. /N Agafonova [et al.] // JINST – 2009. - 4. - P06020.

27. Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions /N. Agafonova [et al.]//, arXiv:1705.00613.

28. Belokurov V. Path Integrals in Quadratic Gravity / V. Belokurov, E. T. Shavgulidze // ArXiv:2110.06041.

29. Kulagin S.A. A hybrid model of the proton structure functions / S.A. Kulagin, V.V. Barinov // arXiv: 2103.00158.

30. 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 / D. Abrams [et al.] // arXiv: 2104.05850.

 Демидов С.В. Численное исследование многочастичного рождения в теории φ⁴: сравнение с аналитическими результатами / С.В. Демидов, Д.Г. Левков, Б.Р. Фархтдинов // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 114, вып. 11. – С. 723 – 726.

32. Demidov S. Gravitational waves from first-order electroweak phase transition in a model with light sgoldstinos / S. Demidov D. Gorbunov, E. Kriukova // arXiv: 2112.06083 [hep-ph].

33. Gorbunov D. Constraints on light scalars from PS191 results / Dmitry Gorbunov,
Igor Krasnov, Sergey Suvorov // Phys. Lett. B 820. – 2021. – P. 136524. arXiv: 2105.11102
[hep-ph].

34. Double-hit signature of millicharged particles in 3D / Dmitry Gorbunov [et al.] // Phys. Lett. B 822. – 2021. – P. 136641, arXiv: 2103.11814 [hep-ph].

35. Raghuveer Garani. Solar mass black holes from neutron stars and bosonic dark matter / Raghuveer Garani, Dmitry Levkov, Peter Tinyakov //arXiv: arXiv: 2112.09716.

36. On the cosmological solutions in Weyl geometry / Victor A. Berezin [et al.] // JCAP - 2021. - 11. - 053.

37. The local-filament pattern in the anomalous transparency of the Universe for energetic gamma rays / S.Troitsky [et al.] // The European physical journal C. -2021. -81, No 3. -264.

38. Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars / A.V. Plavin [et al.] // Astrophys. J. -2021. -908. -2. -157.

39. Troitsky S.V. K^0 and K^+ -meson electromagnetic form factors: A nonperturbative relativistic quark model versus experimental, perturbative, and lattice quantum-chromodynamics results / S.V. Troitsky, V.E. Troitsky // Phys. Rev. D. – 2021. – V. 104. – P. 034015.

40. PeV Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries / A.M. Bykov [et al.] // Astrophys. J. Lett. – 2021. – 921. – 1. – L10.

41. Sergey Troitsky. Constraints on models of the origin of high-energy astrophysical neutrinos // Usp. Fiz. Nauk – 2021. –191. –12. – P. 1333-1360.

42. Conceptual design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory / A. Abeln [et al.] // JHEP -2021. -05. -137.

43. Rubin S.G. Primordial Black Holes from Non-Equilibrium Second Order Phase
Transition. / S.G. Rubin, M.Yu. Khlopov, A.S. Sakharov //Gravitation and Cosmology./ – 2000.
– V. S6. – P. 51.

44. The NA64 Collaboration. Constraints on New Physics in Electron g - 2 from a Search for Invisible Decays // Phys. Rev. Lett. -2021. - Vol.126. - P. 211802.

45. Berezhiani Z. Reconciling Planck results with low redshift astronomical measurements. / Z. Berezhiani, A.D. Dolgov, I.I. Tkachev // Physical Review D. – 2015. – V. 92. – P. 061303.

46. Kopylov A.V. A multi-cathode counter in a single-electron counting mode / Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. // NIM A – 2018 – V.910 – P. 164.

47. Kopylov A.V. Method of Search for Hidden Photons of Cold Dark Matter Using a Multi-Cathode Counter / Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – V.82, №.9. – pp.1-8.

48. Kopylov A. Results from a hidden photon dark matter search using a multicathode counter. / A.Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov // JCAP. – 2019. – V.07. – P. 008.

