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. № АААА-А16-116022510114-8 Рег. №

УТВЕРЖДАЮ Директор ИЯИ РАН, чл.-корр. РАН Л.В. Кравчук «31» января 2020 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ АААА-А16-116022510114-8 ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, КОСМОЛОГИЯ

(промежуточный за 2019 год)

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

М.В. Либанов «31» января 2020 г.

Москва 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, зам.директора по научной работе, д.ф-м.н., профессор РАН	<u>31.01.2020</u> подпись, дата	М.В. Либанов (введение, заключение)
Зав. отделом, д.ф-м.н.	<u>З1.01.2020</u> подпись, дата	Н.В. Красников (разделы 1)
Зав. отделом, академик РАН, д.ф-м.н.	31.01.2020 подпись, дата	И.И. Ткачев (разделы 8, 9, 10)
Зав. отделом, д.фм.н.	<u>Мовеу</u> 31.01.2020	Ю.Г. Куденко (раздел 4, 5, 6, 12)
Зав. отделом, д.фм.н., члкорр. РАН	<u>98мес 31.01.2020</u> подпись, дата	О.Г. Ряжская (раздел 2, 3, 7, 11)

ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчёт содержит: 126 с., 68 рис., 2 табл.

Ключевые слова: Расширения Стандартной модели (СМ) физики элементарных астрофизика, теории великого объединения, частиц. космология, модели с дополнительными пространственными измерениями, тёмная энергия, тёмная материя, чёрные дыры, инфляция, интегрируемые модели, скрытые фотоны, мультикатодный счетчик, физика каонов, редкие процессы, С-, Р-, Т- симметрии и их нарушение, физика за рамками СМ, нейтринная физика, нейтринные детекторы, мюонные детекторы, стерильное нейтрино, лавинные фотодиоды, атмосферные мюоны, подземная физика, радон, большой адронный коллайдер, редкие распады В-мезонов, калометрия, сцинтилляционные методы ядерной физики, нуклон, фотон, мезон.

Отчет содержит основные результаты фундаментальных и прикладных работ, выполненных согласно государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2019 год.

Работы проводились в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15: «Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.»

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»

Объектом исследования являются модели физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели, в частности суперсимметричные теории и теории с дополнительными пространственными измерениями, расширения Стандартной модели, содержащие стерильные нейтрино, в рамках которых можно интерпретировать экспериментальные данные об осцилляциях нейтрино и тёмной материи, модифицированные теории гравитации, в том числе теории с нарушенной Лоренцинвариантностью, модели физики и астрофизики космических лучей сверхвысоких энергий, методы Монте-Карло моделирования атмосферных ливней, процессы,

происходившие в ранней Вселенной, такие как процессы фазового перехода, генерации барионной асимметрии, образования структур, процессы, происходившие на инфляционной стадии.

Цель работы — построение новых теорий и моделей физики высоких энергий, способных решить широкий круг проблем современной теоретической и экспериментальной физики, возникающих на стыке сразу нескольких направлений, таких как физика элементарных частиц, астрофизика и космология, а также обеспечение достижения научных результатов мирового уровня, подготовка и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирования эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

Основным инструментом для исследования процессов и явлений в физике элементарных частиц и космологии был использован аппарат квантовой теории поля, квазиклассическое приближение, методы теории симметрий, а также суперсимметрий. В рамках НИР этот математический аппарат был существенно развит и дополнен новыми методами, позволяющими получить количественные характеристики экспериментально наблюдаемых величин, таких как время жизни частиц, сечение рассеяния, вероятность туннельного прохождения и так далее. При исследовании как равновесных, так и неравновесных процессов, происходивших в ранней Вселенной, были использованы методы квантовой теории поля при конечных температурах, которые являются синтезом методов квантовой теории поля и статистической физики. Для решения задач, не поддающихся аналитическому исследованию, были использованы пакеты программ, такие как LatticeEasy, CompHEP, microOMEGAs, HYDJET++, CASCADE, PYTHIA, NMSSMTools и другие.

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

Объектом исследования являются тёмная материя в виде скрытых фотонов.

Цель работы — зарегистрировать эффект от тёмной материи в виде скрытых фотонов.

Для решения задачи был изготовлен мультикатодный счетчик с алюминиевым катодом усовершенствованной конструкции. Были проведены калибровочные измерения с источником ультрафиолетового излучения, а также измерения скорости счета одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода при разных температурах. Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода (0.81 \pm 0.08) \cdot 10⁻⁴ Hz/cm². По результатам измерений установлен верхний предел на константу смешивания для скрытых фотонов. Описание работы мультикатодного счетчика и его технические характеристики опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods A

910 (2018) 164. Полученные результаты доложены на международной конференции ICPPA-2018 в г. Москва, на Черенковских Чтениях, ФИАН, Москва, 2019 г. и опубликованы в журнале JCAP07 (2019) 008. Продолжен набор статистики на счетчике усовершенствованной конструкции. Результаты измерений обрабатываются. Разработана, изготовлена и успешно испытана система охлаждения детектора на основе элементов Пельтье. Детектор готовится к работе при пониженных температурах.

3. Задача «Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей»

Объектом исследования являются первичные чёрные дыры и тёмная материя.

Цель работы — Исследование роли первичных чёрных дыр в эволюции ранней Вселенной. Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей. Изучение образования сгустков частиц тёмной материи, их внутренней структуры и возможных наблюдательных проявлений. Исследование аннигиляции тёмной материи и вычисление потоков гамма-квантов, нейтрино, позитронов и антипротонов от аннигиляции частиц тёмной материи в гало Галактики.

Вблизи первичных чёрных дыр на радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной формируются пики плотности из частиц тёмной материи. Эти пики могут быть источниками гамма-излучения, а также потоков позитронов и антипротонов в случае аннигилирующей тёмной материи. Выполнен самосогласованный вывод уравнения движения частиц в метрике первичной чёрной дыры на космологическом фоне. Путем численного расчёта найден профиль плотности пика тёмной материи. Рост плотности в центральной части несколько подавлен по сравнению с результатами предшествующих расчётов. Исследована аннигиляция тёмной материи в пиках плотности.

4. 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 2026-2027 годах в Японии и в ЦЕРН. На первом этапе разработанные детекторы будут использованы в рамках модернизации ближнего детектора ND280 действующего нейтринного осцилляционного эксперимента T2K (Япония).

При непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН был создан магнитный детектор Baby-MIND на основе пластиковых сцинтилляторов, который позволяет регистрировать треки заряженных частиц, образовавшихся в результате нейтринных

взаимодействий. Этот детектор был смонтирован в полном объеме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента Т2К в 2019 г., а в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения Т2НК, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K группой ИЯИ РАН разработан инновационный детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков объемом $10 \times 10 \times 10$ мм³ с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон, и имеет размеры: длина 200 см, ширина 200 см, высота 60 см. В течение 2019 года была полностью разработана и отлажена процедура массового изготовления методом литья под давлением сцинтилляционных кубиков с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон. В 2019 году в ИЯИ было собрано 25 плоскостей детектора из 900 тысяч кубиков, что составляет около 45% общего объема.

Сотрудниками ИЯИ PAH была проделана НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для двух систем эксперимента SHiP: для временного детектора и для мюонной системы, основная задача которых заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. Прототип временного детектора SHiP будет использован качестве времяпролётного детектора В модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента Т2НК (ГиперКамиоканде). Для мюонной системы SHiP изготовлены сцинтилляционные счётчики, которые в 2020 г. будут протестированы в Италии.

5. 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 2019 году в эксперименте Т2К был выполнен осцилляционный анализ данных, накопленных в 2009–2018 гг. с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Анализ данных базировался на интегральном потоке 1.49×10^{21} протонов на мишени (POT) для нейтринной моды и 1.64×10^{21} POT для антинейтринной моды. В результате существенно понижены систематические погрешности (с 13-19% до 4-9%) и улучшена чувствительность к осцилляционным параметрам. При поиске «появления» событий в

дальнем детекторе Супер-Камиоканде было зарегистрировано 75 электронных нейтрино с одним кольцом и 15 событий с рождением электрона и одного пиона от взаимодействия электронного нейтрино. Кроме того, было зарегистрировано 15 событий, соответствующих появлению электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.

Было получено, что наиболее вероятными значениями СР нечетной фазы являются $\delta = (-1.89^{+0.70}_{-0.68})$ рад для нормальной иерархии масс и $\delta = (-1.38^{+0.48}_{-0.54})$ рад для инверсной иерархии масс, т.е. для обоих возможных значений иерархии масс величина δ близка к максимальному СР нарушению. Таким образом, сохранение СР симметрии ($\delta = 0$ или $\delta = \pi$) исключено на уровне 3 σ (99.73%) в случае инверсной иерархии масс и на несколько меньшем уровне доверительной вероятности (около 99.0%) в случае нормальной иерархии масс. Полученный результат подтверждает первоначальное указание Т2К на максимальное СР нарушение в лептонном секторе Стандартной Модели.

В эксперименте T2K был проведен поиск осцилляций, которые могут возникнуть, если существуют лёгкие *стерильные* нейтрино, не участвующие в слабых взаимодействиях. Анализ данных, набранных в 2010-2017 гг., не показал значительных отклонений от модели трёх активных нейтрино и установил новые ограничения на параметры модели «3+1», сравнимые с результатами других экспериментов.

6. 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, запрещённых в Стандартной Модели и нарушающих СР и Т инвариантность, а также поиск различных «экзотических» частиц.

Были проведены работы по анализу данных каонного эксперимента NA62 с целью поиска редкого распада каона на пион и два нейтрино ($K^+ \rightarrow \pi^+ vv$). В одной из сигнальных областей наблюдаются 2 события. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 2.16, а фон – на уровне 1.5 ± 0.3. Суммарный анализ данных 2016-2017 гг. приводит к следующему результату: Br($K^+ \rightarrow \pi^+ vv$) < 1.62 × 10⁻¹⁰ на 95% уровне достоверности или Br($K^+ \rightarrow \pi^+ vv$) = (0.47^{+0.72}-0.47) × 10⁻¹⁰. Анализ данных 2018 г. продолжается.

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.

Было проведено исследование по поиску тяжёлых нейтральных лептонов, причём не только непосредственно в каонных экспериментах, но и в ближнем детекторе нейтринного эксперимента T2K, в котором искались тяжёлые нейтрино из распадов каонов, образованных при взаимодействии протонов исходного пучка с графитовой мишенью.

В рамках каонного эксперимента NA62 был проведён 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.

7. 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 ve Appearance) является определение параметров нейтринных осцилляций. В этом эксперименте используется самый мощный пучок (мощностью 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 (шт. Миниссота, США). Получены 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.

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

Основным результатом проведенной в 2019 году работы является проведение мероприятий по минимизации фона в электростатическом спектрометре и преспектрометре. Проведен завершающий технологический сеанс по измерению остаточного фона. Выполнен ряд расчётов по оптимизации магнитного поля спектрометра, на основе которых намотаны дополнительные обмотки для генерации корректирующих полей. Продолжен анализ статистики прецизионного измерения бета спектра трития с целью поиска сигналов стерильного нейтрино в диапазоне энергии электронов 14-18.5 кэВ. Помимо основной системой регистрации анализируется вариант с полной оцифровкой сигналов с детектора. Это позволило уменьшить влияние мёртвого времени электроники в 8 раз и сузить временной интервал сигналов с наложениями.

Выполнен ряд запланированных расчётных работ по исследованию отклика детектора, особенно в области вблизи порога. В течение 2019 года постоянно проводились работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования.

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

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы – установление абсолютной шкалы масс нейтрино.

Цель работы – поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бетараспаде трития в эксперименте КАТРИН. В 2019 году поставлено лучшее ограничение на величину эффективной массы электронного антинейтрино на уровне 1,1 эВ/с². С участием группы ИЯИ РАН обрабатывались данные по потерям энергии электронами в источнике в рамках нового подхода, основанного на измерениях по времени пролета, получены параметры спектра потерь с беспрецедентной точностью. Исследовались предложения по проведению измерений в нестандартной конфигурации электрических и магнитных полей найдена возможность снизить фон спектрометра в два раза. Исследовались детекторы электронов ДОЭ - Si APD разработки ФТИ им. Иоффе для возможного применения в эксперименте по поиску стерильных нейтрино с массой в области нескольких кэВ.

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

ИЯИ РАН участвует в международном эксперименте GERDA-II по поиску двойного безнейтринного бета распада германия-76, расположенном в подземной Национальной лаборатории Италии Гран-Сассо (LNGS INFN). В конце 2019 года достигнута экспозиция 82,4 кг лет и набор экспериментальных данных прекращён. Новая международная коллаборация LEGEND-200 продолжит поиск этого распада на новом уровне чувствительности.

ИЯИ РАН участвуют в международном эксперименте Double Chooz, расположенном во Франции. Эксперимент изучает осцилляционные свойства реакторных нейтрино. Набор данных в эксперименте Double Chooz закончен, в 2019 году продолжался анализ данных. Измеренное значение угла смешивания θ_{13} нейтрино с увеличенным объёмом мишени составило $\sin^2 2\theta_{13} = 0.105 \pm 0.014$.

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

Объектом исследования являются поток атмосферных мюонов, а также фон естественной радиоактивности в подземном экспериментальном зале.

Целью работы является изучение свойств потока атмосферных мюонов горизонтального и вертикального направлений; изучение нейтронов, генерированных мюонами, а также изучение фона естественной радиоактивности, измеряемого детектором LVD, для поиска редких событий.

По временным рядам более пятидесяти миллионов мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD за 24 года, под землёй был измерен средний поток мюонов $I_{\mu} = (3.35 \pm 0.0005$ стат ± 0.03 сист) $\times 10^{-4}$ м⁻²с⁻¹. Поток подземных мюонов сезонно модулируется из-за изменений температуры в стратосфере. Определен эффективный температурный коэффициент $\alpha_T = 0.94 \pm 0.01$ стат ± 0.01 сис. По данным LVD были получены характеристики сезонных вариаций потоков мюонов разных направлений в период с 2001 по 2018 гг. Методом «независимых простых годоскопов» определены амплитуда и фаза сезонных вариаций для горизонтальных и вертикальных мюонов. Амплитуда модуляции для горизонтальных мюонов $\delta I_h = 1.7 \pm 0.3\%$. Амплитуда модуляции для вертикальных мюонов составляет $\delta I_v = 1.0 \pm 0.2\%$.

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

Физические результаты коллаборации LHCb в 2019 г.

Объектом исследования являются редкие распады В-мезонов и прецизионное измерение параметров СР-нарушения с целью проверки Стандартной модели и поиска эффектов Новой Физики. Эксперимент LHCb сегодня является мировым лидером по изучению физики тяжёлых кварков. В 2018 г. продолжен набор данных на энергии пучков 6.5 ГэВ, было набрано 2.18/fb интегральной светимости. Также продолжается обработка набранных ранее данных, в 2019 г. получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе наблюдение новых пентакварков; открытие СР нарушения в распадах «очарованных» частиц; поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B^+ \rightarrow K^+l^+l^-$.

Модернизация детектора LHCb

Объектом исследования являются подготовка к демонтажу и демонтаж предливневого детектора; включая демонтаж кабелей; демонтаж супермодулей и свинцового конвертора.

Цель работы — подготовка установки к работе с повышенной светимостью. Установка будет оптимизирована для работы с повышенной светимостью 2×10^{34} cm⁻²s⁻¹, существовавший аппаратный триггер, работавший с частотой 1 МГц, будет заменён на

программный, способный работать с частотой 40 МГц со средней пропускной способностью 30 МГц. Демонтаж предливневого и сцинтилляционно-падового детектора являются частью модернизации калориметрической системы. Далее предполагается модернизация элементов калориметров с заменой элементов электроники и модулей на более быстрые и радиационно-стойкие.

Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

Объектом исследования являются улучшенные модули калориметра типа «шашлык».

Цель работы — разработка нового электромагнитного калориметра с улучшенными характеристиками для работы при увеличенной светимости.

Программа развития установки LHCb предусматривает увеличение светимости после 2030 года до 2×10^{34} cm⁻²s⁻¹. Для эффективной работы электромагнитного калориметра при возросших радиационных нагрузках и увеличенного количества вторичных частиц потребуется новый калориметр с улучшенными характеристиками, такими как улучшенное энергетическое разрешение, повышенная радиационная стойкость, временное разрешение на уровне десятков пикосекунд. Для более точного разделения близлежащих ливней также потребуется мелкая гранулярность и уменьшенный мольеровский радиус. Для этих целей требуется разработка улучшенных модулей калориметра типа «шашлык». Проведено исследование возможности улучшенной самплинг-структурой.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ
РЕФЕРАТ
СОДЕРЖАНИЕ
ВВЕДЕНИЕ
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. Разработка аналитических методов многопетлевых вычислений
1.2. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели30
1.2.1. Образование тёмных фотонов
1.2.2. Исследование моделей с нарушенной симметрией Лоренца
 1.2.3. Теоретическое обоснование будуших и текущих экспериментов — СМС, NA64 31
1.2.4. Развитие методов вычисления структурных функций и партонных распределений ядер
1.3. Построение новых космологических моделей ранней Вселенной. Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии. Астрофизика космических лучей
1.3.1. Исследование расширенных теорий гравитации Хорндески
1.3.2. Астрофизика космических лучей
2. Поиск скрытых фотонов в качестве холодной темной материи
3. Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей
 Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP 45
4.1. Разработка и создание новых нейтринных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK45
4.1.1. Магнитный нейтринный детектор Baby-MIND45
4.1.2. Сцинтилляционный сегментированный нейтринный 3D детектор SuperFGD46
4.2. Разработка и создание новых мюонных детекторов для эксперимента следующего поколения по поиску тёмной материи SHiP
4.2.1. Сцинтилляционные счётчики для эксперимента SHiP48
5. Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (Т2К). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное

обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино
5.1. Продолжение набора статистики в эксперименте T2K по изучению осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в 2019 г50
5.1.1. Осцилляционный анализ данных 2009-2018 гг
5.2. Поиск СР нарушения в нейтринных осцилляциях
5.2.1. Улучшение чувствительности к СР нарушению в эксперименте Т2К и получение нового результата
5.3. Поиск стерильных нейтрино в эксперименте Т2К
5.3.1. Поиск стерильных нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде эксперимента Т2К
6. 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 нечетным эффектам54
6.1. Измерение распада каона на пион и два нейтрино в эксперименте NA62 (ЦЕРН)54
6.1.1. Результат анализа данных NA62, полученных в сеансах 2016-2017 гг54
6.2. Поиск тяжелых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо- подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффекта55
6.2.1. Поиск тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K55
6.2.2. Поиск «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к СР и Т нечётным эффектам 57
7. Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучком мюонных антинейтрино
7.1. Регистрация мюонных нейтрино
7.2. Регистрация электронных антинейтрино
8. Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс
8.1. Полученные в 2019 году результаты
8.1.1. Очистка спектрометра от остаточного трития. Снижение фона
8.2. Расчеты отклика детектора на падающие электроны
8.3. Участие в 2019 году в научных мероприятиях
9. Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных
9.1. Проект КАТРИН64
9.2. Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН
9.2.1. Измерения спектра потерь энергии при рассеянии электронов на молекулах дейтерия D ₂

9.2.2. Уменьшение фона спектрометра КАТРИН с помощью специальных конфигураций электромагнитных полей в спектрометре70
9.2.3. Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино74
0. Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ⁷⁶ Ge. Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA
1. Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной аборатории Гран-Сассо
11.1. Сезонные вариации атмосферных мюонов в LVD
11.1.1. Вариации потока мюонов за 24 года работы детектора LVD
11.1.2. Вариации мюонов горизонтального и вертикального направлений
11.2. Вариации фона естественной радиоактивности
 Физические результаты коллаборации LHCb в 2019 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра
12.1. Физические результаты коллаборации LHCb в 2019 г
12.1.1. Наблюдение новых пентакварков в эксперименте LHC
12.1.2. Открытие СР нарушения в распадах «очарованных» частиц в эксперименте LHCb94
12.1.3. Поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^- \dots 94$
12.2. Модернизация детектора LHCb95
12.3. Демонтаж предливневого детектора
12.3.1. Подготовка к демонтажу
12.3.2. Демонтаж кабелей
12.3.3. Демонтаж супермодулей и свинца
12.4. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ТУБЛИКАЦИИ

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»

В настоящее время исследование теоретических проблем физики частиц и космологии и в особенности их взаимосвязи является одной из наиболее актуальных проблем современной физики. Это связано с новыми экспериментальными возможностями, в частности, с работой Большого адронного коллайдера. Эксперименты на Большом адронном коллайдере позволят не только решить ряд принципиальных вопросов физики элементарных частиц (проблема возникновения масс и нарушение электрослабой симметрии), но и, возможно, установить связь с астрофизикой и космологией (структура тёмной материи).

Одной из основных проблем современной физики является проблема тёмной материи. Среди множества моделей тёмной материи в последнее время большое внимание уделяется моделям с легкой тёмной материи с массой частиц тёмной материи, меньших массы протона. Особый интерес переставляет поиск таких частиц на ускорителях. В этом направлении были предприняты важные теоретические и экспериментальные исследования, основные результаты которых приведены в основной части отчета.

Важным направлением исследований является теоретический поиск характерных процессов и явлений (сигнатур) возможных расширений Стандартной Модели физики элементарных частиц (СМ). С помощью поиска и изучения таких процессов получены ограничения на параметры моделей, расширяющих СМ. Задача поиска сигнатур процессов за рамками СМ требует повышения точности теоретических расчетов таких процессов. Прецизионные расчеты необходимы также для уточнения с их помощью параметров СМ, в том числе нейтринного сектора.

В работах, посвященных сверхранней Вселенной, были применены современные методы квантовой теории поля, такие как метод эффективных лагранжианов, адС/КТПсоответствие и т.п., для построения новых моделей, как инфляционных, так и альтернативных инфляции. Изучены корреляционные свойства скалярных и тензорных возмущений, генерируемых в моделях с нетривиальной динамикой. Полученные результаты сравнивались с наблюдательными данными эксперимента Planck и других астрофизических экспериментов, получены ограничения на их параметры.