49. Zyla A.[et al.] // Prog. Theor. Exp. Phys. – 2020. – 083C01.

50. Kopylov A. On the possibility of observing diurnal variations in the count rate of dark photons using a multicathode counters. / A. Kopylov, I. Orekhov, V. Petukhov // Physics of Particles and Nuclei – 2021. - Vol.52, No.1. - pp. 31 - 38.

51. Kopylov A.V. Diurnal variations of the count rate from dark photons in PHELEX. / Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. // arXiv://2111.04990(1).

52. Axion search with BabyIAXO in view of IAXO. / A. Abeln [et al.] // PoS ICHEP2020 – 2021. – P.631. Contribution to ICHEP.

53. http://femto.com.ua/articles/part_2/3451.html.

54. High-resolution spectroscopy of gaseous ^{83m}Kr conversion electrons with the KATRIN experiment. / Altenmüller K [et al.] // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – 2020. – V. 47, №6. doi: 10.1088/1361-6471/ab8480.

55. Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double-β Decay GERDA collaboration./ M. Agostini [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2020. – V.125. – P. 252502. DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.252502. arXiv:2009.06079v1 [nucl-ex].

56. Characterization of inverted coaxial 76Ge detectors in GERDA for future double- β decay experiments. GERDA Collaboration./ M. Agostini [et al.] // Eur.Phys.J.C – 2021. – V.81. – P. 505. e-Print: 2103.15111 [physics.ins-det].

57. Calibration of the Gerda experiment GERDA Collaboration./ M. Agostini [et al.] // Eur.Phys.J.C – 2021. – V.81, №8. – P. 682. e-Print: 2103.13777 [physics.ins-det].

58. The Large Enriched Germanium Experiment for Neutrino less $\beta\beta$ Decay : LEGEND-1000 Preconceptual Design Report LEGEND Collaboration. / N. Abgrall [et al.] // LEGEND-1000 Preconceptual Design Report LEGEND Collaboration. – 2021. – e-Print: 2107.11462 [physics.ins-det].

59. Bugey3 Collab. / Declais Y. [et al.] // Nucl. Phys. B – 1995. – V.434. – P. 503 (1995).

60. High statistics measurement of the underground muon pair separation at Gran Sasso./M. Ambrosio [et al.] // Phys.Rev. D. – 1999. –Vol. 60. – P. 032001.

61. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – 2006. – v. 33. – p. 1232.

62. Кудрявцев В.А. Дисс.кан. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН (Москва, 1998) 118 с.

63. Бугаев Э.В. Космические мюоны и нейтрино / Э.В. Бугаев, Ю.Д. Котов, И.Л.
Розенталь. // Атомиздат, Москва. – 1970 – стр. 320.

64. Мальгин А.С. Дисс. докт. физ.-матем. наук, ИЯИ РАН, Москва (2018).

65. Pershin S.M. [et al.] // Monitor. Sci. Technol. – 2010. – 3. – 6.

66. Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark. / Roel Aaij [et al.] // arXiv:2109.01038.

67. Observation of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates. / Roel Aaij [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2021. – V.127. – P. 111801. arXiv:2106.03744

68. Test of lepton universality in beauty-quark decays. / Roel Aaij [et al.] // arXiv:2103.11769.

69. A fixed-target programme at the LHC: Physics case and projected performances for heavy-ion, hadron, spin and astroparticle studies. / C. Hadjidakis [et al.] // Physics Reports. – 2021. – V.911. – P. 1–83.

70. LHC fixed target experiments: Report from the LHC Fixed Target working group of the CERN Physics Beyond Collider Forum. / C. Barschel [et al.] // CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2020-004, Published by CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Публикации по задаче «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели»

1. I. O. Goriachuk. The MS-scheme α_s^5 QCD contributions to the Adler function and Bjorken polarized sum rule in the Crewther-type two-fold beta-expanded representation / I. O. Goriachuk, A. L. Kataev, V. S. Molokoedov // arXiv:2111.12060.