Скалярно-тензорные теории модифицированной гравитации типа расширенных теорий Хорндески являются перспективными с точки зрения исследования нестандартных космологических сценариев без начальной сингулярности: Вселенная с «отскоком» (исходное сжатие Вселенной гладким образом переходит в расширение) и Вселенная с «генезисом» (фридмановская Вселенная, стартующая из пустого плоского пространства Минковского). Необходимость использования теорий с модифицированной гравитацией непосредственной связи устойчивости несингулярных решений следует из на линеаризованном требования нарушения уровне И изотропного условия энергодоминантности. Основной целью исследования являлось построение конкретных примеров космологических сценариев с отскоком и генезисом, которые были бы устойчивы по отношению к малым возмущениям на протяжении всего времени эволюции системы.

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 тёмная материя является существенным ингредиентом в нашем понимании, как устроена Вселенная. Поиск тёмной 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 тёмную материю. Наибольшие надежды до сих пор возлагались на слабовзаимодействующие частицы (ВИМП), которые могли быть зарегистрированы по их рассеянию на ядрах мишени. Массы детекторов увеличивались, нынешние достигают уже масштаба 1 тонны, однако поиски ВИМП 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 [0].

Одним из альтернативных кандидатов на тёмную материю являются скрытые фотоны. Поиск тёмной 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 2016-2019 годы по этой теме нами было достигнуто следующее:

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

2. Разработан и апробирован в измерениях экспериментальный метод.

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

4. Выполнены измерения с детектором с медным и алюминиевым катодами.

5. Обработаны данные и получены результаты.

6. Результаты опубликованы в печати.

Разработана усовершенствованная конструкция мультикатодного счетчика с алюминиевым катодом и фокусирующими электродами. Работа мультикатодного счетчика и его технические характеристики опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods A 910 (2018) 164. Алюминий был выбран в качестве материала катода, потому что квантовая эффективность для алюминия примерно в полтора раза выше, чем для меди в ультрафиолетовом диапазоне. В результате измерений получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов (0.81±0.08)×10⁻⁴ Hz/cm⁻². Результаты измерений на счетчике усовершенствованной конструкции с алюминиевым катодом были опубликованы в журнале JCAP07 (2019) 008. В 2019 году был продолжен набор статистики на счетчике усовершенствованной конструкции. Результаты измерений обрабатываются. Разработана система охлаждения счетчика на базе элементов Пельтье. Проведены испытания системы. В настоящее время детектор готовится к измерениям при пониженных температурах.

3. Задача «Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей»

Модель образования первичных черных дыр была предложена Я.Б. Зельдовичем и И.Д. Новиковым в 1967 г. и затем обоснована в работах С. Хокинга и Б. Карра. В последние годы первичные черные дыры привлекли повышенное внимание, так как их слияние в парах может объяснить некоторые из событий LIGO/Virgo. Другим наблюдательным проявлением первичных черных дыр может быть аннигиляция темной материи в пиках плотности вокруг первичных черных дыр. Этот эффект накладывает сильные общие ограничения на первичные черные дыры и сечение аннигиляции темной материи [0], [2], [3] и делает первичные черные дыры звездных масс и слабо взаимодействующие частицы (WIMPs) почти несовместимыми [3], [4]. Для расчета аннигиляции необходимо знать ее профиль плотности темной материи вокруг первичной черной дыры. Профили были рассмотрены в нескольких работах [0], [2], [3], но с

модельными предположениями. Нами был применен более строгий метод расчета с использованием общей теории относительности. Также рассмотрена ситуация, когда частицы темной материи имеют большие массы и малое сечение аннигиляции. В этом случае аннигилирующие частицы темной материи могут быть совместимы с существованием первичных черных дыр в количестве, необходимом для объяснения части событий LIGO/Virgo.

4. 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 2026-2027 годах в Японии и в ЦЕРН. На первом этапе разработанные детекторы будут использованы в рамках модернизации ближнего детектора ND280 действующего нейтринного осцилляционного эксперимента T2К (Япония).

При непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН был создан магнитный детектор Baby-MIND на основе пластиковых сцинтилляторов, который позволяет регистрировать треки заряженных частиц, образовавшихся в результате нейтринных взаимодействий. Этот детектор был смонтирован в полном объеме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента Т2К в 2019 г., а в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения Т2НК, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K группой ИЯИ РАН разработан инновационный детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков объемом 10×10×10 мм³ с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон, и имеет размеры: длина 200 см, ширина 200 см, высота 60 см. В течение 2019 года была полностью разработана и отлажена процедура массового изготовления методом литья под давлением сцинтилляционных кубиков с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон. В 2019 году в ИЯИ было собрано 25 плоскостей детектора из 900 тысяч кубиков, что составляет около 45% общего объема.

Сотрудниками ИЯИ РАН была проделана НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для двух систем эксперимента SHiP: для временно́го детектора и для мюонной системы, основная задача которых заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. Прототип временно́го

детектора SHiP будет использован в качестве времяпролётного детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (ГиперКамиоканде). Для мюонной системы SHiP изготовлены сцинтилляционные счётчики, которые в 2020 г. будут протестированы в Италии.

5. 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 2019 году в эксперименте Т2К был выполнен осцилляционный анализ данных, накопленных в 2009-2018 гг. с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Анализ данных базировался на интегральном потоке 1.49 × 10²¹ протонов на мишени (POT) для нейтринной моды и 1.64×10^{21} РОТ для антинейтринной моды. В результате существенно понижены систематические погрешности (с 13-19% до 4-9%) и улучшена чувствительность к осцилляционным параметрам. При поиске «появления» событий в дальнем детекторе Супер-Камиоканде было зарегистрировано 75 электронных нейтрино с одним кольцом и 15 событий с рождением электрона и одного пиона от взаимодействия электронного нейтрино. Кроме того, было зарегистрировано 15 событий, соответствующих появлению электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.

Было получено, что наиболее вероятными значениями СР нечетной фазы являются $\delta = (-1.89^{+0.70}_{-0.68})$ рад для нормальной иерархии масс и $\delta = (-1.38^{+0.48}_{-0.54})$ рад для инверсной иерархии масс, т.е. для обоих возможных значений иерархии масс величина δ близка к максимальному СР нарушению. Таким образом, сохранение СР симметрии ($\delta = 0$ или $\delta = \pi$) исключено на уровне 3 σ (99.73%) в случае инверсной иерархии масс и на несколько меньшем уровне доверительной вероятности (около 99.0%) в случае нормальной иерархии масс. Полученный результат подтверждает первоначальное указание Т2К на максимальное СР нарушение в лептонном секторе Стандартной Модели.

В эксперименте T2K был проведен поиск осцилляций, которые могут возникнуть, если существуют лёгкие *стерильные* нейтрино, не участвующие в слабых взаимодействиях. Анализ данных, набранных в 2010-2017 гг., не показал значительных отклонений от модели трёх активных нейтрино и установил новые ограничения на

параметры модели «3+1», сравнимые с результатами других экспериментов.

6. 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, запрещённых в Стандартной Модели и нарушающих СР и Т инвариантность, а также поиск различных «экзотических» частиц.

Были проведены работы по анализу данных каонного эксперимента NA62 с целью поиска редкого распада каона на пион и два нейтрино ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$). В одной из сигнальных областей наблюдаются 2 события. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 2.16, а фон – на уровне 1.5 ± 0.3. Суммарный анализ данных 2016-2017 гг. приводит к следующему результату: Br($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$) < 1.62 × 10⁻¹⁰ на 95% уровне достоверности или Br($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$) = (0.47^{+0.72}-0.47) × 10⁻¹⁰. Анализ данных 2018 г. продолжается.

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.

Было проведено исследование по поиску тяжёлых нейтральных лептонов, причём не только непосредственно в каонных экспериментах, но и в ближнем детекторе нейтринного эксперимента T2K, в котором искались тяжёлые нейтрино из распадов каонов, образованных при взаимодействии протонов исходного пучка с графитовой мишенью.

В рамках каонного эксперимента NA62 был проведён 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.

7. 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 ve Appearance) является определение параметров нейтринных осцилляций. В этом эксперименте используется самый мощный

пучок (мощностью 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 (шт. Миниссота, США). Получены 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.

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

Определение массовой шкалы абсолютных и число нейтрино массовых состояний является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизики. 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 ничем не ограничен в настоящее время. Предположение о существовании ещё одного очень легкого состояния нейтрино в дополнение к трём активным состояниям кажется спорным в стандартной космологии, но может быть совместимо с современными космологическими данными. Стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько кэВ могут является естественным кандидатом на роль тёмной материи.

Нейтринные состояния, 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) = $\sum U^2_{ei} * S$ (E, m²_i), где S (E, m²_i) является спектром с определённой массой собственного состояния нейтрино. Число стерильных состояний нейтрино неизвестно. Если три первых состояния имеют массу близкую к нулю, то можно отдельно выделить вклад тяжёлого нейтрино, m²₄, и записать как S (E) = $(1-U^2_e)*S(E, 0) + U^2_{e4}*S(E, m^2_4)$. Существующие лучшие ограничения на U^2_{e4} , полученные в прямых экспериментах, показаны на Рисунок 1. В диапазоне масс m_N 0.1 - 2 кэВ лучшие пределы были получены нашей группой в Троицке [0,2].



Рисунок 1 – Существующие экспериментальные ограничения (95% CL) на примесь тяжелого нейтрино в электронном нейтрино в зависимости от массы. Сплошная кривая взята из публикации полученных ранее наших данных [2]

Экспериментальная установка

Установка «Троицк ню-масс» состоит из двух основных частей: безоконного источника трития и электростатического спектрометра с магнитной адиабатической коллимацией, Рисунок 2.



Рисунок 2 – Основные элементы установки, тритиевый источник расположен слева, спектрометр - справа: 8 – безоконный тритиевый источник, 15 – система замкнутой циркуляции трития, 10 – электростатический спектрометр, 12 – регистрирующий детектор

Для охлаждения сверхпроводящих магнитов жидким гелием на установке используется криогенная система TCF-50 фирмы LINDE.

Подробности установки и описание принципа работы можно найти в статье [3].

9. 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 бетараспаде трития.

Последние исследования нейтринных осцилляций продемонстрировали отличие от нуля массы нейтрино, что позволило измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом 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 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 3) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

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 (майорановские и дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ.

Альтернативный подход к измерению массы электронного нейтрино основан на применении болометрических детекторов для регистрации полного энерговыделения в процессах бета-распада и К-захвата. Группа эксперимента MARE изучала возможность исследования бета-распада в рении-187. Принципиальной проблемой такого эксперимента является образование метастабильных состояний, искажающее наблюдаемый спектр бета-распада. В настоящее время группа эксперимента MARE переключилась на проект HOLMES по поиску массы электронного нейтрино в К-захвате в гольмии-163[2,3,4,5]. Этот же процесс исследуется в эксперименте ECHo Collaboration [6].



Рисунок 3 – Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них. На графике – наиболее вероятный, по последним данным, вариант прямой иерархии [0]

Новый подход предложен в Project8 [7]. Предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. В 2018 году в рамках Project8 удалось зарегистрировать единичные электроны из β-распада трития и представить результаты двухнедельных измерений спектра [8].

По состоянию на конец 2019 г., в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино, только проект КАТРИН приступил к набору данных для определения эффективной массы электронного антинейтрино.

Эксперимент по поиску стерильного нейтрино с массой несколько кэВ

Следует упомянуть новую большую программу, предложенную для установки КАТРИН. Она состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно 19B/c² до нескольких к9B/c² [9]. 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 в 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 трёх состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады. Так, примесь четвёртого массового состояния должна проявляться в изломе β-спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [10]. Установка КАТРИН предоставляет для поиска стерильных нейтрино прежде всего уникальный безоконный источник газообразного трития активностью 100 ГБк (примерно 3 Ки). В тоже время, её система регистрации электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена, чтобы обеспечить регистрацию электронов всего β-спектра трития со скоростью счёта до 10⁸ в секунду. С таким детектором, при наборе данных в течение трех лет, КАТРИН имеет возможность вести поиск вклада стерильных нейтрино с массой несколько кэВ, на уровне, не исключённом существующими астрофизическими наблюдениями. Исследования с использованием варианта детектора нового типа были опубликованы в 2019г. [11].

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

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.

Целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа ⁷⁶Ge (0vββ распада). GERDA оперирует с открытыми германиевыми детекторами высокой чистоты из обогащённого ⁷⁶Ge (HPGe), погружёнными в жидкий аргон.

В эксперименте 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 кг⁷⁶Ge.

Набор физических данных в GERDA-II начался в декабре 2015 г. В июне 2016 на совещании коллаборации были открыты данные за первые 5 месяцев работы установки: установлен новый предел на период полураспада ⁷⁶Ge по данному каналу ($T_{1/2} > 5.3 \times 10^{25}$ лет). Набор данных планировалось продолжать до достижения статистики в 100 кг·лет (~2019 г.). К тому моменту чувствительность эксперимента превысит $T_{1/2} \sim 10^{26}$ лет.

Наиболее важный шаг в деле поиска 0vββ 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 «бесфоновым» экспериментом по поиску данного процесса. Статья, посвященная этому результату, опубликована в журнале Nature в 2017 году (doi:10.138/nature21717).

Одновременно проводится разработка нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND.

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

Эксперимент Double Chooz изучает осцилляционные свойства реакторных нейтрино. Начиная с 2013 года измерения велись двумя детекторами. В 2017 году закончен набор статистики в эксперименте, но продолжается анализ накопленных данных. Детектор коллаборации Double Chooz (10 м³) имел самый маленький объём среди аналогичных экспериментов: Daya Bay (20 м³) и RENO (16 м³).

Был предложен метод увеличения объёма мишени. В детекторе для регистрации антинейтрино используется реакция обратного бета-распада на ядерно-свободном протоне. Продукты реакции: позитрон и нейтрон, регистрируясь в детекторе, создают кореллированную во времени пару событий. Для лучшей регистрации нейтрона в мишень добавляются элементы с большим сечением поглощения нейтрона, такие как гадолиний. Снаружи мишень окружается сцинтиллятором без гадолиния, где регистрируются гамма-кванты испускаемые в результате захвата нейтрона гадолинием или водородом в мишени. Если учитывать захват нейтрона и на водороде, то объём мишени увеличивается в три раза до 30 м³.

В 2018-2019 гг. был проведен анализ данных с увеличенным объёмом. Статистика увеличилась в три раза и результат коллаборации вышел на второе место после Daya Bay, обогнав RENO.

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

Эксперименты, осуществляемые в подземных лабораториях, органично дополняют фундаментальные исследования элементарных частиц и их взаимодействий, проводимые на ускорителях. Поиск редких явлений в природе является единственным способом достичь, пусть даже косвенным образом, энергий, где начинают проявляться теория объединения сил и квантовые аспекты гравитации. Такие энергии нельзя получить на

ускорителях. Подземные лаборатории обеспечивают очень низкий радиоактивный фон, необходимый для поиска этих редких ядерных и субъядерных явлений.

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

Цель эксперимента LHCb – изучение физики тяжелых кварков на большом адронном коллайдере LHC. В том числе прецизионное измерение нарушения CP четности и редких распадах адронов с *с*- и *b*- кварками и поиск эффектов Новой Физики в параметрах, имеющих точное предсказание в Стандартной модели (CM). 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. Вкладом ИЯИ РАН на этапе создания установки БАК-би являлась разработка и создание составляющей части калориметрической системы - сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов. Калориметрическая система эксперимента LHCb играет важную роль в идентификации и измерении энергии частиц и выработке триггера нулевого уровня. За время работы эксперимента калориметрическая система показала надёжную и устойчивую работу. 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} cm⁻²s⁻¹. 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.

Сотрудники ИЯИ РАН принимают участие в работах по модернизации калориметра, его электроники и систем высоковольтного питания ФЭУ и медленного контроля.

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. Разработка аналитических методов многопетлевых вычислений

В безмассовой суперсимметричной версии КХД аналитически вычислена трехпетлевая поправка к функции Адлера, связанной с полным сечением процесса электрон-позитронной аннигиляции. Результаты получены в регуляризации посредством размерной редукции. Показано, что точное соотношение между функцией Адлера и аномальной размерностью суперполей материи в третьем порядке теории возмущений выполняется лишь после дополнительной конечной перенормировки. Исследована применимость использующейся в КХД процедуры beta-разложения, предложенной в работах Катаева и Михайлова, и ее упрощенной модификации Бродского (США) и соавторов. Показано, ЧТО последовательное применение этой процедуры в суперсимметричной КХД требует разложения по коэффициентам бета-функции КХД аномальной размерности материи. Неиспользование этого разложения (упрощение Бродского и Ву) приводит к нарушению строгого суперсимметричного соотношения между функцией Адлера и аномальной размерностью суперполей материи и в связи с этим ошибочно [1].

Рассмотрен стандартный метод наименьших квадратов, позволяющий решать переопределенную систему алгебраических уравнений и оценивать погрешности полученных решений. В качестве важного физического примера определяются четырехпетлевые квантово-хромодинамические коэффициенты зависимости соотношения между полюсными и бегущими массами тяжелых кварков от числа легких ароматов. При этом используются имеющиеся результаты суперкомпьютерных вычислений соответствующих четырехпетлевых вкладов при различных фиксированных числах Показана устойчивость найденных решений легких ароматов. по отношению к изменениям числа рассматриваемых уравнений и неизвестных [2].

Теоретически изучены перенормировочные свойства суперсимметричного варианта квантовой электродинамики в схеме вычитаний на массовой поверхности. В

данной схеме константа связи стандартной квантовой электродинамики совпадает с экспериментально измеряемой постоянной тонкой структуры, а массы лептонов - с их физическими значениями, извлекаемыми из различных экспериментов. Впервые показано, что в СУСИ КЭД это перенормировочное предписание является выделенным не только с феноменологической, но и с теоретической точки зрения. В нем автоматически выполняется во порядках теории возмущений всех точное соотношение между ренорм-групповыми функциями данной теории, сформулированное в 1980-ые годы группой теоретиков из ИТЭФ, но отнесённое тогда к некой неизвестной схеме перенормировок. Найдена явная связь схемы вычитаний на массовой поверхности с другим, более теоретическим предписанием, сформулированным в 2013 году А.Л. Катаевым и К.В. Степаньянцем, в котором также выполняется изученное точное соотношение между ренорм-групповыми функциями СУСИ КЭД [3].

1.2. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели

1.2.1. Образование тёмных фотонов

Описание переходов между обычным и "тёмным" фотоном в случае, когда энергия значительно превышает массу "тёмного" фотона, похоже на описание нейтринных осцилляций. В нашей работе были найдены амплитуды вероятностей и вероятности переходов между обычным и "тёмным" фотонов в вакууме и в веществе. В последнем случае важную роль играет не только поглощение фотонов средой, но и изменение дисперсионного соотношения фотонов, что может приводить к появлению у них эффективной массы. Показано, что при малых массах тёмного фотона вероятность его образования в общем случае оказывается подавленной либо за счет поглощения фотонов в среде либо из-за наличия эффективной массы обычного фотона. Как результат, в этих режимах вероятность образования "тёмного" фотона ведет себя как четвертая степень его массы, что ограничивает чувствительность экспериментов к таким моделям. Стандартными методами была вычислена вероятность образования тёмного фотона в среде, имеющей слоистую структуру. Это представляет интерес, в частности, для образования "тёмного" фотона в электромагнитном калориметре эксперимента NA64. Получены оценки для вероятностей образования тёмных фотонов для ряда коллайдерных экспериментов, таких как MATHUSLA, FASER, SHiP, T2K, DUNE, NA62, NA64. Ha основе сделанных расчётов найдена чувствительность эксперимента NA64 к моделям с легкими "тёмными" фотонами, что позволит продолжить экспериментальные ограничения на значения масс меньше 1 ГэВ. Кроме того, получены обновленные ограничения на

модели с "тёмным" фотоном из данных реакторного эксперимента TEXONO, которые учитывают эффект подавления образования легких "тёмных" фотонов. По результатам работы, подготовлены публикации [4,5].

1.2.2. Исследование моделей с нарушенной симметрией Лоренца

Рассмотрен процесс расщепления фотона на три фотона в модели квантовой электродинамики с нарушенной лоренц-инвариантностью (сверхсветовой случай). Была рассчитана дифференциальная и полная ширина данного канала распада. Показано, что процесс расщепления фотона может привести к обрезанию в высокоэнергетической части спектра фотонов от астрофизических источников. Анализируя высокоэнергетическую часть спектра Крабовидной туманности, полученной обсерваторией HEGRA, было получено ограничение (статистическая значимость 95% CL) на величину массового масштаба M_{LV}, определяющего нарушение лоренц-инвариантности. Это ограничение на масштаб нарушения лоренц-инвариантности (сверхсветовой случай) более чем на порядок сильнее, чем известные в литературе [6].

В 2019 году были опубликованы новые наблюдательные данные по спектру Крабовидной туманности, полученные коллаборациями Tibet и HAWC. Впервые была опубликована часть спектра в области энергий больших 100 ТэВ. Эти данные были использованы для постановки ограничений на масштаб нарушения лоренцинвариантности М_{LV} как в сверхсветовом, так и в субсветовом случаях. В сверхсветовом случае для постановки ограничений на MLV при анализе данных был использован вышеописанный процесс расщепления фотона на три фотона, в субсветовом случае – процесс рождения пар высокоэнергичным фотоном на ядре атмосферного азота. Данные ограничения улучшают предыдущие, полученные при анализе эксперимента HEGRA, в 3-5 pas [7].

1.2.3. Теоретическое обоснование будуших и текущих экспериментов — СМС, NA64

Произведен поиск тёмных фотонов в распадах бозона Хигтса, рождённого вместе с Z-бозоном в реакции $pp \rightarrow HZ \rightarrow \gamma\gamma_{dark} \rightarrow l^+ l^+ \gamma$. Получено ограничение на $Br(H \rightarrow \gamma\gamma_{dark}) < 4,6\%$ при $m_{\gamma dark} < 100$ ГэВ, см. Рисунок 4. При полной энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и полной светимости L = 35,9 фб⁻¹ произведен анализ данных с целью поиска стерильного нейтрино третьего поколения в реакции рождения правого W_R-бозона $pp \rightarrow W_R + ...$ и распада $W_R \rightarrow N_\tau \tau \rightarrow \tau \tau \tau v_\tau$. Получены рекордные ограничения на массу правого W_R-бозона и тяжёлого стерильного нейтрино третьего поколения. В предположении, что $m_{N\tau} = m_{WR}/2$, получено ограничение на массу W_R-бозона $m_{WR} < 3,5$ ТэВ. Результаты опубликованы в работах [8– 11]. Определен потенциал открытия лёгкой тёмной материи в эксперименте NA64. Показано, что при увеличении статистики в 15-20 раз эксперимент NA64 проверит все наиболее интересные модели лёгкой тёмной материи. Показано, что последние результаты эксперимента NA64 по поиску видимых распадов тёмного фотона с массой 16,7 MeV серьезно ограничивают модели X-бозона с массой 16,7 MeV, в частности, исключают модель с чисто векторным взаимодействием. Определен потенциал открытия милизаряженных частиц в эксперименте NA64 с электронным и мюонным пучками, см. Рисунок 5.