I. Kopchinskii. Resonant generation of electromagnetic modes in nonlinear electrodynamics: Classical approach / I. Kopchinskii, P. Satunin // Phys. Rev. A – 2022. – V. 105 – P. 013508

3. V. Belokurov. Path Integrals in Quadratic Gravity / V. Belokurov, E. T. Shavgulidze // ArXiv:2110.06041.

S.A. Kulagin. A hybrid model of the proton structure functions / S.A. Kulagin,
 V.V. Barinov // arXiv: 2103.00158.

5. Measurement of the Nucleon F₂ⁿ/F₂^p Structure Function Ratio by the Jefferson Lab MARATHON Tritium/Helium-3 Deep Inelastic Scattering Experiment / D. Abrams [et al.] // arXiv: 2104.05850.

 С.В. Демидов. Численное исследование многочастичного рождения в теории φ⁴: сравнение с аналитическими результатами / С.В. Демидов, Д.Г. Левков, Б.Р. Фархтдинов // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 114, вып. 11. – С. 723 – 726.

7. S. Demidov. Gravitational waves from first-order electroweak phase transition in a model with light sgoldstinos / S. Demidov D. Gorbunov, E. Kriukova // arXiv: 2112.06083 [hep-ph].

D. Gorbunov. Constraints on light scalars from PS191 results / Dmitry Gorbunov,
 Igor Krasnov, Sergey Suvorov // Phys. Lett. B 820. – 2021. – P. 136524. arXiv: 2105.11102
 [hep-ph].

9. Double-hit signature of millicharged particles in 3D / Dmitry Gorbunov [et al.] // Phys. Lett. B 822. – 2021. – P. 136641, arXiv: 2103.11814 [hep-ph].

10. Raghuveer Garani. Solar mass black holes from neutron stars and bosonic dark matter / Raghuveer Garani, Dmitry Levkov, Peter Tinyakov //arXiv: arXiv: 2112.09716.

11. On the cosmological solutions in Weyl geometry / Victor A. Berezin [et al.] // JCAP - 2021. - 11. - 053.

12. The local-filament pattern in the anomalous transparency of the Universe for energetic gamma rays / S.Troitsky [et al.] // The European physical journal C. -2021. -81, $N_{2} 3. -264$.

13. Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars / A.V. Plavin [et al.] // Astrophys. J. -2021. -908. -2. -157.

14. S.V. Troitsky. K^0 and K^+ -meson electromagnetic form factors: A nonperturbative relativistic quark model versus experimental, perturbative, and lattice quantum-chromodynamics results / S.V. Troitsky, V.E. Troitsky // Phys. Rev. D. – 2021. – V. 104. – P. 034015.

15. PeV Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries / A.M. Bykov [et al.] // Astrophys. J. Lett. – 2021. – 921. – 1. – L10.

16. Sergey Troitsky. Constraints on models of the origin of high-energy astrophysical neutrinos // Usp. Fiz. Nauk – 2021. –191. –12. – P. 1333-1360.

17. Conceptual design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory / A. Abeln [et al.] // JHEP - 2021. - 05. - 137.

Эксперимент СМS

18. Observation of tW production in the single-lepton channel in pp collisions at \sqrt{s} = 13 TeV. / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // JHEP. – 2021. – Vol.11. – P.111. DOI: 10.1007/JHEP11(2021)111.

19. Measurement of differential $t\bar{t}$ production cross sections in the full kinematic range using lepton+jets events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Rev.D. – 2021. – Vol.104, No.9. – P.092013. DOI:10.1103/PhysRevD.104.092013.

20. Combined searches for the production of supersymmetric top quark partners in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Eur.Phys.J.C. – 2021. – Vol.81, No.11. – P.970. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09721-5.

21. Measurements of the Electroweak Diboson Production Cross Sections in Proton-Proton Collisions at s=5,02 TeV Using Leptonic Decays. / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Rev.Lett. – 2021. – Vol.127,No.19. – P.191801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.191801.

22. Measurement of the electroweak production of Z\$\gamma\$ and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV and constraints on anomalous quartic gauge couplings. / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Rev.D. – 2021. – Vol.104. – P.72001. DOI:10.1103/PhysRevD.104.072001.

23. Search for a heavy Higgs boson decaying into two lighter Higgs bosons in the ττbb final state at 13 TeV. / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // JHEP. – 2021. – Vol.11. – P.57. DOI:10.1007/JHEP11(2021)057.

24. Study of Z boson plus jets events using variables sensitive to double-parton scattering in pp collisions at 13 TeV. / Tumasyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // JHEP. – 2021. – Vol.10. – P.176. DOI:10.1007/JHEP10(2021)176.

25. Search for lepton-flavor violating decays of the Higgs boson in the $\mu\tau$ and $e\tau$ final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. / Sirunyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Rev.D. – 2021. – Vol.104, No.3. – P.032013. DOI: 10.1103/PhysRevD.104.032013.

26. Search for a heavy resonance decaying to a top quark and a W boson at $\sqrt{s} = 13$ TeV in the fully hadronic final state. / Sirunyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // JHEP. – 2021. – Vol.12. – P.106. DOI:10.1007/JHEP12(2021)106.

27. Constraints on anomalous Higgs boson couplings to vector bosons and fermions in its production and decay using the four-lepton final state. / Sirunyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Rev.D. – 2021. – Vol.104, No.5. – P.052004. DOI: 10.1103/PhysRevD.104.052004.

28. Search for W' bosons decaying to a top and a bottom quark at s=13TeV in the hadronic final state. / Sirunyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Lett.B. – 2021. – Vol.820. – P.136535. DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136535.

29. Search for charged Higgs bosons produced in vector boson fusion processes and decaying into vector boson pairs in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. / Sirunyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Eur.Phys.J.C. – 2021. – Vol.81, No.8. – P.723. DOI:10.1140/epjc/s10052-021-09472-3.

30. Constraints on the Initial State of Pb-Pb Collisions via Measurements of \$Z\$-Boson Yields and Azimuthal Anisotropy at $\sqrt{s_{NN}} =5,02$ TeV. / Sirunyan A. [et al.] (CMS Collaboration). // Phys.Rev.Lett. – 2021. – Vol.127, No.10. – P.102002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.102002.

Доклады

31. Integration of mini TECs on the CMS MTD barrel timing layer 16 ch SiPM array to reduce the DCR after very high irradiation./ A. Heering [et al.] // Международная конференция "CPAD Instrumentation Frontier Workshop 2021" (CPAD-2021), CFNS, Stony Brook University, USA, 18-22 марта 2021 года https://indico.fnal.gov/event/46746/

Эксперимент NA64

32. The NA64 Collaboration. Constraints on New Physics in Electron g - 2 from a Search for Invisible Decays // Phys. Rev. Lett. -2021. - Vol.126. - P. 211802.

33. The NA64 Collaboration. Improved exclusion limit for light dark matter from e^+e^- annihilation in NA64 // Phys. Rev. D. – 2021. – Vol.104. – P.L091701.

34. The NA64 Collaboration. Search for pseudoscalar bosons decaying into e^+e^- pairs // Accepted for publication in Phys. Rev. D. – 2021.

35. The NA64 Collaboration. Probing the explanation of the muon (g-2) anomaly and thermal light dark matter with the semi-visible dark photon channel // Eur. Phys. J. C. -2021. - Vol.81. - P.959.

36. Probing hidden sectors with a muon beam: Total and differential cross sections for vector boson production in muon bremsstrahlung. / Kirpichnikov D.V. [et al.] // Phys. Rev. D. – 2021. Vol.104. – P.176012.

37. Gninenko S.N. Refining constraints from Borexino measurements on a light Z'boson coupled to L_{μ} - L_{τ} current. / Gninenko S.N., Gorbunov D.S. // Phys. Lett. B. – 2021. – Vol.823. – P.136739.

38. Fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments. / Bondi M. [et al.] // Computer Physics Communications. – 2021. – Vol.269. – P.108129.

 Сниненко С.Н. Поиск легкой темной материи в эксперименте NA64. / Гниненко С.Н., Красников Н.В., Матвеев В.А. // Успехи Физических Наук. – 2021. - Т.191. – С.1361-1386.