Показано, что использование мюонного пучка наиболее перспективно и позволит получить рекордные ограничения при массах милизаряженных частиц от 1 МэВ до 500 МэВ. Результаты опубликованы в работах [12,13].



Рисунок 4 – Ожидаемые ограничения на константу связи тёмного фотона є и его массу МА' для распада А' в невидимое состояние, посчитанные для свинцовой мишени и энергии электронного и мюонного пучка E0=100 ГэВ и для различного числа накопленных электронов на мишени. Чёрная непрерывная линия показывает текущие ограничения NA64e для тёмного фотона, посчитанные в точном древесном приближении e- Z-> e-Z A', для статистики 2.86×10¹¹EOT. А чёрные пунктирные линии это ожидаемые ограничения NA64, также посчитанные в точном древесном приближении 5×10¹²EOT. Красные пунктирные линии соответствуют ожидаемым пределам NA64µ для

5×10¹²МОТ и 5×10¹³МОТ соответственно. На рисунке также показаны ограничения на параметры модели тёмного фотона из экспериментов BaBar, E787, E949



Рисунок 5 – Верхний предел на долю электрического заряда Q_{\(\'\)}е гипотетического миллизаряженного фермиона \(\chi\) в зависимости от его массы m\(\chi\). Регионы, окрашенные в серый цвет, это уже закрытые области параметров модели из экспериментальных данных SLACmQ, EDGES и коллайдерных экспериментов

1.2.4. Развитие методов вычисления структурных функций и партонных распределений ядер

Проведено вычисление структурных функций лёгких ядер, включая дейтрон 2H и трехчастичные ядра 3He и 3H, в кинематической области экспериментов JLab. Результаты применены для анализа и интерпретации экспериментальных данных экспериментов BONUS и MARATHON в Jlab. Проведено извлечение нейтронной структурной функции из данных на протоне, дейтроне, а также на ядрах 3He и 3H. Результаты докладывались на конференциях [14,15,17]. Часть результатов опубликована в [16].

Разрабатывается полуфеноменологическая модель структурных функций протона, которая с контролируемой точностью описывает широкую кинематическую область и включает в себя как процессы возбуждения нуклонных резонансов, так и КХД-механизм глубоконеупругого рассеяния. Параметры модели определяются из глобальных КХДфитов, а также из фитов по всей совокупности экспериментальных данных по инклюзивным дифференциальным сечениям рассеяния электронов и мюонов на протоне в резонансной области.

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

1.3.1. Исследование расширенных теорий гравитации Хорндески

В рамках подкласса расширенных теорий Хорндески был предложен пример лагранжиана теории, допускающий полностью устойчивое решение с генезисом. Было изучено поведение линеаризованной теории для данного решения и явно показано, что патологических степеней свободы типа духов и градиентных неустойчивостей действительно не возникает на протяжении всей эволюции. Как скалярные, так и тензорные моды распространяются со скоростями, не превышающими скорость света. Отличительной чертой предложенного сценария с генезисом является асимптотическое поведение теории: и в асимптотическом прошлом, и в асимптотическом будущем теория соответствует системе со скалярным полем в рамках общей теории относительности. Кроме этого, в асимптотическом будущем скалярное поле является каноническим безмассовым.

Помимо полностью устойчивого сценария с генезисом, была построена модель с отскоком в том же подклассе расширенных теорий Хорндески. Предложенное решение не только не содержит духов и градиентных неустойчивостей в обоих секторах возмущений, но и построено так, что и тензорные и скалярные возмущения остаются строго меньшими скорости света, пока теория предполагает существенно модифицированную гравитацию.

В то же время и в асимптотическом прошлом, и в асимптотическом будущем теория описывает Вселенную с каноническим скалярным полем в рамках общей теории относительности.

Простая форма асимптотик теории делает предложенные сценарии перспективными с точки зрения построения на её основе полных моделей реалистичной Вселенной. Результаты опубликованы в работах [18,19].

1.3.2. Астрофизика космических лучей

Проведено исследование модели тёмной материи, состоящей из двух компонент, одна из которых распадающаяся, а вторая стабильная. Изначально указанная модель была введена для объяснения расхождения в значениях космологических параметров, измеренных экспериментом Plank на больших красных смещениях z и другими экспериментами на малых z. Авторами были проведены вычисления развития электронфотонного каскада, произведённого в эпоху рекомбинации z~1000 при распаде частиц тёмной материи в диапазоне масс от 100 ГэВ до 100 ТэВ для нескольких характерных мод распада. Получены ограничения на параметры модели для различных мод распада частицы тёмной материи из требования непревышения измеряемого потока диффузного гамма-излучения и нейтрино в современной Вселенной [20].

реалистичной Ha примере модели происхождения космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) изучены перспективы детектирования крупномасштабной анизотропии потока космических лучей в планируемых орбитальных телескопах, таких как K-EUSO. Продемонстрировано, что несмотря на значительное отклонение КЛСВЭ в галактическом магнитном поле, анизотропия может быть обнаружена с высокой степенью достоверности, если вклад ближайшего источника в поток составляет порядка 10% [21].

Вычислен возможный аксионо-подобных вклад от распада частиц В межгалактический инфракрасный фон И продемонстрирована возможность непротиворечивого объяснения в рамках данного механизма измерений инфракрасного фона в диапазоне длин волн от 0.8 до 1.7 мкм, проведенных в эксперименте CIBER. Результаты опубликованы в работе [22].

Продемонстрирована возможность применения аппарата глубоких сверточных нейронных сетей для определения характеристик частиц, инициирующих широкие атмосферные ливни, по данным наземной решетки детекторов в эксперименте Telescope Array. По сравнению со стандартной реконструкцией, используемой в анализе, указанный метод позволяет улучшить точность определения энергии и направления прихода частиц на 20%-50% [23].

Продемонстрирована возможность применения аппарата глубоких сверточных нейронных сетей для определения среднего массового состава космических лучей сверхвысоких энергий по данным наземной решётки детекторов в эксперименте Telescope Array. Результаты в целом согласуются с предыдущей оценкой, полученной путем анализа набора из 14 синтетических наблюдаемых, причем систематическая ошибка нового метода втрое меньше [24].

Предложен универсальный метод подбора оптимальной тестовой статистики для проверки гипотезы о происхождении космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ). Метод основан на использовании сверточного нейросетевого классификатора, который обучается по смоделированным картам направлений прихода космических лучей. Эффективность метода проверена на примере реалистичной модели происхождения КЛСВЭ [25].

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- A.L. Kataev, S.S. Aleshin, K.V. Stepanyantz. The three-loop Adler D-function for N=1 SQCD regularized by dimensional reduction // JHEP. – 2019. – 1903. – P. 196.
- А.Л. Катаев, В.С. Молокоедов. Метод наименьших квадратов: применение к анализу зависимости от числа легких ароматов соотношения между полюсными и бегущими массами тяжелых кварков // ТМФ. – 2019. – 200:3. – С. 522–531.
- A.L. Kataev, A.E. Kazantsev, K.V. Stepanyantz. On-shell renormalization scheme for N=1 SQED and the NSVZ relation // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – № 6. – P. 477.
- Mikhail Danilov, Sergey Demidov, Dmitry Gorbunov. Constraints on hidden photons from nuclear reactors // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – v. 4. – P. 041801.
- S.Demidov, S.Gninenko, D.Gorbunov. Light hidden photon production in high energy collisions // JHEP. – 2019. – 1907. – P. 162.
- K.O. Astapov, D.V. Kirpichnikov, P.S. Satunin. Photon splitting constraint on Lorentz Invariance Violation from Crab Nebula spectrum // Satunin Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP). – 2019. – 1904. – P. 54 – 69.
- P.S. Satunin. New constraints on Lorentz Invariance violation from Crab Nebula spectrum beyond 100 TeV // European Physical Journal C. – 2019. – 79, v. 12. – P. 1011 – 1020.
- 8. Search for heavy neutrinos and third-generation leptoquarks in hadronic states of two τ leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / S.N.Gninenko et al. // JHEP. 2019. v. 1903. P.170-195.
- 9. Search for dark photons in decays of Higgs bosons produced in association with Z bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / S.N.Gninenko et al. // JHEP. 2019. v. 1910. P.139-171.
- Search for dark matter in events with a leptoquark and missing transverse momentum in proton-proton collisions at 13 TeV / S.N.Gninenko et al. // Phys.Lett. – 2019. – v. B795. – P. 76-99.
- Search for an exotic decay of the Higgs boson to a pair of light pseudoscalars in the final state with two muons and two b quarks in pp collisions at 13 TeV / S.N.Gninenko et al. // Phys.Lett. 2019. v.B795. P.398-423.
- S.N.Gninenko, D.V.Kirpichnikov, M.M.Kirsanov, N.V.Krasnikov. Combined search for light dark matter with electron and muon beams at NA64 // Phys.Lett. – 2019. – v.B796. – P.117-122.
- S.N.Gninenko, N.V.Krasnikov, D.V.Kirpichnikov. Probing millicharged particles with NA64 experiment at CERN // Phys.Rev. – 2019. – v. D100. – P. 035003.
- S.A.Kulagin. Nuclear structure functions/EMC effect. // International Workshop on Nucleon Structure at Large Bjorken x / Kolympari. – Crete, Greece, 16-21 August 2019.
- 15. S.A.Kulagin. International Workshop "From Proton PDFs to Nuclear PDFs. Workshop on Heavy-Quark Hadroproduction from Collider to Astroparticle Physics"// Mainz Institute for Theoretical Physics, Johannes Gutenberg University. – Mainz, Germany, 30 September - 11 October 2019.
- 16. S.A. Kulagin. Nuclear effects in the deuteron in the resonance and deep-inelastic scattering region // Phys. Part. Nucl. – 2019. – vol. 50. – №.5. – P.506-512.
- Summary of the NuSTEC Workshop on Shallow- and Deep-Inelastic Scattering. C. Andreopoulos et al. ArXiv:1907.13252
- В.Е. Волкова, С.А. Миронов, В.А. Рубаков. Космологические решения с отскоком и генезисом в теории Хорндески и ее расширении // ЖЭТФ. – 2019. – т. 156. – вып. 4 (10). – С. 651-666.
- 19. S. Mironov. Mathematical Formulation of the No-Go Theorem in Horndeski Theory
 // Universe. 2019. v. 5. № 2. P. 52.
- 20. Oleg E. Kalashev, Mikhail Yu. Kuznetsov, Yana V. Zhezher. Dark matter component decaying after recombination: constraints from diffuse gamma-ray and neutrino flux measurements // JCAP 1910. – 2019. – №10. – P. 039.
- 21. O. Kalashev, M. Pshirkov, M. Zotov. Prospects of detecting a large-scale anisotropy of ultra-high-energy cosmic rays from a nearby source with the K-EUSO orbital telescope // JCAP 1909. – 2019. – №09. – P. 034.

- 22. Oleg E. Kalashev, Alexander Kusenko, Edoardo Vitagliano. Cosmic infrared background excess from axionlike particles and implications for multimessenger observations of blazars // Phys.Rev. D99. – 2019. – №2. – P. 023002.
- 23. О.Е. Калашев. Using Deep Learning in Ultra-High Energy Cosmic Ray Experiments / 19th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research // Saas Fee. – Switzerland, 10-15 March 2019.
- 24. О.Е. Калашев, М.Ю. Кузнецов. Study Cosmic Ray Mass Composition using Deep Learning in Telescope Array Surface Array Detector / 36th International Cosmic Ray Conference // Madison, WI. USA, 24 July 1 August 2019.
- 25. О.Е. Калашев. Using Machine Learning to Interpret Arrival Directions of Ultra-highenergy Cosmic Rays / Cosmic Ray Anisotropy Workshop // L'Aquilla. – Italy, October 7-11, 2019.

2. Поиск скрытых фотонов в качестве холодной темной материи

В работе предложен новый метод регистрации одиночных электронов, эмитируемых с поверхности металла. Метод позволяет достичь эффективности регистрации одиночных электронов, значительно превосходящий существующие методы с помощью ФЭУ, ВЭУ и другие за счёт использования оригинальной конструкции мультикатодного счётчика. Подробно работа мультикатодного счётчика нами описана в работах [2, 3]. Общий вид счётчика в момент его сборки изображен на Рисунок 6.



Рисунок 6 – Общий вид счётчика

В этом счётчике, схематически изображенным на Рисунок 7, 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 счётчику, где регистрируются за счёт высокого (примерно 10⁵) газового усиления. Рядом со сплошным металлическим катодом располагается второй катод, образованный натянутыми нитями с определённым интервалом, который выполняет функцию сетки в электронной лампе. На этот катод подается либо положительный (относительно потенциала сплошного катода), либо отрицательный (запирающий) потенциал. На рисунках**Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлены картины потенциала полей для этих двух конфигураций.



Рисунок 8 – Потенциалы поля в конфигурации 1



Рисунок 9 – Потенциалы поля в конфигурации 2

На рисунке Рисунок 10 показаны напряженности полей в этих конфигурациях.

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



Рисунок 10 – Напряженности поля в конфигурации 1, 2

Электронная схема измерения состояла из зарядочувствительного предусилителя, платы оцифровки импульсов 8 бит 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 счётчика, и пологим спадом, соответствующим времени восстановления нулевой линии зарядочувствительного предусилителя. Рассматривались только интервалы с малым отклонением нулевой линии от нулевого потенциала.

Проведены измерения скорости счёта одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода при разных температурах, см. рисунок Рисунок 11. Получена рекордно низкая скорость счёта одиночных электронов из металлического катода (0.81 ± 0.08)· 10^{-4} Hz/cm². По результатам измерений получен предел на константу смешивания для скрытых фотонов. Результаты опубликованы в журнале JCAP07 (2019) 008.

В настоящее время продолжается набор статистики на счётчике усовершенствованной конструкции. Результаты измерений обрабатываются. Разработана система охлаждения счётчика на базе элементов Пельтье. Система прошла успешно испытания. Детектор готовится к работе при пониженных температурах.



Рисунок 11 – Результаты измерений с алюминиевым счётчиком



Рисунок 12 – Ограничения на величину константы смешивания по данным, полученным с помощью мультикатодного счётчика с медным (Cu-1, Cu-2) и алюминиевым (Al-1)

катодом

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Gianfranco Bertone and Tim M.P.Tait "A new Era in the Quest for Dark Matter" arXiv:1810.01668.
- A.V. Kopylov, I.V. Orekhov, V.V. Petukhov. A multi-cathode counter in a singleelectron counting mode // NIM. – 2018. – A 910. – P. 164.
- A.V. Kopylov, I.V. Orekhov, V.V. Petukhov. Method of Search for Hidden Photons of Cold Dark Matter Using a Multi-Cathode Counter // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol.82. – №9. – P.1-8.

3. Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей

В расчётах профиля плотности тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр использована метрика, соответствующая первичной чёрной дыре в расширяющейся Вселенной на стадии доминирования излучения с метрикой Шварцшильда, плавно переходящей в космологическую метрику [5], а также реалистичные начальные условия для траекторий движения частиц тёмной материи после их кинетического отщепления от радиации. Полученное в рамках общей теории относительности уравнение движения частиц тёмной материи совпадает с уравнением, которое было ранее получено в работе [3] в ньютоновском приближении и в случае однородного космологического фона. Тем самым, было дано более строгое обоснование этого уравнения. Это обоснование не тривиально, Т.К. рассматривается радиационно-доминированная стадия, когда гравитационное поле создается не только самой чёрной дырой, но и радиацией с неоднородной плотностью, нарастающей по направлению к чёрной дыре. Показано, однако, что наличие этой неоднородности излучения дает лишь малую поправку к основному эффекту.

Перед кинетическим отщеплением частицы тёмной материи связаны с излучением и имеют с ним одинаковую радиальную гидродинамическую скорость. После отщепления частицы движутся свободно. В качестве начальных условий берутся плотность и скорость, полученные в работе [5]. Эти начальные условия отличаются от применявшихся в работе [3], что приводит к изменению рассчитанного профиля плотности тёмной материи во внутренней области, см. Рисунок 13. Численным методом рассчитан радиус точки остановки частиц тёмной материи и найдена итоговая плотность. Рост плотности в полученном профиле несколько подавлен в центре по сравнению с результатами работы [3].

Выполнены предварительные расчёты эффекта аннигиляции частиц тёмной материи в пиках плотности в предположении нестандартного (подавленного) сечения аннигиляции. Показано, что частицы тёмной материи могут быть совместимы с первичными чёрными дырами, составляющими порядка 1/1000 доли всей тёмной материи, как это требует наблюдаемый темп событий LIGO/Virgo. Для этого частицы должны иметь достаточно малое сечение аннигиляции и большую массу – более 1000 ТэВ. Конкретной физической моделью, где реализуется эта ситуация, является модель сверхтяжёлых нейтралино, предложенная в работе Березинского, Кахельриса и Солберга [6].



Рисунок 13 – Профиль плотности тёмной материи вокруг первичной чёрной дыры. Сплошная кривая показывает результат численного расчёта с реалистичной начальной скоростью частиц. Пунктирная кривая соответствует аналитическому выражению, согласно работе [3], а точечная кривая получена в предположении, что начальная скорость

частицы совпадает со скоростью хаббловского потока

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Ю.Н. Ерошенко. Пики плотности темной материи вокруг первичных черных дыр // Письма в Астрон. ж. – 2016. – Т. 42. – С. 389.
- S.M. Boucenna, F. Kuhnel, T. Ohlsson, L. Visinelli. Novel constraints on mixed darkmatter scenarios of primordial black holes and WIMPs. // JCAP. – 2018. – V 07. – P. 003.
- J. Adamek, C.T. Byrnes, M. Gosenca, S. Hotchkiss. WIMPs and stellar-mass primordial black holes are incompatible // Phys. Rev. D. – 2019. – V. 100. – P. 023506.
- Primordial Black Holes as Silver Bullets for New Physics at the Weak Scale/ G. Bertone et al. // - 2019. - электронный препринт arXiv:1905.01238 [hep-ph].
- 5. Е.О. Бабичев, В.И. Докучаев, Ю.Н. Ерошенко. Черная дыра в радиационнодоминированной Вселенной // Письма в Астрон. ж. – 2018. – Т. 44. – С. 537.
- V. Berezinsky, M. Kachelries, M.Aa. Solberg. Supersymmetric superheavy dark matter // Phys. Rev. D. – 2008. – V. 78. – P. 123535.

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

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

4.1.1. Магнитный нейтринный детектор Baby-MIND

Магнитный детектор Baby-MIND, разработанный И созданный при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН, предназначен для измерения треков заряженных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с веществом углеродномишени детектора WAGASCI, что позволит существенно уменьшить водной систематические погрешности, связанные с неопределенностью значений сечений взаимодействия (анти)нейтрино с ядрами кислорода (в составе воды) и углерода (в составе пластического сцинтиллятора). Этот детектор в настоящее время является частью ближнего детектора нейтринного осцилляционного эксперимента Т2К на протонном ускорителе J-PARC, Япония, а в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения Т2НК, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

Детектор Baby-MIND был смонтирован в полном объеме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента T2K в 2019 г. Был начат набор статистики с пучком мюонных нейтрино и антинейтрино под углом 1.5 градуса относительно направления протонного пучка. В течение октября-декабря 2019 г. была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени около 3 × 10²⁰ POT. Мощность протонного пучка составила около 500 кВт. Детектор работал с магнитным полем 1.5 Тесла, что позволило надежно идентифицировать заряд частиц, рождённых при взаимодействии нейтрино в водном детекторе WAGASCI и в детекторе Baby-MIND. Начат анализ данных взаимодействия нейтрино с водородом, водой, углеродом при энергии около 1 ГэВ. Также будут получены данные по сечениям взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядрами железа. Детектор функционирует надёжно. Эффективность работы детектора Baby-MIND во время набора статистики нейтринных событий при включенном пучке составила более 95%. Энергетические спектры, полученые в детекторе Baby-MIND по разными углами относительно направления пучка протонов показаны на Рисунок 14.



Рисунок 14 – Энергетические спектры, полученные в детекторе Baby-MIND под разными углами относительно направления пучка протонов

4.1.2. Сцинтилляционный сегментированный нейтринный 3D детектор SuperFGD

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также для ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения Т2НК (с дальним детектором ГиперКамиоканде), группой ИЯИ РАН разработан детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков объемом 10×10×10 мм³ с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон, и имеет размеры: длина 200 см, ширина 200 см, высота 60 см. Сцинтилляционные сигналы регистрируются микропиксельными лавинными фотодиодами Hamamatsu MPPC S13360-1325CS. Всего детектор состоит примерно из 2 миллионов индивидуальных сцинтилляционных «кубиков» и имеет около 60 тысяч лавинных фотодиодов и каналов электроники. Через каждый кубик проходит 3 волокна по трем направлениям (х, у, z). Тесты с космическими мюонами, а также тесты на пучке в ЦЕРНе прототипа детектора, показали, что всем требованиям эксперимента удовлетворяет электроника, базирующаяся на чипах CITIROC, которые и были приняты в качестве основного элемента. Такая геометрия детектора обеспечивает 3D информацию о заряженных частицах, рождающихся в вершине нейтринного взаимодействия. Было получено временное разрешение лучше 1 нс, порог регистрации протонов 200 МэВ/с. После анализа подученных данных в качестве фотоприёмника был выбран Hamamtsu MPPC S13360-1325PE, обладающий активной

поверхностью 1.3 мм² и имеющий 2668 пикселей, каждый размером 25 × 25 микрон. Этот прибор имеет широкий динамический диапазон, эффективность регистрации фотонов около 30% и низкий cross-talk (меньше 1%). В качестве материала для механического контейнера выбрана сэндвич-структура, состоящая из слоев углепластика и AIREX, в которой будут проделаны более 100 тысяч отверстий для вывода спектросмещающих волокон. Эта структура позволяет получить прогиб в середине детектора всего 3 мм и удовлетворяет сейсмическим требованиям, предъявляемым к механическому контейнеру детектора. Также определена и проработана процедура сборки детектора, включая спектросмещающие волокна, фотоприёмники и электронику. Была разработана система калибровки и контроля детектора на основе оптических волокон и системы светодиодов.