40. The NA64 Collaboration. Status Report to SPSC 2021 // CERN-SPSC-2021-016 / SPSC-SR-291.

Доклады

41. D.V. Kirpichnikov. Goals of NA64++ // FIP Physics Centre: Meeting with experiments. June 23, 2021 Zurich, Switzerland

42. D. Kirpichnikov. Recent results from the NA64 experiment at CERN SPS // The 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. August 19-25, 2021 Moscow, Russia

43. D.V. Kirpichnikov. Status and plans of NA64++ // PBC BSM working group meeting. October 20, 2021 Zurich, Switzerland

44. D. Kirpichnikov. New ideas for NA64++ // Physics Beyond Colliders General Working Group meeting. December 3, 2021 Zurich, Switzerland

45. S.N. Gninenko. NA64 Progress and Plans // Physics Beyond Colliders International Workshop. 1-4 March, 2021 CERN, Switzerland

2. Публикации по задаче «Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи»

1. A. Kopylov. Present Status of the Experiment on the Search for Dark Photons by a Multi-Cathode Counter. / A.Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol.84, No. 6 – pp 860-865.

2. A. Kopylov. On the possibility of observing diurnal variations in the count rate of dark photons using a multicathode counters. / A.Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov // Physics of Particles and Nuclei. – 2021. – Vol.52, No.1. – pp. 31 – 38.

3. A. Kopylov. First results and future prospects with PHELEX. / A.Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov // Journal of Physics, Conference Series. – 2020. – V. 1690 – P. 012002. doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012002.

4. A. Kopylov. Results from a hidden photon dark matter search using a multicathode counter. / A. Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov // JCAP, 07, 008 (2019)

3. Публикации по задаче «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP»

1.M. Khabibullin. 3D segmented plastic scintillator neutrino detector for T2Kexperiment // Докл. М/н конференция XIX International Workshop on Neutrino Telescopes,18–26February2021,Online-2021.https://agenda.infn.it/event/24250/contributions/129776/.

 A 4π time-of-flight detector for the ND280/T2K upgrade / A. Korzenev [et al.]. // Электронный препринт. – 2021. – https://arxiv.org/abs/2109.03078 [physics.ins-det].

3. Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles / C. Ahdida [et al.]. // Eur.Phys.J. – 2021. – C81 – №5 – P.481.

4. Sensitivity of the SHiP experiment to light dark matter / C. Ahdida [et al.]. // JHEP - 2021. - V.4 - P.199.

5. Scintillator cubes for 3D neutrino detector SuperFGD / S. Fedotov [et al.]. // Электронный препринт. – 2021. – https://arxiv.org/abs/2111.07305 [physics.ins-det].

6. Supernova model discrimination with Hyper-Kamiokande / K. Abe [et al.] // Astrophys.J. – 2021. – V.916 - №1 – P.15.

Эксперимент JUNO

Feasibility and physics potential of detecting 8B solar neutrinos at JUNO. / A.
 Abusleme [et al.] // Chinese Physics C. – 2021. – Vol. 45, No. 2. – P.023004.

8. Calibration strategy of the JUNO experiment. / A. Abusleme [et al.] // JHEP – 2021. - 03. - 004.

9. Study of after-pulses in the 20-inch HQE-MCP-PMT for the JUNO experiment. / Qi Wu [et al.] // NIMA. – 2021. – 1003. – 165351.

 Mass production and characterization of 3-inch PMTs for the JUNO experiment. / Chuanya Cao [et al.] // NIMA. – 2021. – V.1005. – P.165347.

 Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector. / A. Abusleme [et al.] // Nuclear Instruments and Methods A. – 2021. – Vol.988. – P.164823.

12. JUNO sensitivity to low energy atmospheric neutrino spectra. / A. Abusleme [et al.] // EPJC. -2021. - 81. - 887.

13. The Design and Sensitivity of JUNO's scintillator radiopurity pre-detector OSIRIS. / A. Abusleme [et al.] // EPJC. -2021. -81(973).