В течение 2019 года была полностью разработана и отлажена процедура массового изготовления методом литья под давлением сцинтилляционных кубиков размером $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$ с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон. Была отлажена и запущена в работу пресс-форма с 10-ю камерами в ООО Унипласт (г. Владимир). В 2019 году в ИЯИ было собрано 25 плоскостей детектора из 900 тысяч кубиков, что составляет около 45% общего объема. Также был создан полномасштабный прототип 3D детектора размером $192 \times 15 \times 56 \text{ см}^3$, который состоит из 160 тысяч кубиков (Рисунок 15). Были выполнены механические испытания, исследован возможный прогиб под действием различных нагрузок, изучены эффекты деформаций, влияющие на параметры спектросмещающих волокон, протестирован механизм сборки детектора и проведены прецизионные измерения полученных параметров.

В декабре 2019 года был проведён сеанс на пучке нейтронов в Лос-Аламосе (США), в ходе которого были измерены параметры прототипа детектора SFGD к нейтронам в области энергий 1 ГэВ. Получена предварительная эффективность регистрации нейтронов с энергиями несколько сотен МэВ около 50%. Анализ всех накопленных данных будет проведен в следующем году.



Рисунок 15 – Слои 3D сцинтилляционного детектора в сборке из лесок. Слева: 16 слоев (из 25, собранных к концу 2019 г.) каждый из 35328 (192×184) кубиков, нанизанных на леску диаметром 1.3 мм. Справа: сборка из 56 более узких слоев, состоящих из 2880 (192×15) кубиков; эта сборка имеет высоту реального детектора, поэтому использовалась для различных механических тестов

4.2. Разработка и создание новых мюонных детекторов для эксперимента следующего поколения по поиску тёмной материи SHiP

4.2.1. Сцинтилляционные счётчики для эксперимента SHiP

В 2019 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 планируется на 2026-2027 гг.

Сотрудники ИЯИ РАН принимают активное участие в НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для двух систем эксперимента SHiP: для временного детектора и для мюонной системы, основная задача которых заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи.

Предложенные ИЯИ РАН сцинтилляционные счётчики, изготовленные методом экструзии на производстве ООО УНИПЛАСТ, г. Владимир, сравнивались с пластинами, изготовленные методом литья фирмой EJEN. Счётчики EJEN показали лучшее временное разрешение и были избраны в качестве основы для временного детектора. С участием сотрудников ИЯИ РАН были изготовлены 120 счётчиков для прототипа временного детектора, которые в 2020 г. будут протестированы с помощью космических лучей. Следует отметить, что данный прототип временного детектора SHiP будет использован в качестве времяпролётного детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (ГиперКамиоканде).

Сотрудники ИЯИ РАН совместно с учеными из Италии разрабатывают активные модули мюонной системы эксперимента SHiP. Одним из вариантов пластин для модулей мюонной системы являются предложенные ИЯИ РАН плитки общей площадью около 200 кв. см, изготовленные в ООО УНИПЛАСТ, г. Владимир. Каждая из этих плиток будет считываться четырьмя фотодиодами SiPM без использования спектросмещающих оптических волокон. Планируется, что эти плитки будут протестированы во Фраскатти на пучке BTF в 2020 г.

5. Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (Т2К). Чувствительный поиск СР нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино

5.1. Продолжение набора статистики в эксперименте T2K по изучению осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в 2019 г.

5.1.1. Осцилляционный анализ данных 2009-2018 гг.

В течение 2019 года в эксперименте Т2К был проведен сеанс с пучком мюонных нейтрино. Мощность протонного 30-ГэВного пучка в сеансе составила 490 кВт, интенсивность пучка в одном банче ускорителя каждые 2.4 с составила 2.5×10^{14} протонов. Всего за сеанс 2019 года был набран интегральный поток протонов на мишени около 2.5×10^{20} РОТ. Эффективность работы детекторов, ближнего ND280 и дальнего Супер-Камиоканде, в ходе набора статистики составила более 98%.

Был выполнен осцилляционный анализ данных, накопленных с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино с 2009 по 2018 год. Анализ данных базировался на интегральном потоке 1.49×10^{21} протонов на мишени (POT) для нейтринной моды и 1.64×10^{21} POT для антинейтринной моды. В ходе анализа событий в дальнем детекторе производился отбор электроноподобных событий (однокольцевое электроноподобное событие). В случае измерений с мюонными нейтрино также добавлялись события с электроном и одним пионом в конечном состоянии. Всего было зарегистрировано 75 электронных нейтрино с одним кольцом и 15 событий с рождением электрона и одного пиона от взаимодействия электронного нейтрино. Кроме того, было зарегистрировано 15 событий, соответствующих появлению электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.

5.2. Поиск СР нарушения в нейтринных осцилляциях

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

Измерение спектра нейтрино и антинейтрино в ближнем детекторе позволило существенно снизить систематические погрешности в измерении числа событий в Супер-Камиоканде с 13-19% до 4-9% в зависимости от регистрируемого лептона и нейтринной моды. В результате анализа были получены новые результаты по поиску СР нарушения (Рисунок 16).



Рисунок 16 – Результаты измерений СР нечётной фазы в эксперименте Т2К (данные 2009-2018 гг.): по горизонтали отложены полученные значения СР нечетной фазы δ_{CP}, а по вертикали – sin²θ₁₃ (сверху) и sin²θ₂₃ (снизу)

Было получено, что наиболее вероятными значениями СР нечётной фазы являются $\delta = (-1.89^{+0.70} - 0.68)$ рад для нормальной иерархии масс и $\delta = (-1.38^{+0.48} - 0.54)$ рад для инверсной иерархии масс. Таким образом, для обоих возможных значений иерархии масс величина δ близка к максимальному СР нарушению. Впервые был получен следующий результат: сохранение СР симметрии ($\delta = 0$ или $\delta = \pi$) исключено на уровне 3 σ (99.73%) в случае инверсной иерархии масс. В случае нормальной иерархии масс исключение $\delta = 0$ или $\delta = \pi$ достигнуто на несколько меньшем уровне доверительной вероятности около 99.0%. Полученный результат подтверждает первоначальное указание T2K на максимальное СР нарушение в лептонном секторе Стандартной Модели.

5.3. Поиск стерильных нейтрино в эксперименте Т2К

5.3.1. Поиск стерильных нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде эксперимента Т2К

Помимо изучения осцилляций трёх *стандартных* нейтринных семейств в эксперименте T2K был проведен поиск осцилляций, которые могут возникнуть, если существуют лёгкие *стерильные* нейтрино, не участвующие в слабых взаимодействиях. В этом анализе рассматривалась простейшая модель «3+1», в которой к трём активным

нейтрино подмешивается одно стерильное нейтрино с новым собственным состоянием аромата v_s и новым массовым состоянием v_4 с массой m_4 . В соответствии с этим обычная PMNS матрица смешивания нейтрино размерностью 3×3 дополняется до новой матрицы размерностью 4×4 . В новой матрице к осцилляционным параметрам стандартных нейтрино добавляются три новых угла смешивания и две новые СР-нарушающие фазы, кроме того, возникают также три дополнительные разности квадратов масс.

В Т2К был проведен анализ данных, набранных в 2010-2017 гг., для поиска возможных осцилляционных эффектов лёгкого стерильного нейтрино из модели «3+1» (3 стандартных + 1 стерильное нейтрино). Ограничения на параметры смешивания стерильного нейтрино ($\sin^2\theta_{24}$, $\sin^2\theta_{34}$, Δm^2_{41}) были получены в результате их варьирования при подгонке экспериментальных данных и ожидаемых значений в 8 специально отобранных образцах. Эти восемь образцов событий, отобранные в дальнем детекторе Супер-Камиоканде, включают в себя: 5 групп событий с нейтринными взаимодействиями посредством заряженных токов ($v_{\mu}CC0\pi$, $\bar{v}_{\mu}CC0\pi$, $v_{e}CC0\pi$, $\bar{v}_{e}CC0\pi$, $v_{e}CC1\pi^{+}$) и три группы событий, в которых нейтрино взаимодействуют посредством нейтральных токов ($vNC\pi^{0}$, \bar{v} NC π^{0} , $vNC\gamma$ -deexcitation). Первые пять образцов являются стандартными для изучения осцилляций активных нейтрино в T2K, а последние три были впервые использованы для поиска стерильных нейтрино. Сечения взаимодействия нейтральных токов нейтральных токов изучены плохо, поэтому их неопределённость дает наибольший вклад в систематические погрешности.

Результат исследований не показал значительных отклонений от модели трёх активных нейтрино и установил новые ограничения на параметры модели «3+1» (см. Рисунок 17): Т2К получил наилучшую верхнюю границу на параметр $\sin^2\theta_{24}$ в области малых разностей квадратов масс $\Delta m^2_{41} < 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/\text{c}^4$.



Рисунок 17 – Области параметров Δm²₄₁ и sin²θ₂₄ справа от разноцветных линий исключены на 90%-м уровне достоверности различными экспериментами: T2K (голубая – нормальная иерархия масс NM, красная – инверсная IH), MINOS/MINOS+ (чёрная) и т.д.

6. 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 нечетным эффектам

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

6.1.1. Результат анализа данных NA62, полученных в сеансах 2016-2017 гг.

В течение 2019 года в рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) продолжалась обработка ранее набранных данных в сеансах 2016 - 2018 гг. В результате анализа примерно 2% данных (сеансы 2016 г.) было получено следующее ограничение на вероятность распада каона на пион и два нейтрино: $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) < 14 \times 10^{-10}$ на 95% уровне достоверности. Этот первый результат продемонстрировал правильность концепции эксперимента.

Затем был проведен анализ данных 2017 года, которые примерно в 6 раз превышают статистику сеанса 2016 года. Для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^+ vv$ в ходе анализа данных реконструируются четырехимпульс p_K начального состояния и четырехимпульс p_{π} конечного состояния, затем с помощью законов сохранения вычисляются «недостающая энергия» (missing energy) и «недостающая масса» (missing mass) в конечном состоянии. Квадрат недостающей массы $m^2_{miss} = (p_K - p_{\pi})^2$ используется для кинематического выделения искомого распада на фоне других мод распада К-мезона. Для подавления фона используется несколько критериев отбора, которые учитывают срабатывание различных детекторов установки: пучкового черенковского счетчика, RICH-детектора, адронного калориметра MUV1 и мюонного детектора MUV3 (вето), а также различных систем, работающих в антисовпадении. Эти меры приводят к значительному подавлению фона: до уровня 10⁻⁸ при сохранении высокой эффективности регистрации сигнала.

На рисункеРисунок **18** показано реконструированное значение квадрата недостающей массы m^2_{miss} в зависимости от измеренного импульса пиона p_{π} в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора. Видно, что в верхней сигнальной области наблюдаются 2 события. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 2.16, а фон – на уровне 1.5 ± 0.3. Суммарный анализ данных 2016-2017 гг. приводит к следующему результату: Br(K⁺ $\rightarrow \pi^+ \nu \nu$) < 1.62 x 10⁻¹⁰ на 95% уровне достоверности или Br(K⁺ $\rightarrow \pi^+ \nu \nu$) = (0.47^{+0.72}-0.47) × 10⁻¹⁰. Анализ данных 2018 г. продолжается.



Рисунок 18 – Реконструированное значение квадрата недостающей массы m²_{miss} в зависимости от измеренного импульса пиона р_л в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора. Точки – экспериментальные данные, серая область – ожидаемая область в Стандартной модели, красные линии – границы сигнальных областей. Наблюдаются 2 события в верхней сигнальной зоне

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

6.2.1. Поиск тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K

Наряду с решением основной задачи по изучению нейтринных осцилляций в эксперименте T2K также проведен анализ данных ближнего детектора ND280 с целью поиска так называемых тяжёлых нейтрино (правых стерильных нейтрино) с массой в диапазоне 140 – 493 МэB/c², которые предсказываются в ряде расширений Стандартной Модели. В частности, в нейтринной минимальной стандартной модели (vMSM) допускается наличие трёх дополнительных типов нейтрино, два из которых могут иметь массы на уровне порядка ГэB/c². Такие тяжёлые нейтрино N могут рождаться наряду со стандартными нейтрино в распадах заряженных каонов ($K^{\pm} \rightarrow e^{\pm}N$; $K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}N$), образовавшихся при соударении протонов пучка с мишенью, а затем должны распадаться ($\tau >> 1$ µs) на частицы Стандартной Модели: $N \rightarrow l_{\alpha}^{+-}\pi^{-+}$, $N \rightarrow l_{\alpha}^{+-}l_{\beta}^{-+}v$ ($\alpha, \beta = e, \mu$).

В эксперименте T2K поиск продуктов распадов тяжёлых нейтрино осуществляется в объеме 6.3 м³ времяпроекционных камер (TPC) ближнего детектора, заполненных газовой смесью на основе аргона. Продукты распадов тяжёлых нейтрино, достигших ближнего детектора ND280, находящегося в 280 метрах от мишени, гораздо легче

обнаружить в газе ТРС, плотность которого значительно меньше плотности остальных детекторов, что обеспечивает более низкий уровень фона от взаимодействий активных нейтрино. Кроме того, ТРС камеры позволяют восстанавливать треки заряженных частиц с разрешением около 8% для импульсов в области 1 ГэВ/с, а также определять тип заряженной частицы по энергетическим потерям dE/dx.

Были проанализированы данные, набранные в 2010 – 2017 гг., соответствующие 12.34×10^{20} РОТ в нейтринной моде и 6.29×10^{20} РОТ в антинейтринной моде. Выбирались события, имеющие 2 трека частиц разных зарядов, исходящие из одной вершины в данной камере ТРС, затем накладывались дальнейшие критерии отбора для подавления фона. Анализ различных контрольных областей показал, что после применения всех критериев отбора фон от взаимодействий стандартных нейтрино находится на весьма низком уровне: меньше двух фоновых событий для всех каналов распада тяжёлых нейтрино. Была проведена оценка вклада всех возможных систематических погрешностей, связанных с неопределённостями потока, сечений взаимодействия активных нейтрино, с погрешностями детектора и модельными теоретическими неопределённостями. После различных проверок в контрольных областях были рассмотрены сигнальные области, в которых не было обнаружено никаких событий, соответствующих тяжёлым нейтрино, что позволило установить верхние границы на параметры смешивания U_e^2 , U_{μ}^2 , U_{τ}^2 . Из Рисунок 19 видно, что результат Т2К сравним с результатами, полученными другими экспериментами (PS191, E949, CHARM). В дальнейшем работа по поиску тяжёлых нейтрино будет продолжена – с новой статистикой и с улучшенными оценками фона, а также рассмотрением рождения тяжёлых нейтрино не только в каонных, но и в пионных распадах.



Рисунок 19 – Верхние границы (90% уровень достоверности) параметров смешивания U_e^2 (слева) U_{μ}^2 (в центре) и U_{τ}^2 (справа) как функции массы тяжёлых нейтрино. Голубые линии, соответствующие результатам T2K, сравниваются с результатами экспериментов PS191,

E949 и CHARM

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

В каонном эксперименте NA62 проведен анализ данных с целью поиска фотонов тёмной материи («тёмных» невидимых фотонов), которые могут образовываться наряду с обычными фотонами. Один из возможных каналов для поиска тёмных фотонов A' – это двухчастичный распад каона с последующим распадом нейтрального пиона: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$; $\pi^0 \rightarrow A' \gamma$. В результате этой цепочки распадов в конечном состоянии регистрируются положительный пион и фотон Стандартной Модели, а наличие тёмного фотона определяется по пику в спектре недостающей массы $M^2_{miss} = (p_K - p_{\pi} - p_{\gamma})^2$ – после вычета фона, в частности, от основного распада $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$, при котором один из фотонов не был зарегистрирован. Анализ данных, включавших в себя 4.12×10^8 нейтральных пионов из распадов $K^+_{\pi 2}$, соответствующих 1% всей статистики, собранной в 2016-2018 гг., не привёл к обнаружению тёмных фотонов, при этом установлена верхняя граница на константу взаимодействия тёмного фотона $\epsilon^2 \sim 10^{-7}$, имеющего массу в диапазоне 30-130 МэВ/с². Работа по анализу остального массива данных будет продолжена.

Для объяснения так называемой проблемы сильного СР нарушения КХД в теорию вводится очень лёгкая частица – аксион, а различные расширения такой теории

предсказывают существование аксионо-подобных частиц (ALPs), масса которых может лежать в диапазоне МэВ-ГэВ. Эти частицы могут взаимодействовать с частицами Стандартной Модели, в частности, распадаться на два фотона. Монте-Карло расчёты показывают, что при определённых условиях NA62 может достичь наилучшей чувствительности к таким распадам в течение 5 лет в диапазоне масс ALP до ~300 MэB/c². Продолжается работа над оптимизацией критериев отбора событий для поиска ALP-частиц.

На основе данных 2017 г. в эксперименте NA62 выполнен поиск запрещённых процессов с нарушением лептонного числа $K^+ \rightarrow \pi^- l^+ l^+ (l = e, \mu)$. Данный поиск основан на методе "слепого" анализа, при котором необходимо детальное предсказание фоновых событий в сигнальной области. Для данного анализа было набрано 7.94 × 10¹¹ распадов каонов для мюооной моды и 2.14 × 10¹¹ для электронной моды. Полный аксептанс для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ равен 9.81% (10.93% для процесса стандартной модели $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$), полный аксептанс для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ равен 9.81% (10.93% для процесса стандартной модели $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$), полный аксептанс для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$ равен 4.98% (3.87% для процесса стандартной модели $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$). Для распада $K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$ ожидаемое число фоновых событий в сигнальной области равно 0.16 ± 0.02, а в эксперименте не найдено ни одного события. Для распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ ожидаемое число фоновых событий в сигнальной области равно 1 событие. Таким образом, установлены следующие ограничения на процессы с нарушением лептонного числа: BR($K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$) < 4.2 × 10⁻¹¹, 90% CL; BR($K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$) < 2.2 × 10⁻¹⁰, 90% CL, что улучшает текущие ограничения в 2-3 раза.

7. Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в эксперименте NOvA с пучком мюонных антинейтрино

Важнейшие результаты, полученные в 2019 году.

В рамках модели для описания квазиупругого рассеяния лептонов на ядрах с учетом вклада двух-частичных токов обменных мезонов и изобарных токов из данных эксперимента MiniBooNE по рассеянию нейтрино в сцинтилляторе, получены значения аксиальной массы нуклона 1.2 ГэВ. Для эксперимента НОВА вычислены усредненные по спектру нейтрино сечения квазиупругого рассеяния нейтрино в ближнем детекторе с учетом вкладов токов обменных мезонов.

Для экспозиции антинейтринного пучка 12.33×10²⁰ протонов на мишень получены следующие результаты.

7.1. Регистрация мюонных нейтрино

На дальнем детекторе зарегистрировано 102 события (включая 9 фоновых событий), рожденных мюонными антинейтрино. В отсутствии осцилляций ожидалось 476 событий.

7.2. Регистрация электронных антинейтрино

На дальнем детекторе зарегистрировано 27 событий (ожидаемый фон 10.3 событий), от взаимодействия электронных антинейтрино $v_{e,}$, которые появились в пучке мюонных антинейтрино из-за $v_{\mu} \rightarrow v_{e}$ осцилляций. Впервые такие переходы были зарегистрированы с достоверностью 4.4 стандартных отклонения.

В результате подгонки спектров мюонных и электронных событий, измеренных в нейтринных и антинейтринных пучках, как функций параметров $\Delta m_{32}^2 | = |m_3^2 - m_2^2|$ - разности квадратов масс нейтрино, угла смешивания θ_{23} и фазы нарушения СР-инвариантности δ_{CP} получены 1 σ доверительные интервалы для значений этих параметров при нормальной иерархии масс нейтрино (m₁<m₂<m₃): Δm_{32}^2 (10⁻³эВ²) – [2.42, 2.59], sin² (θ_{23}) – [0.53, 0.60], $\delta_{CP}(\pi)$ – [-0.4, 1.3]. Обратная иерархия масс нейтрино (m₃<m₁<m₂) исключается на 90% доверительном уровне. Спектры событий от электронных нейтрино и антинейтрино на дальнем детекторе представлены на Рисунок 20. Полученные ограничения (90% доверительный уровень) на разности квадратов масс нейтрино Δm_{32}^2 и значения *sin²* (θ_{23}) угла смешивания θ_{23} представлены на Рисунок 21 в сравнении с результатами других экспериментов.



Рисунок 20 – Спектры событий от электронных нейтрино и антинейтрино на дальнем детекторе



Рисунок 21 – Ограничения на разности квадратов масс нейтрино Δm^2_{32} и значения sin^2 (θ_{23}) угла смешивания θ_{23}

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

8.1. Полученные в 2019 году результаты

8.1.1. Очистка спектрометра от остаточного трития. Снижение фона.

Была разработана методика очистки от трития и контроля процесса для случая малых загрязнений тритием. В течение нескольких месяцев многократно проводились наполнения объёма спектрометра с давления высокого вакуума до давления 2-3 мбар парами воды и газообразного водорода. После определённой временной выдержки и прогрева стенок спектрометра до температуры около 100°С, вода скачивалась и собиралась для последующего контроля активности трития в отобранных пробах во ВНИИНМ. В результате очистки достигнут уровень фона в спектрометре, который позволяет проводить дальнейшие измерения по поиску стерильных нейтрино в распаде трития. Процедура минимизации заключалась в удалении остаточного трития из стенок спектрометра и преспектрометра посредством изотопного обмена в воде. Для этого спектрометр наполнялся из режима глубокого вакуума 20 миллилитрами воды до давления 1-2 миллибар с выдержкой от несколько дней до 2-3 недель с последующей откачкой и сбором воды. Контроль состава воды осуществлялся в институте ВнИИНМ им. Бочвара. Выполнен ряд расчётов по оптимизации магнитного поля спектрометра, на основе которых намотаны дополнительные обмотки корректирующих полей. Основная задача новых обмоток состоит в дальнейшем понижении фона в спектрометре. В совокупности, установлены две соленоидные обмотки диаметром 2.5 м и длиной по 4 метра поверх корпуса спектрометра. Проведён завершающий технологический сеанс по измерению остаточного фона.



Рисунок 22 – Слева - счет фона спектрометра в зависимости от напряжения на электроде в старой конфигурации полей. Справа - фон при различных значениях тока в дополнительных обмотках, 5А (верхние точки), 10А, 15А и 20А (самые нижние точки)

8.2. Расчеты отклика детектора на падающие электроны

В 2019 году продолжались расчёты отклика кремниевого детектора при регистрации электронов от распада трития. Такие расчёты важны для сравнения с экспериментом и для дальнейшего использования при оценке числа событий ниже порога регистрации аппаратуры.



Рисунок 23 – Расчет формы спектра при падении электронов с энергией 10 кэВ на кремниевый детектор с учетом влияния электростатического и магнитного отражений рассеянных электронов в полях спектрометра



Рисунок 24 – Сравнение экспериментальных и расчетных спектров при разных энергиях электронов

8.3. Участие в 2019 году в научных мероприятиях

1. ACAT-2019, Alexander Nozik, DataForge: declarative approach to scientific data processing automation. (https://indico.cern.ch/event/708041/contributions/3276140/).

2. ACAT-2019, Alexander Nozik, Kotlin - new language for scientific programming.

(https://indico.cern.ch/event/708041/contributions/3276141/).

3. KotlinConf-2019, Kotlin for science, Alexander Nozik. (https://kotlinconf.com/talks/5-dec/114818).

4. AYSS-2019, Alexander Nozik, Kotlin language for science and kmath library. (https://indico.jinr.ru/event/756/session/4/contribution/316).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- A.I. Belesev et al. An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from 'Troitsk nu-mass' data // JETP Lett. -2013. - 97. - P. 67 [arXiv:1211.7193].
- D.A. Abdurashitov et al. First measurements in search for keV sterile neutrino in tritium beta-decay in the Troitsk nu-mass experiment // JETP Letter. - 2017. - 105. -P. 753 [arXiv:1703.10779].
- D.A. Abdurashitov et al. The current status of "Troitsk nu-mass" experiment in search for sterile neutrino // JINST 10. – 2015. – T1005. [arXiv:1504.00544].

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

9.1. Проект КАТРИН

В основе установки КАТРИН [12] лежит электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией, предложенный в 1983 году советскими физиками, членами - корреспондентами АН СССР, В.М.Лобашевым и П.Е. Спиваком [13]. 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 [14]. 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, базирующийся в Институте технологий Карлсруэ, Германия включает примерно 150 исследователей из 20 институтов 7 стран [14].

Структура установки КАТРИН повторяет схему «Троицк ню-масс».



Рисунок 25 – Установка КАТРИН

RS-задняя стенка, DPS-R- задняя дифференциальная откачная станция, WGTSбезоконный газовый источник трития, DPSF-1- передняя откачная станция-1, DPSF-2 передняя откачная станция-2, CPS-криогенная откачная станция, PS- предварительный спектрометр, MS- основной спектрометр, FPD- основной детектор электронов

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 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 несёт информацию о массе нейтрино. Измерение переменного тормозящего электрического потенциала в диапазоне от 16 до 35 кэВ проводится на уровне точности в несколько ррт, что позволяет получить беспрецедентную точность в спектроскопии электронов распада трития.

В 2018 году завершена подготовка установки к проведению исследований спектра трития в проектном режиме. Первый тритий был запущен с систему 11.06.2018 на уровне 1% от номинальной величины. Система циркуляция трития была запущена не в полном объеме, и инжекция проводилась из заранее подготовленных сосудов с готовой смесью. Были проведены первые измерения спектра трития и протестированы системы перехвата ионов трития между источником и спектрометром.

Полностью система циркуляции в газовом источнике была опробована в сеансе 03.09 – 22.10.2018. В качестве циркулирующего газа использовался чистый дейтерий. Была продемонстрирована устойчивая работа системы при объёме газа в источнике от 1% до 100% от номинального значения. Осуществлялась постоянная очистка от неводородных газов. Проведен запуск «задней секции», содержащей позолоченный электрод для выравнивания электрического потенциала в газовом источнике и электронную пушку для генерирования тестового пучка электронов. Были испытаны разные схемы засветки фотокатода расположенной в «задней секции» электронной пушки, опробован метод проводки электронного пучка через канал транспортировки и.т.д. При разных толщинах источника была проведена серия измерений спектра неупругих потерь электронов в дейтерии. Причем измерения проводились как в режиме интегрального спектрометра, так и в режиме спектрометра по времени пролёта.

Весной 2019 года был проведён четырехнедельный цикл измерения массы нейтрино с молекулами DT и D_2 в качестве источника. Несмотря на то, что содержание трития составляло только 25% от номинального, анализ данных привёл к ограничению на эффективную массу электронного антинейтрино $m_v < 1$ эВ, что превосходит по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты [16].

В настоящее время на установке КАТРИН продолжается набор статистики и в самом ближайшем будущем следует ожидать дальнейшего улучшения предела на эффективную массу электронного антинейтрино.



Рисунок 26 – Спектр электронов распада трития вблизи граничной точки, измеренный в первом сеансе КАТРИН. Вверху: абсолютные единицы; внизу: отклонения от теоретического спектра, делённые на экспериментальные ошибки [16]

9.2. Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН

9.2.1. Измерения спектра потерь энергии при рассеянии электронов на молекулах дейтерия D₂

Функция потерь энергии при рассеянии электронов на молекулах трития в источнике КАТРИН является одним из важнейших компонентов модели интегрального спектра электронов, измеряемого в эксперименте. Рассеяние электронов модифицирует функцию отклика экспериментальной установки (см. Рисунок 27). Экспериментальные и теоретические неопределённости функции потерь энергии дают вклад в неопределённость измеренной массы нейтрино. Измерение функции потерь стало одной из ключевых задач технического сеанса КАТРИН осенью 2018 года. Обработка данных, полученных в ходе калибровочных измерений этого сеанса, дала возможность существенно уменьшить статистические неопределённости функции потерь.

Для измерения функции потерь был использован источник моноэнергетических фотоэлектронов с энергиями порядка 18 кэВ (электронная пушка, Рисунок 28), смонтированный в задней части тритиевого источника КАТРИН. Пушка имеет два режима работы: режим постоянного тока электронов (с помощью постоянного источника ультрафиолетового излучения с различными длинами волн) и режим импульсной генерации электронов с помощью ультрафиолетового лазера (с частотой импульсов 20-

100 кГц, длина волны 266 нм). Оба режима были использованы при измерении функции потерь.



Рисунок 27 – Функция отклика эксперимента КАТРИН (вверху), измеренная функция



Beam splitter + I

Fiber transport to electron gun

потерь (внизу)

Моноэнергетические электроны от пушки проходят через источник КАТРИН с газом одного из изотопов водорода (для калибровочных измерений был использован дейтерий D₂), часть из них рассеивается на молекулах газа и теряет энергию. Модифицированный спектр электронов измеряется с помощью основного спектрометра КАТРИН. Фитирование полученного спектра позволяет извлечь информацию о функции потерь (вероятности потерять данное количество кинетической энергии в процессе

Рисунок 28 – Схема устройства электронной пушки

потерь (вероятности потерять данное количество кинетической энергии в процессе рассеяния). Плотность газа в источнике влияет на вероятность рассеяния за время прохождения всего газового источника КАТРИН.

Импульсный режим работы электронной пушки допускает использование дополнительной информации о времени пролёта электронов через все компоненты установки КАТРИН (~ 70 м). При этом электроны с энергией, близкой к запирающему напряжению, будут существенно замедляться в основном спектрометре, и их время пролёта будет существенно превышать время пролёта электронов с энергией, сильно отличающейся от величины запирающего напряжения. Такая схема позволяет получить информацию об энергии электронов, измеряя дифференциальный спектр энергий. Для фиксирования информации о времени пролёта проводится синхронизация времени импульсов лазера и времени детектирования электронов в детекторе. Пример преобразования времени пролёта электрона через основной спектрометр в энергию приведён на рисункеРисунок **29**. Три линии на графике представляют собой три различных способа калибровки (время-энергия): упрощённая модель потенциала (постоянный потенциал в некоторой области спектрометра), полноценное моделирование потенциала и времени пролёта с помощью специализированного программного пакета KASSIOPEIA, а также калибровка на основе самих данных (используя нерассеянные, т.е. прошедшие источник без рассеяния электроны).



Рисунок 29 – Соответствие между временем пролёта электрона через спектрометр КАТРИН и превышением энергии электрона над запирающим напряжения (калибровка на данных, упрощённая и полная модели)

Для каждого запирающего напряжения, таким образом, измеряется наблюдаемое время пролёта электронов. Пример распределения электронов по времени приведён на рисункеРисунок **30** (для запирающего напряжения на 15 В меньшего, чем начальная энергия электронов).

Для получения модели распределения электронов по времени необходимо провести преобразование функции потерь (см. рисунокРисунок **31**). Следуя правилам перехода к новым переменным в распределении и используя функцию из рисункаРисунок **29**,

получим модель для распределения времён пролёта. На рисункеРисунок **32** приведён пример суперпозиции модели и экспериментальных точек.



Рисунок 30 – Распределение электронов по времени пролёта для стартовой энергии электронов, превышающей запирающее напряжение на 15 В



Рисунок 31 – Модель функции потерь энергии электронов при однократном рассеянии на молекуле D₂



Рисунок 32 – Распределение электронов по времени прилёта: модель и данные

В рассуждениях выше не учитываются некоторые эффекты, приводящие к дополнительной размазке распределений. Такими эффектами могут быть неопределённость начальных энергий электронов и начального времени, временно́е разрешение детектора и другие. Эти эффекты приводят к уширению пика нерассеянных электронов до 0.7 мкс (см. рисунокРисунок **30**).

В ходе обработки данных калибровочных измерений функции потерь с электронной пушкой в режиме времени пролёта получены следующие результаты:

достигнуто максимальное использование всех данных;

проверяется соответствие результатов, полученных в других методах измерения функции потерь;

 отклонения модели от данных при больших энергиях электронов можно связать с неточным знанием функции преобразования времени пролёта в энергии электронов.

– интегро-дифференциальный спектр электронов, полученный с помощью импульсного источника электронов и синхронизации импульсов и времени детектирования электронов, позволяет получать данные о функции потерь с беспрецедентной точностью (см. рисунокРисунок 27).

9.2.2. Уменьшение фона спектрометра КАТРИН с помощью специальных конфигураций электромагнитных полей в спектрометре.

Фоновые события при измерении спектра электронов бета-распада трития в эксперименте КАТРИН уменьшают чувствительность к массе нейтрино. Фоновые электроны имеют два основных источника: это вторичные электроны от распада радона-219 в объёме спектрометра и ионизация атомов водорода, находящихся в сильно возбуждённых, так называемых ридберговских, состояниях.

Распад радона в спектрометре сопровождается появлением высокоэнергетических электронов, которые оказываются запертыми в объёме спектрометра, представляющего собой электромагнитную ловушку. Такие электроны постепенно теряют энергию при рассеянии на остаточном газе в спектрометре, порождают множество вторичных электронов при ионизации газа. Электроны могут потерять большую часть кинетической энергии и попасть в детектор.

Атомы водорода в ридберговских состояниях образуются из-за радиоактивных распадов свинца-210 в стенках спектрометра и, являясь нейтральными частицами, могут свободно двигаться в объёме спектрометра, где они ионизируются тепловым излучением, образуя низкоэнергетические электроны, которые ускоряются электрическим полем и попадают в детектор.

Поскольку плотность ридберговских атомов примерно одинакова во всём спектрометре, основным способом уменьшения их вклада в фон эксперимента оказывается уменьшение объёма спектрометра, проецируемого на детектор. Для этого можно, например, увеличить магнитное поле в центре спектрометра, «сжав» тем самым



Рисунок 33 – Функция пропускания спектрометра КАТРИН, зависящая от магнитных полей в анализирующей плоскости



Рисунок 34 – Схематическое изображение объёма трубки тока электронов в спектрометре КАТРИН для номинальной симметричной конфигурации (АР) и конфигурации со смещённой анализирующей плоскостью (SAP)

Объем спектрометра, который проецируется на детектор, можно уменьшить смещая поверхность с наибольшим потенциалом (анализирующую плоскость) в сторону детектора. В этом случае объём после анализирующей плоскости оказывается существенно меньше, а разрешение по энергии оказывается сопоставимым или даже лучшим, чем для не модифицированной конфигурации. Этот метод проиллюстрирован на рисункеРисунок **34**, он получил название метода смещённой анализирующей плоскости (shifted analyzing plane, SAP). Изменение конфигурации полей производится с помощью специальных теплых соленоидов (см. рисунокРисунок **35**) и электродов внутри спектрометра КАТРИН. Поля настраиваются таким образом, чтобы минимум магнитного поля совпадал в пространстве с минимальным потенциалом (см. рисунокРисунок **36**). Это гарантирует оптимальные условия для функции пропускания спектрометра и разрешения по энергии.

Для демонстрации эффективности этого подхода к уменьшению фона была проведена серия измерений числа фоновых событий в ряде конфигураций электромагнитных полей со смещённой анализирующей плоскостью. На рисункеРисунок 37 приведены результаты измерения скорости счёта фоновых событий для стандартной конфигурации КАТРИН (0) и для модифицированных конфигураций (1-18). Рисунок 37

71

эффективный объём. Однако, увеличение поля ухудшает энергетическое разрешение эксперимента, снижая чувствительность к массе нейтрино (см. рисунок Рисунок **33**).

показывает, что фон может быть уменьшен в 2.3 раза при использовании смещённой анализирующей плоскости.



Рисунок 35 – Система теплых магнитов для формирования магнитного потока внутри спектрометра КАТРИН



Рисунок 36 – Потенциал и магнитное поле для конфигурации со смещённой анализирующей плоскостью, смещение составляет примерно 6 м в направлении детектора

Скорость счёта зависит от объёма спектрометра после анализирующей плоскости. Рисунок 38 иллюстрирует сильную связь между объёмом и скоростью счёта. Однако, зависимость не является прямо пропорциональной. Для исследования влияния других параметров были предложены и протестированы несколько параметризаций, наилучшее согласие достигнуто в модели с линейной зависимостью от объёма и экспоненциальной зависимостью от величины магнитного поля в анализирующей плоскости (величина магнитного поля определяет форму трубки тока электронов, а также условия для магнитной экранизации). Все полученные результаты хорошо описываются данной
моделью, различия между моделью и данными согласуются со статистическими флуктуациями (см. рисунок **39**).



Рисунок 37 – Результаты измерения скорости счёта фоновых событий в различных конфигурациях электромагнитных полей в спектрометре КАТРИН



Рисунок 38 – Зависимость скорости счёта фоновых электронов от объёма спектрометра, проецируемого на детектор



Рисунок 39 – Отклонения модели для скорости счёта от измеренного значения, нормированные на величину статистической неопределённости

9.2.3. 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 ^{83m}Kr, которые используются при исследовании параметров спектрометров [17].

Частично задача решается за счет секционирования детектора и организации независимой регистрации сигналов от каждой секции. Тем не менее, состоит задача обеспечить скорость счета 10⁶–10⁷ в секунду для каждого единичного сектора.

Изначально в качестве детектора предполагалось использовать газонаполненый счётчик с тонким входным окном [18]. Однако затем он был заменён на более подходящий для работы в условиях сильного магнитного поля и высокого вакуума полупроводниковый детектор, на котором были набраны все экспериментальные данные [19]. В основном, это были изготовленные в ПИЯФ (Гатчина) по нашему заказу плоские Si(Li) детекторы с диаметром чувствительной области 17 мм, ёмкостью порядка 15 пФ со слоем золота (позже – палладия) 20 мкг/см², охлаждаемые до температуры жидкого азота.

Данные детекторы вполне удовлетворяли требованиям, предъявляемым при поиске массы нейтрино (диапазон энергий 18–18.6 кэВ и темп счёта до 3–5 кГц), но для поиска стерильных нейтрино требуется снижать регистрируемую энергию как минимум, до 12 кэВ и ниже. Темп счёта при измерении бета-спектра при уменьшении энергии возрастает квадратично, а в нашем случае интегрального спектрометра как кубическая функция. Соответственно, существующий детектор не соответствовал новым предъявляемым требованиям.

В качестве возможных кандидатов на роль нового детектора экспериментальные образцы микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) без защитного покрытия, с очень тонким входным окном [20. Была проведена серия тестовых измерений с различными источниками электронов [21, разработаны и испытаны несколько моделей предусилителей, а также методика вывода быстрого сигнала из вакуумного объёма. Однако данный тип детекторов показал невысокое энергетическое разрешение и недостаточную надёжность из-за полного отсутствия защитного покрытия (оно не наносилось, чтобы исключить поглощение в нечувствительном слое низкоэнергетичных электронов). К особенностям МЛФД можно отнести резкое увеличение коэффициента усиления при незначительном изменении напряжения смещения или при изменении температуры [22]. Подбор близких по усилению детекторов для многосекционной сборки возможен, но несколько затруднён из-за разброса параметров отдельных детекторов в пределах одной пластины.

Поиск возможных кандидатов на роль будущего детектора привёл к другим полупроводниковым приборам. Это детекторы отраженных электронов (ДОЭ - Si APD), которые представляют собой кремниевые фотодиоды с мелкозалегающим p-n-переходом, применяемые в электронных микроскопах [23, 24]. Принцип работы кремниевого детектора электронов основан на поглощении электронов в приповерхностной области детектора, генерации этими электронами неосновных носителей заряда в кремнии, с последующей регистрацией токового сигнала трансимпедансным (transimpedance amplifier, TIA) или зарядочувствительным (charge-sensitivev preamplifier, CSP) усилителями (см. рисунокРисунок **40**).



Рисунок 40 – Структура детектор электронов на основе Si APD: 1 – металлический контакт, 2 – p++ слой толщиной 30 нм, 3 – база p-типа толщиной 320 мкм, 4 – p+ слой формирующий условия для лавинного умножения толщиной 10 мкм, 5 – n++ слой толщиной 0.5 мкм, 6 – диоксид кремния

Детектор был протестирован при помощи электронной пушки, изготовленной в ИЯИ РАН для совместного проекта в Исследовательском центре Карлсруэ (КІТ), а так же на стенде непосредственно в ИЯИ РАН. Использовался предварительный усилитель собственной разработки на базе операционных усилителей ОРА657 в первом каскаде и ОРА695 во втором. Схема одного из вариантов усилителя приведена на рисунке Рисунок 41. Мы его испытывали как снаружи вакуумной камеры, так и внутри. Естественно, что при коротком расстоянии, когда детектор припаян непосредственно к плате усилителя, соотношение сигнал/шум является максимальным, однако и при выносе усилителя из вакуумного объёма на расстояние до 100–200 мм оно так же остаётся приемлемым. При этом полностью убираются проблемы как вывода лишнего тепла из вакуума, так и ухудшение вакуума за счёт развитой поверхности платы и смонтированных элементов.



Рисунок 41 – Усилитель РА-5, вторая версия

В КІТ детектор был подключен на расстоянии 20 см от предусилителя и просканирован пучком электронов, сформированным на стенде, состоящем из электронной пушки и магнитно-фокусирующей системы. Уверенный сигнал на фоне шумов был виден, начиная от 4 кэВ (рисунки Рисунок 42, Рисунок 43).



Рисунок 42 – Спектр от электронов с энергией 5–30 кэВ, полученный в КІТ на стенде с электронной пушкой



Рисунок 43 – Сигнал от единичного электрона с энергией 20 кэВ от электронной пушки в КІТ. Предусилитель вынесен из вакуумного объёма на расстояние около 20 см от детектора. Длительность импульса ~40 нс, амплитуда ~60 мВ

Таким образом, результаты исследований показали, что исследованные детекторы отраженных электронов с внутренним усилением являются весьма перспективными и для других видов применений в тех областях, где требуется регистрация большого потока электронов с энергиями больше 500 эВ, в частности, при измерениях бета-спектра трития

в широком диапазоне. К преимуществам следует отнести достаточную чувствительность, работу при комнатных температурах, слабую зависимость сигнала от напряжения смещения на детекторе. Вопросы температурной стабильности и радиационной стойкости еще не рассматривались и требуют изучения.

Более подробное описание выполненных работ содержится в статье [25].

Статья принята к опубликованию в Журнале технической физики в апреле 2020.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- First measurement of neutrino oscillation parameters using neutrinos and antineutrinos by NOvA / M.A. Acero et al. // Phys. Rev. Lett. – 2019. – 123. – P. 151803.
- The status of the MARE experiment with¹⁸⁷Re and ¹⁶³Ho isotopes / E. Ferri et al. // Physics Procedia. – 2015. – 61. – P. 227 – 231.
- 3. URL:

https://indico.mpp.mpg.de/event/6065/attachments/10997/12323/giachero.MPPSemin ar.pdf

- Status of the HOLMES Experiment to Directly Measure the Neutrino Mass / Nucciotti, A., Alpert, B., Balata, M. et al. // J Low Temp Phys. – 2018.
- Direct neutrino mass measurement by the HOLMESexperiment IOP / Nucciotti, A. e.al. // Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1056. – P. 012039.
- 6. URL: https://www.kip.uni-heidelberg.de/echo/
- 7. URL: https://www.project8.org/
- 8. 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan.
- 9. URL: https://arxiv.org/abs/1204.5379
- 10. URL: http://arxiv.org/abs/1409.0920
- 11. URL: https://arxiv.org/abs/1909.02898
- 12. arXiv:hep-ex/0109033v1
- V.M. Lobashev P.E. Spivak. A method for measuring the antineutrino rest mass // NIM. – 1985. – A240. – P. 305-310.
- V. M. Lobashev. The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN // Nuclear Physics. – 2003. – A719. – P. 153-160.
- 15. URL: https://www.katrin.kit.edu/

- 16. An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN / M. Aker et al. (KATRIN Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2019. 123. 221802.
- 17. High-resolution spectroscopy of gaseous ^{83m}Kr conversion electrons with the KATRIN experiment / K. Altenmüller et al. // arXiv:1903.06452v2
- Детектор мягких электронов для работы в сильных магнитных полях / С.Н. Балашов и др. // Препринт ИЯИ АН СССР.– 1989. – П-0616.
- 19. Система сбора данных в эксперименте по поиску массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития на установке "Троицк ню-масс" / А.И. Берлёв, и др. // Препринт ИЯИ РАН. – 2003. – Р-1103.
- Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes and a Compact Matrix on Their Basis / Z. Sadygov et al. // Phys. Part. Nuclei Lett. - 2013. - 10. - P. 780.
- Исследование возможности создания детектора электронов низких энергий на основе микропиксельного лавинного фотодиода / Берлев А. И., Голубев А.А., Задорожный С. В., Титов Н.А. // Препринт ИЯИ РАН. – 2017. – 1432/2017.
- Temperature dependence of the thin dead layer avalanche photodiode for low energy electron measurements / K. Ogasawara et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2009. A611. P. 93–98.
- 23. A comparison of the temperature dependences of photoeffect quantum efficiencies in GaAs *p-n* structures and Schottky diodes / Yu.A. Goldberg et al. // Semiconductors. 1999. 33. P. 343.
- 24. Характеризация полупроводниковых детекторов монокинетических и отражённых электронов с энергией 1-30 кэВ / А. В. Гостев и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Том 72. № 11. С. 1539-1544.
- 25. Исследование свойств детектора отраженных электронов (ASPD) как перспективного детектора для установки «Троицк ню-масс» в диапазоне энергий 5-30 кэВ / П. Н. Аруев и др. // Статья принята к опубликованию в Журнале технической физики в апреле 2020.