14. Radioactivity control strategy for the JUNO detector. / A. Abusleme [et al.] // JHEP. -2021. -11. -102.

15. JUNO Physics and Detector. / A. Abusleme [et al.] // Progress in Particle and Nuclear Physics. – 2021 – 103927. doi: https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2021.103927.

16. Juno Physics Prospects. / A. Abusleme [et al.] // PoS(ICRC2021)1194.

4. Публикации по задаче «Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино»

Эксперимент Т2К: последние результаты и перспективы / М.М. Хабибуллин
 // ЯФ. – 2021. – 84 – №1 – С.37.

2. T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.13×10^{21} protons on target / K. Abe [et al.] // Phys.Rev. $-2021. - D103 - N_{2}1 - P.$ L011101.

3. Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13×10^{21} protons on target / K. Abe [et al.] // Phys.Rev. $-2021. - D103 - N_{2}11 - P. 112008.$

4. First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single- π + production channel containing at least one proton / K. Abe [et al.] // Phys.Rev. - 2021. - D103 - No11 - P.112009.

5. Публикации по задаче «Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам»

1. Search for lepton number and flavor violation in K⁺ and π^0 decays / E. Cortina Gil [et al.] // Phys.Rev.Lett. – 2021. – V.127 – No13 – P.131802.

2. Measurement of the very rare $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ decay / E. Cortina Gil [et al.] // JHEP. – 2021. – 06 – P.93.

3. Search for K⁺ decays decays to a muon and invisible particles / E. Cortina Gil [et al.] // Phys.Lett. – 2021. – B816 – P.136259.

4. Search for a feebly interacting particle X in the decay $K^+ \rightarrow \pi^+ X / E$. Cortina Gil [et al.] // JHEP. – 2021. – 03 – P.058.

5. Study $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ v\gamma$ decay with OKA setup / A.Yu. Polyarush [et al.] // Eur.Phys.J. - 2021. - C81 - No2 - P.161.

6. Search for π^0 decays to invisible particles / E. Cortina Gil [et al.] // JHEP. – 2021. – 02 – P.201.

6. Публикации по задаче «Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов»

1. An Improved Measurement of Neutrino Oscillation Parameters by the NOvA Experiment / M.A. Acero [et al.] // arXiv:2108.08219.

 Search for Active-Sterile Antineutrino Mixing Using Neutral-Current Interactions with the NOvA Experiment / M.A. Acero [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2021. – V.127. – P. 201801.

Search for slow magnetic monopoles with the NOvA detector on the surface /
 M.A. Acero [et al.] // Phys. Rev. D. – 2021. – V.103. – P. 012007.

4. Seasonal variation of multiple-muon cosmic ray air showers observed in the NOvA detector on the surface / M.A. Acero [et al.] // Phys. Rev. D. -2021. - V.104. - P. 012014.

5. Extended search for supernovalike neutrinos in NOvA coincident with LIGO/Virgo detections / M.A. Acero [et al.] // Phys. Rev. D. – 2021. – V.104. – P. 063024.

7. Публикации по задаче «Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс»

1. Conceptual Design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory./ A. Abeln [et al.] // *JHEP*. – 2021. – V. 05. – P. 137. e-print https://arxiv.org/abs/2010.12076.

2. Axion search with BabyIAXO in view of IAXO./ A. Abeln [et al.] // PoS ICHEP2020 – 2021. – P. 631. Contribution to ICHEP. e-Print: 2012.06634 [physics.ins-det], DOI: 10.22323/1.390.0631.

8. Публикации по задаче «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных»

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

1. Лохов А.В. Background reduction with the shifted analyzing plane confguration in KATRIN // Конференция немецкого физического общества: отделение физики частиц, Дортмунд, Германия (онлайн) Март 2021.

2. Лохов A.B. The KATRIN experiment: neutrino mass measurements with sub-eV sensitivity and future prospects // Семинар по физике высоких энергий, Варшава, Польша (онлайн) Апрель 2021.

3. Лохов A.B. The KATRIN experiment: neutrino mass measurements with sub-eV sensitivity and future prospects // 20-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, Москва, Россия (онлайн) Август 2021.

4. Лохов A.B. The KATRIN experiment: neutrino mass measurements with sub-eV sensitivity and future prospects // 17-я Международная конференция TAUP-2021, Валенсия, Испания (онлайн) Август 2021.

5. Титов H.A. KATRIN: project current status and result on the neutrino mass // LXXI International conference NUCLEUS – 2021. September,21 2021 St.-Petersburg, Russia (онлайн).

9. Публикации по задаче «Поиск 2К-захвата в Хе-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

Поиск 2К-захвата в Хе-124

1. Recent advancements of the experiment to search for 2K-capture in Xe-124 using a Large Low-background Proportional Counter. / V. Kazalov [et al.] // arXiv:2110.02932v1, proceeding for TAUP2021, Находится в печати в журнале Journal of Physics: Conference Series (JPCS).

Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE

2. Alpha backgrounds in the AMoRE-Pilot experiment. / V. Alenkov [et al.] // arxiV: 2107.07704. Находится в печати в журнале Eur.Phys.J. C.

3. Yoomin Oh. Status of AMoRE. Proceeding for TAUP2021. Находится в печати в журнале Journal of Physics: Conference Series (JPCS).

10. Публикации по задаче «Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA»

Эксперименты GERDA и LEGEND

1. Characterization of inverted coaxial 76Ge detectors in GERDA for future double- β decay experiments. GERDA Collaboration. / M. Agostini [et al.] // Eur.Phys.J.C – 2021. – V.81. – P. 505. e-Print: 2103.15111 [physics.ins-det].

Calibration of the Gerda experiment GERDA Collaboration. / M. Agostini [et al.]
 // Eur.Phys.J.C - 2021. - V.81. - P. 682. e-Print: 2103.13777 [physics.ins-det].

Эксперимент Double Chooz

Rate Modulation oscillation analysis with two detectors in Double Chooz. / T.
 Abrahao [et al.] // JHEP – 2021. – V.01. – P. 190. arXiv:2007.13431 [hep-ex].

2. Search for Signatures of Sterile Neutrinos with Double Chooz. / T. Abrahao [et al.] // Eur. Phys. J. C – 2021. – V.81. – P. 8. arXiv:2009.05515 [hep-ex].

11. Публикации по задаче «Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо»

 Н.Ю. Агафонова. О механизме температурных вариаций средней энергии мюонов на больших глубинах. / Н.Ю. Агафонова, А.С. Мальгин // ЖЭТФ. – 2021. – Том 159. – Вып. 1. – стр. 88.

 OPERA tau neutrino charged current interactions. / Agafonova N. [et al.] // Sci Data. - 2021. - 8. - 218.

Измерение сезонных вариаций от мюонов окологоризонтального направления. / Н. Ю. Агафонова [и др.] // Известия РАН. Сер. физ. – 2021. – Т. 85. – № 4. – с. 563–565.

4. Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии. / Н. Ю. Агафонова [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. –2021. – Т.85. – N11. – 1661-1665.

5. Variations of Atmospheric Muons and Background Measured with Large Volume Detector / Agafonova N. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. –2021. – Vol. 84. – No. 6. – pp. 1065–1069.

12. Публикации по задаче «Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра»

1. Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark. / Roel Aaij [et al.] // arXiv:2109.01038.

2. Observation of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates. / Roel Aaij [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2021. – V.127. – P. 111801. arXiv:2106.03744.

3. Test of lepton universality in beauty-quark decays. / Roel Aaij [et al.] // arXiv:2103.11769.

4. A fixed-target programme at the LHC: Physics case and projected performances for heavy-ion, hadron, spin and astroparticle studies. / C.Hadjidakis [et al.] // Physics Reports. – 2021. – V.911. – P. 1–83.

5. LHC fixed target experiments: Report from the LHC Fixed Target working group of the CERN Physics Beyond Collider Forum. / C.Barschel [et al.] // CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2020-004, Published by CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.