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

До конца 2019 года продолжалась эксплуатация действующей установки GERDA-II. Российские учёные участвовали в эксплуатации установки. Общий вид установки, расположенной в подземной лаборатории LNGS INFN в Гран-Сассо в Италии показан на Рисунок 44.



Рисунок 44 – Общий вид установки, расположенной в подземной лаборатории LNGS INFN в Гран-Сассо

«Голые» германиевые детекторы погружены в криостат, заполненный 64 м³ жидкого аргона, имеющего температуру –190°С. Криостат находится в водяном резервуаре объемом 590 м³, который, в свою очередь, расположен в подземной лаборатории Гран Сассо, защищающей установку от космического излучения. Аргон и вода, используемые в установке, являются очень чистыми и служат дополнительной защитой от окружающей радиоактивности. При этом предусмотрена возможность регистрации событий, вызванных фоновым излучением, что позволяет успешно идентифицировать фоновые сигналы, возникающие в аргоне и воде.

На рисунке Рисунок 45 показан момент сборки гирлянды германиевых детекторов перед опусканием в жидкий аргон.



Рисунок 45 – Момент сборки гирлянды германиевых детекторов перед опусканием в жидкий аргон в чистой атмосфере

Новейшие методики подавления фоновых сигналов обеспечили рекордно низкий уровень фона, что позволяет считать GERDA первым «безфоновым» экспериментом по поиску двойного безнейтринного бета распада.

В конце 2019 года достигнута экспозиция 82,4 кг·лет и набор экспериментальных данных прекращён. Получен нижний предел на период полураспада $T_{2}^{1/2} > 0.9 \times 10^{26}$ лет (90% уровне достоверности). Этот результат опубликован в 2019 году в журнале Science. Российские учёные являются авторами этого результата. Комбинируя этот результат с результатами других экспериментов, получена чувствительность к абсолютной шкале масс в бета распаде: 0.15 - 0.44 эВ.

Начата разработка эксперимента LEGEND, который является продолжением эксперимента GERDA. В LEGEND также, как и в GERDA, предусмотрено две фазы. Первая из них (LEGEND-200) с 200 кг детекторов из обогащенного Ge-76 будет проводиться на базе модифицированной установки GERDA.

В 2019 году в рамках эксперимента Double Chooz был сделан анализ измерения

угла смешивания нейтрино θ_{13} по полному поглощению нейтрона в детекторе, как на Gd, так и на водороде. Получено улучшенное по точности значение угла смешивания θ_{13} : $\sin^2 2\theta_{13} = 0.105 \pm 0.014$. Такой анализ позволил увеличить статистику спектра антинейтрино в три раза и обогнать эксперимент RENO.

Завершен анализ данных по измерению сечения взаимодействия антинейтрино с протоном. Значение сечения находится в согласии с данными других экспериментов (5.71 ± 0.6) х 10⁻⁴³ см²/деление.

Принята в печать статья в Nature Physics.

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

11.1. Сезонные вариации атмосферных мюонов в LVD

11.1.1. Вариации потока мюонов за 24 года работы детектора LVD

Проанализировали временные ряды более чем 5 × 10⁷ мюонов, зарегистрированных детектором LVD в течение 24 лет в зале А Лаборатории LNGS. Эта серия измерений была самой длинной из серий мюонов, когда-либо зарегистрированных под землей. Мы измерили средний поток всех мюонов, равный $I_{\mu} = 3.35 \pm 0.0005$ стат ± 0.03 сист $\times 10^{-4}$ м⁻² с⁻¹. Мюоны идентифицируются по совпадению по времени сигналов с энергией >10 МэВ в течение 175 нс в двух или более счётчиках. Мы применяем к отдельным счётчикам отбор, основанный на проверках их скорости счёта и спектра энергии. Средняя скорость мюонов, пересекающих LVD, контролируется, и она составляет 0.097 ± 0.010 с⁻¹, среднее значение для каждого счётчика составляет ~50 в день. Учитывая количество счётчиков, а также количество дней работы, мы считаем, что сокращение на 5 стандартных отклонений в скорости счёта мюонов является достаточным для отбрасывания неисправных счётчиков. Мы выбрасываем из анализа такие, у которых темп счета меньше 15 в день или больше 85 в день. Также, были отброшены мюонные события, вызванные нейтринным пучком из ЦЕРН в Гран Сассо (CNGS), который был активен в период с 2006 по 2012 годы. А именно, исключены все события, происходящие во временном окне (20 мкс), вокруг времени плевков CNGS. Временной ряд изменения интенсивности мюонов приведён на Рисунок 46 (верхняя панель).

Для определения эффективной температуры верхних слоев атмосферы, в котором генерируются мюоны LVD, мы используем температурный профиль атмосферы, предоставленный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды [0], в период времени с 1 января 1994 года по 31 декабря 2018 года. Он составлен на основе различных типов наблюдений (например, наземные, спутниковые и звучание в воздухе) во многих местах. Глобальная атмосферная модель затем используется для интерполяции её в определённом месте (координаты LNGS: 13.5333° E, 42.4275° N). Модель обеспечивает атмосферные температуры при 37 дискретных уровнях давления в диапазоне 1–1000 гПа, четыре раза в день, а именно: в 00.00, 06.00, 12.00 и 18.00 UTC. Чтобы изучить влияние температуры на число зарегистрированных мюонов, нам необходимо учесть тот факт, что атмосфера не является изотермической: вариации происходят разным на разных уровнях давления. Это делается путем объединения температур на каждом уровне в уникальную

«эффективную» температуру, T_{eff}. Эффективная температура представляет собой средневзвешенное значение на нескольких высотах, вес которого больше для высот, плотность которых ниже, и, следовательно, мезоны с большей вероятностью распадаются на мюоны. Временной ряд эффективной температуры деленной на среднее значение за 24 года приведен на Рисунок 46 (нижняя панель).



Рисунок 46 – Временные ряды потока мюонов (верхняя панель) и эффективной температуры (нижняя панель) перекомпонованы в 5-дневные бины. Синие (толстые пунктирные) линии представляют синусоидальный фит, в то время как красные (тонкие) линии представляют интерполяции, полученные с помощью анализа сингулярного спектра

Корреляция между двумя наборами данных интенсивности мюонов и температуры очевидна. Эффективный температурный коэффициент α_T был рассчитан по формуле: $\Delta I/I = \alpha_T \Delta T_{eff}/T_{eff}$.

Линейная регрессия даёт нам значение α_T , которое составляет 0.94 ± 0.01 стат ± 0.01 сист, с силой корреляции, равной 0.56 для 8402 точек данных. Фактическая корреляция между потоком мюонов и изменениями температуры показана на рисункеРисунок 47 (чёрные точки) вместе с полученной линейной подгонкой (красная пунктирная линия).

На рисункеРисунок 48 показано, как коэффициент α_T, измеренный за 24 набора данных (закрашенная красная точка), в сравнении с коэффициентами, измеренными в других подземных экспериментах (открытые точки), и с модельными предсказаниями (линии). Сплошная красная линия представляет расчёт, включающий вклады распадов пионов и каонов, в то время как пунктирные и пунктирные линии учитывают только один единственный механизм производства: распад пионов и распад каонов, соответственно. Все экспериментальные значения представлены как функция <E_{thr}×cosθ>, которая является единственным параметром, влияющим на вычисление весовой функции W(X), для определения эффективной температуры.



Рисунок 47 – Корреляция между потоком мюонов и изменениями температуры вместе с линейным фитом (красная пунктирная линия)



Рисунок 48 – Сравнение экспериментальных значений α_T с моделями, учитывающими распады пионов и каонов (сплошная красная линия), только для распадов пионов (пунктирная черная линия) и только для распадов каонов (пунктирная черная линия)

11.1.2. Вариации мюонов горизонтального и вертикального направлений

Установка LVD является уникальным прибором для изучения атмосферных мюонов под землёй. За сутки работы установки фиксируется, в среднем, около 6000 мюонных событий. Из полного количества событий, регистрируемых в LVD, около 6% составляют группы мюонов. В детекторе LVD мюонным считается событие, в котором имеются два счётчика, зарегистрировавших в течение 250 нс энерговыделения больше 20 МэВ.

Продольная ось установки LVD ориентирована на ЦЕРН и составляет 38.4° с направлением юг-север (рисунокРисунок **49**). Угол ϕ отсчитывается от фронтальной стороны первой башни к боковой по часовой стрелке. Для полного потока мюонов угол максимальной интенсивности $\theta = 28^{\circ}$.



Рисунок 49 – Схема расположения установки LVD относительно сторон света

В LVD много атмосферных мюонов с большими зенитными углами θ : 65° – 90°, которые пересекают детектор вдоль короткой стороны. Это окологоризонтальные мюоны в направлении на северо-запад. Основной сложностью анализа данных является расчёт геометрического фактора установки – аксептанса, который должен учитывать изменения конфигурации детектора (расположение в детекторе работающих сцинтилляционных счётчиков) для потоков мюонов разного направления.

Модульная структура детектора позволяет выделять мюоны вертикального и горизонтального направлений, используя расположение счётчиков. При установлении характеристик потока горизонтальных и вертикальных мюонов мы использовали мюонный годоскоп из двух счётчиков или метод «равного аксептанса», который заключается в отборе мюонов фиксированными парами счётчиков, расположенных на расстоянии около 3 метров друг от друга. Метод элементарных независимых годоскопов

был проверен на реконструированных мюонных событиях вертикального и горизонтального направлений в период, когда работала трековая система с 1999 по 2002 год. Получено, что метод выделяет окологоризонтальные мюоны с углами θ от 69° до 90° градусов. С привлечением карты горы Гран Сассо была определена также средняя глубина грунта над установкой для горизонтальных мюонов $\overline{H}^{h} = 4.98 \pm 0.25$ км в.э. Число таких мюонов в полном количестве мюонных событий составляет около N_h/N_{tot} = 2.6%, темп счёта – 0.66 мюон/день на пару. Для выделенных околовертикальных мюонов с зенитными углами θ от 0° до 22°средняя глубина грунта $\overline{H}^{v} = 3.57 \pm 0.18$ км в.э. (N_v/N_{tot} = 21.7%), их темп счёта – 3.28 мюон/день на пару.

Метод равного аксептанса позволяет избежать расчёта аксептанса детектора в целом, а использовать постоянный аксептанс элементарного годоскопа.

Сезонные вариации темпа счёта окологоризонтальных мюонов получены по данным с 2002 по 2018 года. Аппроксимация гистограммы гармонической функцией f(t)= $I_{\mu}{}^{h} + \delta I_{\mu}{}^{h} \times \cos(2\pi(t-\phi)/365)$ позволила определить значение вариации $\delta I_{\mu}{}^{h} = 1.7 \pm 0.3\%$. Средний темп счёта выделенных горизонтальных мюонов составляет 0.665 событий в день, в расчете на один годоскоп.

Метод наложения эпох (Рисунок 50 справа) даёт такую же величину амплитуды модуляции. Здесь темп счета приведён на среднее значение в год. Максимум интенсивности приходится на $\phi^{h} = 182 \pm 5$ день от начала года.



Рисунок 50 – Сезонные вариации вертикального (слева) и горизонтального (справа) потока мюонов

Методом «независимых годоскопов», когда выбирались счётчики один над другим через один уровень, были также получены вариации темпа счёта околовертикальных мюонов (Рисунок 50 слева). Аппроксимация обеих гистограмм гармонической функцией

дает амплитуду вариации темпа счета $\delta I_{\mu}{}^{\nu} = 1.0 \pm 0.2 \%$ и фазу на $\phi^{\nu} = 187 \pm 5$ дне от начала года. Величина $\delta I_{\mu}{}^{\nu} = 1.0 \%$ меньше амплитуды $\delta I_{\mu}{}^{tot} = 1.5\%$ для всех мюонов, регистрируемых установкой LVD. Это связано с очевидным фактом – меньшей средней энергией мюонов вертикального направления по сравнению со средней энергией всех мюонов. Средний темп счёта выделенных вертикальных мюонов составляет 3.28 событий в день, в расчёте на один годоскоп.

Влияние на величину δI_{μ} априорного допущения о гармоническом виде сезонных вариаций мюонов можно исключить, применяя разностный метод, в котором используются суммарные величины числа мюонов за три летних и три зимних месяца. Так были определены величины вариации $\delta I_{\mu}^{hor} = 1.8 \pm 0.2$ stat ± 0.2 sys % и $\delta I_{\mu}^{ver} = 1.1 \pm 0.0$ 6stat ± 0.2 sys % для окологоризонтальных и околовертикальных мюонов, соответственно. Видим, что разностный метод дает бо́льшие значения амплитуды вариаций для околовертикальных мюонов по сравнению с методом, использующим аппроксимацию данных гармонической функцией.

Околовертикальные мюоны образуются в распадах пионов, пробег которых в разреженной атмосфере на порядок меньше, чем для окологоризонтальных.

11.2. Вариации фона естественной радиоактивности

Изменение концентрации радона связано с сейсмической активностью и с техногенными факторами, приводящими к эманации радона из породы. Движение транспорта в туннеле, открытие и закрытие дверей в экспериментальном зале установки LVD влияют на концентрацию радона.

Радиоактивный газ радон Rn, всегда присутствующий в грунте, является основным источником нейтронов на достаточно больших глубинах за счёт (α, n)-реакций, производимых в результате альфа-распадов радона и его дочерних ядер.

Средняя концентрация радона 222 Rn в зале A, где расположен детектор LVD, составляет 25 ± 8 Бк/м³. Мы наблюдали довольно заметную корреляцию между фоновым сигналами в LVD и альфа-распадами из-за 222 Rn [2].

Особенностью Апеннинского полуострова является высокая сейсмоактивность, а также горообразование и вулканическая активность. Сильные и частые землетрясения обусловлены глобальными тектоническим процессами движения литосферных плит, когда Евразийская плита надвигается на Африканская плиту. Каждый день сейсмологи фиксируют на полуострове от 2 до 10 землетрясений около 2 – 2.5 баллов, ~ 0.6 землетрясений в день около 3 баллов.

В 2019 году было несколько сильных землетрясений [2], которые чувствовались жителями Италии. Характеристики толчков с магнитудой больше 4 баллов приведены в Таблица 1. Особенно сильное землетрясение было в Албании, его отголоски были зафиксированы даже в Риме.

Дата и время	Магнитуда	Зона	Глубина Широта		Долгота
2019-12-02 09:26:25	ML 4.2	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	a 17 nese settentrionale 3ANIA)		19.57
2019-11-30 21:53:53	ML 4.0	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	23	41.51	19.48
2019-11-29 00:00:44	ML 4.2	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	23	41.37	19.65
2019-11-28 11:52:41	ML 4.8	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	14	41.45	19.39
2019-11-27 15:45:24	ML 5.4	Costa Albanese settentrion. (ALBANIA)	25	41.56	19.52
2019-11-26 18:19:14	ML 4.6	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	21	41.52	19.48
2019-11-26 18:06:01	ML 4.0	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	30	41.48	19.78
2019-11-26 14:05:00	ML 4.7	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	36	41.57	19.68
2019-11-26 13:14:13	ML 4.2	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	10	41.40	19.47
2019-11-26 10:19:25	mb 5.3	Bosnia and Herz. [Land]	10	43.16	17.98
2019-11-26 08:27:02	ML 4.8	Costa1841.5Albanese settentrionale41.5(ALBANIA)41.5		41.51	19.46
2019-11-26 07:08:22	ML 5.4	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	20	41.54	19.47

Таблица 1 – Характеристики землетрясений за 2019 год вблизи Италии

2019-11-26 06:56:21	ML 4.3	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	22	41.47	19.51
2019-11-26 04:03:00	mb 5.3	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	10	41.49	19.53

Продолжение таблицы 1

2019-11-26 03:59:24	mb 5.1	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	10	41.40	19.54
2019-11-26 03:54:11	Mw 6.2	Costa Albanese settentrion. (ALBANIA)	22	41.40	19.52
2019-11-26 02:47:56	ML 4.4	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	41.36	19.54	
2019-11-07 18:35:21	Mw 4.4	5 km SE Balsorano (AQ)	16	41.78	13.60
2019-10-31 07:59:00	Mw 4.1	Mar Ionio Settentrionale (MARE)	27	38.89	17.55
2019-10-25 06:31:38	Mw 4.4	Tirreno Meridionale (MARE)	e 12		15.43
2019-10-07 08:11:32	Mw 4.0	4 km W Caraffa di Catanzaro (CZ)	25	38.89	16.45
2019-09-21 16:15:54	ML 5.2	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	20	41.36	19.46
2019-09- 21 16:04:27	ML 5.4	Costa Albanese settentrionale (ALBANIA)	20	41.38	19.46
2019-09-01 02:02:39	Mw 4.0	3 km E Norcia (PG)	10	42.80	13.13
2019-07- 13 11:56:39	mb 5.0	Algeria [Sea]	20 37.30		5.69
2019-01-15 00:03:57	Mw 4.3	10 km SE Ravenna (RA)	21 44.35		12.29
2019-01-09 00:50:34	ML 4.1	10 km NW Milo (CT)	2 37.80		15.05
2019-01-01 19:37:46	Mw 4.1	3 km W Collelongo (AQ)	km W Collelongo (AQ) 17 41.88		13.55

Данные темпа счёта LVD в период землетрясения в Бальсорано 7 ноября 2019 г. и в Албании 26 ноября приведены на рисунках Рисунок **51** и Рисунок **52**. Можно заметить повышение концентрации радона за два-три дня до землетрясения. Однако же необходимо дальнейшее накопление информации и выполнение анализа зависимости величины «предвестников» землетрясений на LVD от магнитуды, глубины и удалённости землетрясения от установки.



Рисунок 51 – Темп счета LVD с 01 по 09 ноября. Красными рисками нанесены толчки землетрясения в Бальсорано 7 ноября



Рисунок 52 – Темп счета LVD с 19 по 27 ноября. Красными рисками нанесены толчки землетрясения в Албании 26 ноября

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. D.P. Dee et al. Q. J. R. Meteorol. Soc. // 2011. 137. 553.
- 2. Bruno, G., Menghetti, H. J. Phys. Conf. 2006. Ser. 39. P. 278-280.
- 3. URL: http://cnt.rm.ingv.it/

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

12.1. Физические результаты коллаборации LHCb в 2019 г.

Продолжалась работа по обработке ранее набранных данных. Коллаборацией LHCb к декабрю 2019 г. опубликованы 44 работы в высокоцитируемых журналах, ещё 19 работ готовятся к публикации. К наиболее интересным опубликованным результатам, которые докладывались в том числе и на международных конференциях, можно отнести следующие работы.

12.1.1. Наблюдение новых пентакварков в эксперименте LHC

В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$, 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 *c̄uud*, это так называемый очарованный пентакварк [1].



Рисунок 53 – Показаны распределения масс пар (*J/ψ,p*). Точками показаны экпериментальные данные. В нижнем ряду представлены (цветом) результаты для найденных новых массовых состояний пентакварков

Новый результат обработки расширенного набора данных RUN1+RUN2 был представлен недавно. Большая статистика и точность метода позволили подтвердить на уровне 5.4 стандартных отклонения структуру $P_c(4450)^+$, как два *новых* близких *состояния* $P_c(4440)^+$ и $P_c(4457)^+$. Кроме того, найдено *новое состояние* $P_c(4312)^+$, на уровне достоверности 7.3 стандартных отклонения. Минимальный кварковый состав новых состояний *ссииd*, возможно, указывает на молекулярное строение связей типа *мезон* + *барион*. Требуется дальнейшее изучение для определения деталей обнаруженной структуры.

12.1.2. Открытие СР нарушения в распадах «очарованных» частиц в эксперименте LHCb

До сих пор нарушение СР чётности наблюдалось только в процессах, связанных с нижними кварками: s и b, и никогда с с-кварком. Предсказания величины СР нарушения с с-кварком в Стандартной Модели не точны и предсказывают маленькие значения 10-3 – 10-4. В LHCb достигнута беспрецедентная точность изучения разницы скоростей распадов $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ и $D^0 \rightarrow K^+ K^-$. Результат, доложенный LHCb [2], показал отклонение параметра нарушения СР чётности от нулевого значения $\Delta ACP = (-0.154 \pm 0.029)\%$ на уровне 5.3 стандартного отклонения. Это результат означает первое в мире наблюдение нарушения чётности в распадах «очарованных» частиц и, таким образом, открывается новая эра изучения СР нарушения в ряду верхних кварков.



Рисунок 54 – История исследований нарушения СР-инвариантности

12.1.3. Поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B^+ \to K^+ l^+ l^-$

Проверка лептонной универсальности – это один из способов поиска новой физики. В распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ измеряется отношение RK, описывающее, как часто происходят распады в пары е⁺е⁻ и $\mu^+\mu^-$. Коллаборация LHCb опубликовала (данные Run1+2015+2016), наиболее точное на сегодняшний день измерение RK = 0.846 (+0.060 –0.054) (+0.016 –0.014), где первая неопределённость – статистическая, вторая – систематическая. Полученный результат согласуется с предсказанием Стандартной Модели на уровне 2.5 σ (стандартных отклонений). Дальнейшее улучшение точности измерения можно ожидать после обработки данных 2017 и 2018 г.г. [3]



Рисунок 55 – Результаты измерения *R_K* в различных экспериментах

12.2. Модернизация детектора LHCb

В декабре 2018 г. ускорители протонный суперциклотрон (SPS) и адроный коллайдер (LHC) в ЦЕРНе были остановлены на два года на модернизацию. За это время будут проведены ремонтные работы, произведена замена ненадёжного оборудования, ввод в действие нового, разработанного с учётом предыдущих лет работы. В результате ожидается повышение интенсивности пучков в несколько раз. Все эксперименты в ЦЕРНе используют это время для модернизации своих детектирующих систем для работы при повышенной интенсивности.

В эксперименте LHCb предполагается модернизация, рассчитанная на следующие десять лет работы установки. Установка будет оптимизирована для работы с повышенной светимостью 2×10^{34} cm⁻²s⁻¹, существовавший аппаратный триггер, работавший с частотой 1 МГц, будет заменён на программный, способный работать с частотой 40 МГц со средней пропускной способностью 30 МГц. Для обработки возросшего потока данных вблизи места расположения эксперимента LHCb строится локальный дата-центр.

Программный триггер для идентификации частиц будет использовать трековую информацию, для этого трековую систему установки будут добавлены кремниевый трековый детектор после вершинного и несколько плоскостей детекторов на основе сцинтиллирующих волокон после магнита. Вершинный микростриповый детектор будет заменён на пиксельный, на втором черенковском детекторе будет имплементирована система регистрации фотонов. Электроника всех детекторов будет заменена на совместимую с триггером на 40 МГц.

Два детектора будут убраны – первая мюонная станция и предливневый детектор. Последний разрабатывался и создавался в ИЯИ РАН, поэтому сотрудники ИЯИ участвовали в его демонтаже.

12.3. Демонтаж предливневого детектора

Предливневый детектор представляет собой две плоскости сцинтилляционных пластин, каждая размером 6×8 м², между которыми расположен свинцовый конвертор толщиной 15 мм. Толщина каждой плоскости 45 мм. Количество каналов считывания ~12000. И хотя в качестве фотодетекторов используются многоанодные фотоумножители, количество кабелей остаётся значительным. На Рисунок 56 показан вид на часть предливневого детектора, слева от плоскости детектора виден кабельный канал.



Рисунок 56 – Вид на часть предливневого детектора с кабельным каналом

Общее направление сигнальных и силовых кабелей – вверх, затем, через подвижный кабельный канал, к стойкам с регистрирующей электроникой и блоками питания (см. Рисунок 57).

Удаление кабелей и инфраструктуры предливневого детектора потребовало значительных усилий и времени. Всего на детекторе установлено около 10 км кабелей на первой плоскости и 60 км на второй плоскости.



Рисунок 57 – Переход сигнальных и силовых кабелей на подвижный кабельный канал

Конструктивно каждая плоскость предливневого детектора состоит из восьми супермодулей, свинцовый конвертор также сегментирован. Каждая полуплоскость детектора и свинцового конвертера перемещаются независимо, это позволяет выдвигать или вдвигать половинки детектора для обслуживания. Свинец и супермодули необходимо было аккуратно снять для складирования с возможностью дальнейшего использования.

12.3.1. Подготовка к демонтажу

Большой объём не поддающихся механизации работ потребовал тщательного планирования демонтажных работ. Планирование разборки детектора началось заранее. Был оценён объём работ и необходимое для их выполнения время. Ход работ был согласован с группами, работающими на других детекторах во избежание конфликтов интересов. Время, необходимое для демонтажа, было оценено в три месяца – с апреля по июнь включительно.

Для хранения супермодулей и свинцового конвертера были подготовлены кассеты. Каждая кассета предназначалась для хранения четырех супермодулей в горизонтальном положении, установленных на ребро. Свинцовый ковертор должен был разбираться на секции и храниться в горизонтальном положении, плашмя.

Поскольку установка LHCb находится на глубине около 100 м, детекторы используют в работе разнообразные газы, работают под разными напряжениями, существуют риски угрозы здоровью работающему с ними персоналу. В ЦЕРНе технике безопасности всегда уделялось огромное внимание, но в связи с большим объёмом работ на детекторах и ускорителе система подготовки персонала была существенно усилена. Был создан тренировочный центр с макетами действующих систем, все сотрудники обязаны пройти соответствующие курсы и получить допуск в зависимости от места и вида его работ.

Сотрудники ИЯИ РАН, наряду с сотрудниками других институтов, прослушали курсы, прошли подготовку и сдали экзамен по следующим направлениям техники безопасности:

- работа в туннеле ускорителя;
- работа на установке LHCb;
- курс по радиационной безопасности;
- курс по общей технике безопасности;
- работа на высоте;
- использование кислородной маски.

Кроме того, для работ по демонтажу детектора требовался доступ к частям детектора, недоступным с помощью обычных средств, таких как лестницы и эстакады. В этом случае используются мобильные подъёмники, для управления которыми требуется специальный допуск и подготовка. Несколько сотрудников российских институтов, участвовавших в демонтаже, прошли соответствующий тренинг и допуск к работе на мобильных подъёмниках.

На Рисунок 58 показан сотрудник, экипированный для работ по демонтажу детектора. Обязательными являются персональный дозиметр, идентификационная карточка, каска, фонарик, специальная обувь с металлическими вкладками на носках, страховочная обвязка для работ на высоте и дополнительные страховочные карабины.



Рисунок 58 – Экипировка сотрудника для работ по демонтажу детектора

12.3.2. Демонтаж кабелей

Разборка детектора началась со снятия электроники, размещённой на верхней и нижней частях детектора. Следующими по очереди являлись кабельные каналы вокруг детектора и система перемещения, показанные на Рисунок 59.



Рисунок 59 – Вид на первую часть предливневого детектора. Плоскость детектора окружена кабельными каналами, Видна также система перемещения одной четверти детектора

В кабельных каналах детектора расположены также трубки водяного охлаждения детектора. Доступ к некоторым частям детектора ограничен несущими конструкциями и стационарными лестницами и переходами, как показано на рисунке Рисунок 60.



Рисунок 60 – Демонтаж кабелей и линий системы охлаждения в труднодоступных местах Система перемещения половинок детектора была демонтирована одновременно с

удалением кабелей из кабельных каналов

Разборку подвижных кабельных каналов было решено проводить на поверхности в павильоне складирования демонтированных частей, виду громоздкости каналов и чтобы не задерживать других работ (рисунок

Рисунок 61). Кабели подвижных кабельных каналов обрезались, как показано на рисункеРисунок 62.



Рисунок 61 – Два из четырех подвижных кабельных каналов



Рисунок 62 – Обрезка кабелей подвижных кабельных каналов

Каждый кабельный канал транспортировался на поверхность (Рисунок 63) такелажниками ЦЕРНа.



Рисунок 63 – Транспортировка подвижного кабельного канала в павильон для разборки

В соответствии с правилами, принятыми в ЦЕРН, повторное использование материалов запрещено по технике безопасности. Более того, кабели и детали конструкций, находившиеся в пределах ±2 м от медианной плоскости магнита, в области наибольшей интенсивности рассеянных частиц, подлежат переработке на специализированных предприятиях из-за возможной остаточной радиации. Такие детали складировались отдельно. Соответствующие части кабелей вырезались, резались на куски длиной около метра и складировались отдельно в предназначенные для этого контейнеры (Рисунок 64).



Рисунок 64 – Специализированный контейнер для складирования кабелей с остаточной радиоактивностью

12.3.3. Демонтаж супермодулей и свинца

Поскольку вес супермодуля неоднородно распределён и наиболее тяжёлые части это короба электроники, расположенные на концах супермодуля. Так как конструкция супермодуля не обладает достаточной жёсткостью для поворотов в горизонтальное положение, то каждый супермодуль выкатывался по направляющим и с помощью крана устанавливался в поставленную вертикально кассету (Рисунок 65). Кассета как целое поднималась наверх и складировалась в отведённое для этого место. Вес каждого супермодуля около 400 кг, соответственно вес загрузки кассеты с 4-мя супермодулями более 1.5 т. Конструкция кассеты рассчитана на транспортировку 4-х супермодулей и их длительное хранение.



Рисунок 65 – Кассета с супермодулями

Свинцовый конвертор также выдвигался по направляющим (Рисунок 66), укладывался на платформу и платформа поднималась наверх и отвозилась в место хранения (Рисунок 67).

Работы по полному демонтажу предливневого и сцинтилляционно-падового детектора были выполнены с опережением графика на две недели. Было демонтировано 10 км кабелей сцинтилляционно-падового и 60 км предливневого детектора. Супермодули детекторов и пластины свинцового конвертора демонтированы и транспортированы в место временного хранения в кассетах. Утилизируемые части детектора разобраны и их детали рассортированы по типу материалов (медь, алюминий, железо, пластик, кабель) в соответствии с требованиями ЦЕРНа для дальнейшей переработки. Все работы выполнены в полном объёме при полном соблюдении правил техники безопасности.



Рисунок 66 – Выкатка полотна свинцового конвертера



Рисунок 67 – Подъём кассеты со свинцовым конвертором на поверхность

12.4. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

Участники коллаборации LHCb постоянно работают над повышением эффективного использования пучка. С ростом интенсивности, однако, растёт число взаимодействий при пересечении сгустков пучков и, соответственно, число вершин взаимодействий протонов. Для увеличения способности установки регистрировать увеличенное число вершин требуется оптимизация всех детекторов, в том числе калориметров. С середины 2019 г. к работам по оптимизации калориметрической системы подключились два новых сотрудника ИЯИ РАН, имеющих опыт расчётов детекторов на других экспериментах.

Программа развития установки LHCb предусматривает увеличение светимости после 2030 года до 2×10³⁴ ст⁻²s⁻¹. Для эффективной работы электромагнитного калориметра при возросших радиационных нагрузках и увеличенного количества вторичных частиц потребуется новый калориметр с улучшенными характеристиками, такими как улучшенное энергетическое разрешение, повышенная радиационная стойкость, временное разрешение на уровне десятков пикосекунд. Для более точного близлежащих ливней также потребуется мелкая гранулярность разделения И уменьшенный мольеровский радиус. Для этих целей требуется разработка улучшенных модулей калориметра типа «шашлык». Одно из предложений по модернизации основано на применении более тонких слоёв свинца и сцинтиллятора, что может улучшить энергетическое разрешение, а именно, стохастический член. С другой стороны, применение более тонких слоёв сцинтиллятора позволит увеличить плотность

калориметра и, как следствие, уменьшить мольеровский радиус структуры, а значит и поперечный размер электромагнитного ливня.

В качестве отправной точки при модифицировании структуры модуля может быть взяты результаты, полученные при исследовании прототипов модулей, полученные в период TDR. Основные параметры экспериментальных модулей сведены в Таблица 2.

N. proto	Lead, mm	Scint, mm	R_Molier, mm	X0, mm	Number of Layers	25.5 X0 L,cm	Light Yield, ph/MeV
1	2.0	3.0	30	15.3	70 (60)	39(35)	15
2	1.5	3.0	35	18.5	93 (76)	47(41)	20
3	1.5	1.4	27	12.5	93 (76)	32(29)	9
4	0.7	1.4	38	20.0	200 (156)	50(43)	18
5	0.35	1.4	55	33	300 (210)	20X0- > 65(49)	36

Таблица 2 – Основные параметры экспериментальных модулей

Основными варьируемыми параметрами, как видно из таблицы, являлись толщины пластин свинца (0.35 – 2.0 мм) и сцинтиллятора (1.4, 3.0 мм). В колонке «R Molier» указаны оценки мольеровского радиуса, который зависит от применяемых материалов и толщин слоёв. Как видно из результатов, его величина может быть уменьшена с 35 мм до 27 мм, при уменьшении толщины слоёв сцинтиллятора вдвое. К сожалению, при уменьшении толщины сцинтиллятора ухудшается эффективность светосбора, так как увеличивается количество отражений света от больших поверхностей пластины. Для уменьшения световых потерь рекомендуется улучшить технологию производства пластин, т.е. применение более качественной пресс-формы. С другой стороны, возможно, не потребуется уменьшение толщины сцинтиллятора менее 2 мм, т.е. например можно остановиться на параметрах сборки 2 мм Sci + 2 мм Pb. При этом удастся уменьшить

мольеровский радиус при приемлемом энергетическом разрешении. Наилучшее энергетическое разрешение (стохастический член) было получено в случае модуля №5: 4.5%/√Е, как показано на Рисунок 68.



Рисунок 68 – Экспериментальный результат: энергетическое разрешение модуля №5А и №5В

Выбор оптимальных параметров зависит от многих условий и должен быть сделан с помощью полного компьютерного моделирования калориметра в условиях установки и целевых физических процессов. На первом этапе нами начата работа по моделированию модулей с помощью автономной программы, разыгрывающей электромагнитные ливни различной энергии в модуле.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Observation of $J/\psi p$ Resonances Consistent with Pentaquark States in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ Decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2015. – 115. – 072001.
- Observation of CP violation in charm decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2019. – 122. – 211803.
- Search for lepton-universality violation in B⁺→K⁺ℓ⁺ℓ⁻ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2019. 122. 191801.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 2019 год выполнен полностью.

Сформулируем кратко полученные за отчетный период результаты.

1. В безмассовой суперсимметричной версии КХД аналитически вычислена трёхпетлевая поправка к функции Адлера.

2. Изучены перенормировочные свойства суперсимметричного варианта квантовой электодинамики в схеме вычитаний на массовой поверхности. Показано, что в схеме перенормировок автоматически выполняется во всех порядках теории возмущений точное соотношение между ренорм-групповыми функциями данной теории.

3. Вычислена экспонента подавления процессов с нарушением барионного числа в процессах столкновения частиц высоких энергий. Показано, что сечение процессов с нарушением барионного числа в Стандартной модели меньше значений порядка фемптобарна вплоть до энергий порядка, по крайней мере, 450 ТэВ.

4. Вычислены амплитуды вероятностей и вероятности переходов между обычным и "тёмным" фотонами в вакууме и в веществе. Получены оценки для вероятностей образования "тёмных" фотонов для ряда коллайдерных экспериментов, таких как MATHUSLA, FASER, SHiP, T2K, DUNE, NA62, NA64.

5. Получено ограничение на величину массового масштаба M_{LV}, определяющего нарушение Лоренц-инвариантности, из анализа высокоэнергетической части спектра Крабовидной туманности.

6. Произведен поиск тёмных фотонов в распадах бозона Хиггса, рождённого вместе с Z-бозоном в реакции $pp \rightarrow HZ \rightarrow \gamma \gamma_{dark} \rightarrow l^+ l^- \gamma$.

7. Получены рекордные ограничения на массу правого W_R-бозона и тяжёлого стерильного нейтрино третьего поколения.

8. Определен потенциал открытия лёгкой тёмной материи в эксперименте NA64. Показано, что при увеличении статистики в 15-20 раз эксперимент NA64 проверит все наиболее интересные модели лёгкой тёмной материи.

9. Вычислены структурные функции лёгких ядер, включая дейтрон 2H и трёхчастичные ядра 3He и 3H, в кинематической области экспериментов JLab.

10. Впервые был предложен космологический сценарий с генезисом в расширенной

теории Хорндески, который не только является полностью устойчивым, но и обладает простой формой асимптотик теории, позволяющей использовать предложенное решение для дальнейшего исследования полных, реалистичных моделей ранней Вселенной.

11. Предложен оригинальный сценарий Вселенной с отскоком, в котором не только отсутствуют патологические степени свободы на протяжении всего времени эволюции, но и все моды возмущений распространяются со скоростями, меньшими скорости света. Кроме этого, новая модель отскока также имеет простую форму обеих асимптотик.

12. Получены ограничения на параметры модели тёмной материи, содержащей стабильную и распадающуюся компоненты, для различных мод распада частицы темной материи из требования непревышения измеряемого потока диффузного гамма-излучения и нейтрино в современной Вселенной.

13. На примере реалистичной модели происхождения космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) изучены перспективы детектирования крупномасштабной анизотропии потока космических лучей в планируемых орбитальных телескопах, таких как K-EUSO.

14. Вычислен возможный вклад от распада аксионо-подобных частиц в межгалактический инфракрасный фон и продемонстрирована возможность непротиворечивого объяснения в рамках данного механизма измерений инфракрасного фона в диапазоне длин волн от 0.8 до 1.7 мкм проведенных в эксперименте CIBER.

15. Продемонстрирована возможность применения аппарата глубоких сверхточных нейронных сетей для определения химического состава, а также характеристик частиц, инициирующих широкие атмосферные ливни по данным наземной решётки детекторов в эксперименте Telescope Array.

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

Продемонстрирован существенный прогресс в разработке метода регистрации скрытых фотонов по одиночным электронам, эмитируемым поверхности с металлического мультикатодного счётчика. Разработан И изготовлен катода мультикатодный счётчик усовершенствованной конструкции с алюминиевым катодом и фокусирующими электродами. В измерениях Al-1 получена рекордно низкая скорость счёта одиночных электронов $(0.81 \pm 0.08) \cdot 10^{-4}$ Hz/cm². Получены новые, более сильные ограничения на константу смешивания скрытого фотона, см. Рисунок 12. Важным в этой работе является также то, что здесь результаты получены в прямом измерении. Продолжается набор статистики со счётчиком усовершенствованной конструкции. В настоящее время результаты измерений обрабатываются. Чувствительность метода критически зависит от темнового тока детектора. Для дальнейшего продвижения нами
планируется дальнейшее снижение темново́го тока. Одним из методов является специальная обработка поверхности металлического катода и поверхности нитей, используемых в качестве катодов. Планируется изготовить счётчик с катодом из металла с большой работой выхода, например, никель или платина. Планируются также измерения при низких температурах для снижения влияния эффекта термоэмиссии. Разработана и изготовлена система охлаждения детектора на основе элементов Пельтье. Система успешно прошла испытания, и детектор готовится к работе при пониженных температурах.

3. Задача «Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей»

План работ выполнен полностью.

Самосогласованным методом найдено уравнение движения свободной частицы тёмной материи вблизи первичной чёрной дыры на космологическом фоне. Полученное уравнение совпадает с уравнением, выведенным ранее в работе [3] в ньютоновском подходе. Численным решением этого уравнения найден центральный профиль плотности тёмной материи вокруг первичной чёрной дыры и показано его подавление в центре по В сравнению профилями плотности ИЗ предшествующих работ. С случае слабовзаимодействующих частиц тёмной материи (WIMPs) со стандартным сечением аннигиляции, эта модификация не влияет на гамма-сигнал от пиков плотности вокруг первичных чёрных дыр, так как центральная область тёмной материи полностью аннигилирована к настоящему моменту. Предварительные расчёты показывают, что при малом сечении аннигиляции и большой массе частиц тёмной материи эти частицы совместимы с первичными чёрными дырами, которые могли быть ответственны за некоторые из событий LIGO/Virgo.

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 нейтринного осцилляционного эксперимента T2K при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН был создан магнитный детектор Baby-MIND. Этот детектор был смонтирован в полном объёме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента T2K в 2019 г., а в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

Детектор Baby-MIND участвовал в наборе статистики с пучком мюонных нейтрино и антинейтрино под углом 1.5 градуса относительно направления протонного пучка. В течение октября-декабря 2019 г. была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени около 3×10^{20} POT. Эффективность работы детектора Baby-MIND во время набора статистики нейтринных событий при включенном пучке составила более 95%. В настоящее время ведётся работа по анализу данных, полученных детектором Baby-MIND.

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также для ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения Т2НК (с дальним детектором ГиперКамиоканде), группой ИЯИ РАН разработан детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков объемом 10 × 10 × 10 мм³ с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон, и имеет размеры: длина 200 см, ширина 200 см, высота 60 см. В течение 2019 года была полностью разработана и процедура массового изготовления методом давлением отлажена литья под сцинтилляционных кубиков с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон. Была отлажена и запущена в работу пресс-форма с 10-ю камерами в ООО Унипласт (г. Владимир). В 2019 году в ИЯИ было собрано 25 плоскостей детектора из 900 тысяч кубиков, что составляет около 45% общего объёма. Один из прототипов детектора был протестирован на пучке нейтронов в лаборатории Лос-Аламос (США). Работа по созданию детектора и анализу данных, полученных при тестах прототипов, продолжается.

В 2019 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 планируется на 2026-2027 гг.

Сотрудниками ИЯИ PAH была проделана НИОКР разработке по сцинтилляционных счётчиков для двух систем эксперимента SHiP: для временного детектора и для мюонной системы, основная задача которых заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. Прототип временного детектора SHiP будет использован В качестве времяпролётного детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (ГиперКамиоканде). Для мюонной системы SHiP изготовлены сцинтилляционные счётчики, которые в 2020 г. будут протестированы в Италии.

5. Задача «Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (Т2К). Чувствительный поиск СР

нарушения и возможное обнаружение нового источника СР нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино»

План работ на 2019 год выполнен полностью.

В эксперименте Т2К был выполнен осцилляционный анализ данных, накопленных в 2009–2018 гг. с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино. Анализ данных базировался на интегральном потоке 1.49 × 10²¹ протонов на мишени (POT) для нейтринной моды и 1.64×10^{21} POT для антинейтринной моды. В результате существенно систематические погрешности (с 13-19% 4-9%) И понижены до улучшена чувствительность к осцилляционным параметрам. При поиске «появления» событий в дальнем детекторе Супер-Камиоканде было зарегистрировано 75 электронных нейтрино с одним кольцом и 15 событий с рождением электрона и одного пиона от взаимодействия электронного нейтрино. Кроме того, было зарегистрировано 15 событий. соответствующих появлению электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.

Было получено, что наиболее вероятными значениями СР нечётной фазы являются $\delta = (-1.89^{+0.70}_{-0.68})$ рад для нормальной иерархии масс и $\delta = (-1.38^{+0.48}_{-0.54})$ рад для инверсной иерархии масс, т.е. для обоих возможных значений иерархии масс величина δ близка к максимальному СР нарушению. Таким образом, сохранение СР симметрии ($\delta = 0$ или $\delta = \pi$) исключено на уровне 3 σ (99.73%) в случае инверсной иерархии масс и на несколько меньшем уровне доверительной вероятности (около 99.0%) – в случае нормальной иерархии масс. Полученный результат подтверждает первоначальное указание Т2К на максимальное СР нарушение в лептонном секторе Стандартной Модели.

Помимо изучения осцилляций трёх *стандартных* нейтринных семейств в эксперименте T2K был проведен поиск осцилляций, которые могут возникнуть, если существуют лёгкие *стерильные* нейтрино, не участвующие в слабых взаимодействиях. Анализ данных, набранных в 2010-2017 гг., не показал значительных отклонений от модели трёх активных нейтрино и установил новые ограничения на параметры модели «3+1», сравнимые с результатами других экспериментов.

6. 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 2019 год выполнен полностью.

Были проведены работы по анализу данных каонного эксперимента NA62 с целью поиска редкого распада каона на пион и два нейтрино ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$). В одной из сигнальных

областей наблюдаются 2 события. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 2.16, а фон – на уровне 1.5 ± 0.3. Суммарный анализ данных 2016-2017 гг. приводит к следующему результату: Br(K⁺ $\rightarrow \pi^+ \nu \nu$) < 1.62 x 10⁻¹⁰ на 95% уровне достоверности или Br(K⁺ $\rightarrow \pi^+ \nu \nu$) = (0.47^{+0.72}-0.47) × 10⁻¹⁰. Анализ данных 2018 г. продолжается.

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.

Было проведено исследование по поиску тяжёлых нейтральных лептонов, причём не только непосредственно в каонных экспериментах, но и в ближнем детекторе нейтринного эксперимента T2K, в котором искались тяжёлые нейтрино из распадов каонов, образованных при взаимодействии протонов исходного пучка с графитовой мишенью.

В рамках каонного эксперимента NA62 был проведён 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.

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

Опубликованы результаты анализа спектров событий, обусловленных взаимодействием мюонных нейтрино и антинейтрино. Определена аксиальная масса нуклона из данных эксперимента MiniBooNE. Проведены расчёты усредненных по спектру нейтрино в эксперименте NOvA сечений квазиупругого взаимодействия нейтрино на ближнем детекторе, с учетом вклада токов обменных мезонов.

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

Наиболее важные достижения в 2019 году:

1. Была разработана методика очистки от трития и контроля процесса для случая малых загрязнений тритием. В течение нескольких месяцев была проведена очистка объёмов спектрометра и преспектрометра. Был достигнут уровень фона, полностью удовлетворяющий проведению эксперимента по поиску стерильных нейтрино в бета-распаде трития.

2. Проведен один технологический сеанс с полным включением всех элементов установки.

3. Выполнено математическое моделирование отклика кремниевого детектора в реальной установке с учетом геометрии и конфигурации полей.

4. Проведены работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования.

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

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

В 2019 году получены следующие результаты:

1. Поставлено лучшее ограничение на величину эффективной массы электронного антинейтрино на уровне 1,1 эВ/с².

2. Представители группы ИЯИ РАН участвовали в обработке данных по потерям энергии электронами в источнике в рамках нового подхода, основанного на измерениях по времени пролёта, получены параметры спектра потерь с беспрецедентной точностью.

 Исследовались предложения по проведению измерений в нестандартной конфигурации электрических и магнитных полей найдена возможность снизить фон спектрометра в два раза.

4. Исследовались детекторы электронов ДОЭ - Si APD разработки ФТИ им. Иоффе для возможного применения в эксперименте по поиску стерильных нейтрино с массой в области нескольких кэВ.

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

В течение 2019 года российские учёные из ИЯИ РАН продолжали участвовать в поведении эксперимента GERDA-II, расположенного в подземной Национальной лаборатории Италии Гран-Сассо (LNGS INFN). Они участвовали в эксплуатации действующей установки GERDA-II. Начата разработка первой очереди эксперимента LEGEND-200. Российские учёные стали авторами публикаций в составе коллаборации GERDA. Подготовлены и согласованы планы совместных работ в составе коллабораций GERDA и LEGEND.

Закончились измерения в эксперименте Double Chooz, в 2019 году продолжался анализ данных. Получены результаты с увеличенным объёмом мишени. Измеренное

значение угла смешивания нейтрино $\sin^2 2\theta_{13} = 0.105 \pm 0.014$. Измерено сечение реакция обратного бета-распада на ядерно-свободном протоне при стандартном составе активной зоны ядерного реактора $\sigma_f = (5.71 \pm 0.6) \times 10^{-43} \text{ см}^2$ /деление. Предполагается продолжить анализ данных для получения информации о направлении нейтрино. Продолжится анализ с целью получения спектра антинейтрино ядерного реактора с возможностью разделения спектра на компоненты от всех делящихся изотопов.

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По данным работы детектора LVD за 24 года получены амплитуда и фаза сезонных вариаций полного потока мюонов, вычислен температурный коэффициент, связывающий изменения интенсивности мюонов и температуры в верхних слоя атмосферы. Определены максимумы и минимумы интенсивности мюонов за 24 года. Найдены указания в мюонных данных детектора на внезапные стратосферные потепления. За 16 лет данных работы трех башен LVD были выделены горизонтальные и вертикальные мюоны. Определены сезонные вариации горизонтальных $\delta I_h = 1.7\%$ и вертикальных $\delta I_v = 1.0\%$ мюонов. Ведутся работы по исследованию фона естественной радиоактивности для выделения источников фоновых событий в подземном зале при поиске редких событий.

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Физические результаты коллаборации LHCb в 2019 г.

В 2019 г. группой ИЯИ РАН были полностью выполнены все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы LHCb. Эксперимент LHCb в 2019 г. производил работы по демонтажу и модернизации детекторов. Также продолжена обработка набранных ранее данных, получен ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе наблюдение новых пентакварков, открытие CP нарушения в распадах «очарованных» частиц, поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ и ряд других.

Модернизация детектора LHCb

На этапе создания установки LHCb группа ИЯИ РАН разработала и изготовила предливневый детектор, являющийся частью калориметрической системы. За время эксплуатации было показано, что конструкция предливневого детектора является надёжной и удовлетворяет поставленным требованиям эксперимента.

Работы по полному демонтажу предливневого и сцинтилляционно-падового детектора были выполнены с опережением графика на две недели. Супермодули детекторов и пластины свинцового конвертора демонтированы и транспортированы в место временного хранения в кассетах. Утилизируемые части детектора разобраны и их детали рассортированы по типу материалов (медь, алюминий, железо, пластик, кабель) в соответствии с требованиями ЦЕРНа для дальнейшей переработки. Все работы выполнены в полном объёме при полном соблюдении правил техники безопасности.

Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

В рамках модернизации калориметрической системы LHCb на первом этапе нами начата работа по разработке и моделированию экспериментальных модулей электромагнитного калориметра типа «шашлык» с помощью автономной программы. Выбор оптимальных параметров модуля зависит от многих условий и должен быть сделан в дальнейшем с помощью полномасштабного компьютерного моделирования целевых физических процессов.

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»

 A.L. Kataev, S.S. Aleshin, K.V. Stepanyantz. The three-loop Adler D-function for N=1 SQCD regularized by dimensional reduction // JHEP. – 2019. – 1903. – P. 196.

2. А.Л. Катаев, В.С. Молокоедов. Метод наименьших квадратов: применение к анализу зависимости от числа легких ароматов соотношения между полюсными и бегущими массами тяжелых кварков // ТМФ. – 2019. – 200:3. – С. 522–531.

3. A.L. Kataev, A.E. Kazantsev, K.V. Stepanyantz. On-shell renormalization scheme for N=1 SQED and the NSVZ relation // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – № 6. – P. 477.

4. Mikhail Danilov, Sergey Demidov, Dmitry Gorbunov. Constraints on hidden photons from nuclear reactors // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – v. 4. – P. 041801.

5. S.Demidov, S.Gninenko, D.Gorbunov. Light hidden photon production in high energy collisions // JHEP. – 2019. – 1907. – P. 162.

6. K.O. Astapov, D.V. Kirpichnikov, P.S. Satunin. Photon splitting constraint on Lorentz Invariance Violation from Crab Nebula spectrum // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP). – 2019. – вып. 1904. – С. 54 – 69.

7. P.S. Satunin. New constraints on Lorentz Invariance violation from Crab Nebula spectrum beyond 100 TeV / // European Physical Journal C. – 2019. – т. 79. – вып. 12. – С. 1011 – 1020.

8. Search for heavy neutrinos and third-generation leptoquarks in hadronic states of two τ leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / S.N.Gninenko et al. // JHEP. – 2019. – v. 1903. – P.170-195.

9. Search for dark photons in decays of Higgs bosons produced in association with Z bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / S.N.Gninenko et al. // JHEP. – 2019. – v. 1910. – P.139-171.

10. Search for dark matter in events with a leptoquark and missing transverse momentum in proton-proton collisions at 13 TeV / S.N.Gninenko et al. // Phys.Lett. -2019. -v. B795. -P. 76-99.

11. Search for an exotic decay of the Higgs boson to a pair of light pseudoscalars in the final state with two muons and two b quarks in pp collisions at 13 TeV / S.N.Gninenko et al. // Phys.Lett. -2019. - v.B795. - P.398-423. Combined search for light dark matter with electron and muon beams at NA64 / S.N.Gninenko, D.V.Kirpichnikov, M.M.Kirsanov, N.V.Krasnikov // Phys.Lett. – 2019. – v.B796. – P.117-122.

13. S.N.Gninenko, N.V.Krasnikov, D.V.Kirpichnikov. Probing millicharged particles with NA64 experiment at CERN // Phys.Rev. – 2019. – v. D100. – P. 035003.

14. S.A. Kulagin. Nuclear effects in the deuteron in the resonance and deep-inelastic scattering region // Phys. Part. Nucl. $-2019. -vol. 50. - N_{\odot}.5. - P.506-512.$

15. S. Mironov, V. Rubakov, V. Volkova. Genesis with general relativity asymptotics in beyond Horndeski theory // Physical Review D 100. – 2019. – №8. – P. 083521.

 В.Е. Волкова, С.А. Миронов, В.А. Рубаков. Космологические решения с отскоком и генезисом в теории Хорндески и ее расширении // ЖЭТФ. – 2019. – т. 156. – вып. 4 (10). – С. 651-666.

17. S. Mironov. Mathematical Formulation of the No-Go Theorem in Horndeski Theory // Universe. -2019. - v. 5. - N = 2. - P. 52.

18. Oleg E. Kalashev, Mikhail Yu. Kuznetsov, Yana V. Zhezher. Dark matter component decaying after recombination: constraints from diffuse gamma-ray and neutrino flux measurements // JCAP 1910. – 2019. – №10. – P. 039.

19. O. Kalashev, M. Pshirkov, M. Zotov. Prospects of detecting a large-scale anisotropy of ultra-high-energy cosmic rays from a nearby source with the K-EUSO orbital telescope //JCAP 1909. $-2019. - N_{\odot}09. - P. 034.$

20. Oleg E. Kalashev, Alexander Kusenko, Edoardo Vitagliano. Cosmic infrared background excess from axionlike particles and implications for multimessenger observations of blazars // Phys.Rev. D99. -2019. $- N_{2}$. - P. 023002.

2. Публикации по задаче «Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи»

 А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов. Метод регистрации скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика // Письма в Журнал Технической Физики. – 2016. – т.42. – вып. 16. – С. 102.

2. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. On a Search for Hidden Photon CDM by a Multicathode Counter // Advances In High Energy Physics. – 2016. – v. 2016. – Article ID

3. A.V. Kopylov, I.V. Orekhov, V.V. Petukhov. A multi-cathode counter in a singleelectron counting mode // NIM. – 2018. – A 910. – P. 164. 4. A.V. Kopylov, I.V. Orekhov, V.V. Petukhov. Method of Search for Hidden Photons of Cold Dark Matter Using a Multi-Cathode Counter // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol.82. – №9. – P.1-8.

5. A.Kopylov, V.Orekhov, V.Petukhov. Results from a hidden photon dark matter search using a multi-cathode counter // JCAP07. – 2019. – 008.

6. Anatoly Kopylov, Igor Orekhov, Valery Petukhov. Search for Hidden-Photon Dark Matter by Means of a Multi-Cathode Counte // Journal of Physics: Conference Series/ – 2019. – v.1390. №1. – P.012066.

3. Публикации по задаче «Теоретическое исследование взаимодействия чёрных дыр с тёмной материей»

1. Yu.N. Eroshenko // Dark matter around primordial black hole at the radiationdominated stage. - 2019. - электронный препринт arXiv:1910.01564 [astro-ph.CO]. - принята в печать в International Journal of Modern Physics A (2020).

4. Публикации по задаче «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и Т2НК, SHiP»

1. Yu. Kudenko / Upgrade of T2K Near Detector ND280 // Invited talk at The 27th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2019), Bari, Itali, 5-9 June 2019 – URL: https://agenda.infn.it/event/13938/contributions/89011/.

2. S. Suvorov / The T2K ND280 upgrade project // Talk at the 20th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN2019), Medellin, Colombia, 7-9 November 2019 – URL: https://indico.cern.ch/event/835190/contributions/3613900/.

3. Parameters of a fine-grained scintillator detector prototype with 3D WLS fiber readout for a T2K ND280 neutrino active target / O. Mineev et al. // Nucl.Instr.Meth. – 2019. – A936. – P. 136-138. DOI: 10.1016/j.nima.2018.09.048.

4. Plastic scintillator detector with the readout based on an array of large-area SiPMs for the ND280/T2K upgrade and SHiP experiments / A. Korzenev et al. // JPS Conf.Proc. 27 – 2019. – 011005. DOI: 10.7566/JPSCP.27.011005 (arXiv:1901.07785 [physics.ins-det]).

5. Baby MIND Readout Electronics Architecture for Accelerator Neutrino Particle Physics Detectors Employing Silicon Photomultipliers / O. Basille et al. // JPS Conf.Proc. 27 – 2019. – 011011. DOI: 10.7566/JPSCP.27.011011.

6. T2K ND280 Upgrade Technical Design Report / K. Abe et al. // arXiv:1901.03750 [physics.ins-det].

7. J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report / K. Abe et al. // arXiv:1908.05141 [physics.ins-det].

8. Fast simulation of muons produced at the SHiP experiment using Generative Adversarial Networks / C. Ahdida et al. // arXiv:1909.04451 [physics.ins-det].

9. The experimental facility for the Search for Hidden Particles at the CERN SPS /
C. Ahdida et al. // JINST 14 (2019) no.03, P03025. DOI: 10.1088/1748-0221/14/03/P03025.

5. 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».

Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielastic-like interactions on oxygen by detecting nuclear de-excitation □-rays / K. Abe et al. // Phys. Rev. – 2019. – D100. – № 11. – 112009. DOI: 10.1103/PhysRevD.100.112009 (arXiv:1910.09439 [hep-ex]).

2. Search for neutral-current induced single photon production at the ND280 near detector in T2K / K. Abe et al. // J.Phys. G46 –2019. – №8 – 08LT01. DOI: 10.1088/1361-6471/ab227d (arXiv:1902.03848 [hep-ex]).

3. Measurement of the v_{μ} charged-current cross sections on water, hydrocarbon, iron, and their ratios with the T2K on-axis detectors / K. Abe et al. // PTEP – 2019. – Volume 2019. – Issue 9, September 2019. – 093C02. DOI: 10.1093/ptep/ptz070 (arXiv:1904.09611 [hep-ex]).

4. First Measurement of the Charged Current $\overline{\nu_{\mu}}$ Double Differential Cross Section on a Water Target without Pions in the final state / K. Abe et al. // arXiv:1908.10249 [hep-ex].

5. Search for Electron Antineutrino Appearance in a Long-baseline Muon Antineutrino Beam / K. Abe et al. // arXiv:1911.07283 [hep-ex].

6. Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations / K. Abe et al. // arXiv:1910.03887 [hep-ex].

7. Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km / K. Abe et al. // Phys.Rev. D99. -2019. $-N_{2}7$. -071103. DOI: 10.1103/PhysRevD.99.071103 (arXiv:1902.06529 [hep-ex]).

6. Публикации по задаче «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 нечетным эффектам»

1. First search for $K \rightarrow \pi + \nu \nu$ using the decay-in-flight technique / E.C. Gil et al. // Phys.Lett. - 2019. - B791. - 156-166. (arXiv:1811.08508 [hep-ex]). DOI: 10.1016/j.physletb.2019.01.067.

2. Searches for lepton number violating *K*+ decays / E.C. Gil et al. // Phys.Lett. – 2019. – B797. – 134794. (arXiv:1905.07770 [hep-ex]). DOI: 10.1016/j.physletb.2019.07.041.

3. Search for production of an invisible dark photon in π^0 decays / E.C. Gil et al. // JHEP – 2019. – 1905. – 182. (arXiv:1903.08767 [hep-ex]). DOI: 10.1007/JHEP05(2019)182.

4. / Search for heavy neutrinos with the T2K near detector ND280 / K. Abe et al. // Phys.Rev. – 2019. – D100. - №5. - 052006. (arXiv:1902.07598 [hep-ex]). DOI: 10.1103/PhysRevD.100.052006.

5. В.Л. Курочка / Поиск распада каона $K+\rightarrow e+vvv$ в эксперименте NA62 (CERN) // Доклад на XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», МГУ, Москва, Россия, 8-12 апреля 2019 года. – URL: http://scidep.phys.msu.ru/files/lomonosov2019/sbornik/003 sb.pdf.

6. В.Л. Курочка / Статус эксперимента NA62 (CERN). Анализ распада каона $K + \rightarrow l + N$ // Доклад на VIII Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий», НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 15-20 апреля 2019 года. – URL: https://magistr.mephi.ru/school/prog.html.

7.A. Shaikhiev / Results from NA62 and KOTO // Talk at the Internationalworkshop on e+e- collisions from Phi to Psi PhiPsi19, Новосибирск, 25 февраля - 1 марта2019года.-URL:https://indico.inp.nsk.su/event/15/session/8/contribution/86/material/slides/0.pdf

8. A. Shaikhiev / Searches for exotic particles at NA62 (CERN) // Talk at the "New Physics with Exotic and Long-Lived Particles: A Joint ICISE-CBPF Workshop", ICISE Vietnam, _ Conference Center. Quy Nhon. 1 6 July 2019. _ URL: http://vietnam.in2p3.fr/2019/longlived/transparencies/02 wednesday/02 afternoon/11 shaikhiev .pdf

9. A. Shaikhiev / Search for HNL at NA62 (CERN) // Talk at the "Searching for Long-Lived Particles at the LHC: 6th Workshop of the LHC LLP community", University of Ghent, Ghent, Belgium, 27 – 29 November 2019. – URL: https://indico.cern.ch/event/849129/contributions/3633290/.

7. Публикации по задаче «Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов»

1. First measurement of neutrino oscillation parameters using neutrinos and antineutrinos by NOvA / M.A. Acero et al.// Phys. Rev. Lett. – 2019. – 123. – 151803.

2. A.V. Butkevich, S.V. Luchuk. Testing of quasi-elastic neutrino charged-current and two-body meson exchange current models with the MiniBooNE neutrino data and analysis of these processes at energies available at the NOvA experiment // Phys. Rev. D. -2019. -123. -093001.

8. Публикации по задаче «Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс»

1. Measurements with a TRISTAN prototype detector system at the "Troitsk numass" experiment in integral and differential mode / Tim Brunst et al. // JINST 14 – 2019. – №11. – P11013. DOI: 10.1088/1748-0221/14/11/P11013 e-Print: arXiv:1909.02898 [physics.insdet].

A.A. Nozik, V.S. Pantuev. Direct search for keV-sterile neutrino in nuclear decay.
 Troitsk nu-mass (Mini-review) // Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz. – 2019. –110. – №2. – 81-82.

3. A.A. Nozik, V.S. Pantuev. Direct search for keV-sterile neutrino in nuclear decay. Troitsk nu-mass (Mini-review) // JETP Lett. – 2019. – 110. – №2. – 91-96. DOI: 10.1134/S0370274X19140017, 10.1134/S0021364019140042.

4. Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO) / IAXO Collaboration (E. Armengaud (IRFU, Saclay) et al.). // JCAP. – 2019. – 1906. – 047. DOI: 10.1088/1475-7516/2019/06/047 e-Print: arXiv:1904.09155 [hep-ph].

5. Alexander Nozik. Kotlin language for science and Kmath library. // AIP Conf.Proc. 2163. – 2019. – №1. – 040004. DOI: 10.1063/1.5130103.

6. Cosmic-ray muon flux at Canfranc Underground Laboratory / Wladyslaw Henryk Trzaska et al. // Eur.Phys.J. – C79. – №8. – 721. DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7239-9. e-Print: arXiv:1902.00868 [physics.ins-det].

7. Alexander Nozik. Statistical time analysis for regular events with high count rate // JINST $14 - 2019 - N_{2}06 - P06008$. DOI: 10.1088/1748-0221/14/06/P06008.

D.N. Abdurashitov, V.G. Chernov. The Long-Term Stability of a Fused-Silica
 Proportional Counter // Instrum.Exp.Tech. – 2019. – 62. - №1. – P. 5-9.
 DOI:10.1134/S0020441218060143.

9. Публикации по задаче «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных»

 An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN / M. Aker et. al // Phys. Rev. Lett. – 2019. – 123. – 221802. doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.221802. arxiv: 1909.06048.

2. Gamma-induced background in the KATRIN main spectrometer / K. Altenmüller et. al // Eur. Phys. Journal C. – 2019. - 79:807. doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7320-4.

3. Muon-induced background in the KATRIN main spectrometer / K. Altenmüller et. al // Astroparticle Physics. – 2019. – Volume 108. – Pages 40-49. doi:10.1016/j.astropartphys.2019.01.003.

4. Исследование свойств детектора отраженных электронов (ASPD) как перспективного детектора для установки «Троицк ню-масс» в диапазоне энергий 5-30 кэВ / П. Н. Аруев и др. // Препринт ИЯИ 1441-2019. Принят к опубликованию в ЖТФ в 2020г.

5. Titov N.A. Project KATRIN: First results and future plans // J._Phys. Conf. Ser. – 2019. – 1390. – 012052.

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

1. Probing Majorana neutrinos with double- β decay GERDA Collaboration / M. Agostini et al. // Science. – 2019. – 365. – 1445. DOI: 10.1126/science.aav8613 e-Print: arXiv:1909.02726 [hep-ex].

2. Modelling of GERDA Phase II data GERDA Collaboration / A. Abramov et al. // Sep 5, 2019. 31 pp. e-Print: arXiv:1909.02522 [nucl-ex]

3. Characterization of 30 76Ge enriched Broad Energy Ge detectors for GERDA Phase II GERDA Collaboration / M. Agostini et al. // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – №11. – 978. DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7353-8. e-Print: arXiv:1901.06590 [physics.ins-det].

4. First Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron caption detection / H de Kerret et al // arXiv:1901.09445 [hep-ex].

11. Публикации по задаче «Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо»

 Characterization of the varying flux of atmospheric muons measured with the Large Volume Detector for 24 years / N. Agafonova et al. (LVD Collaboration) // Phys. Rev. D. - 2019. - 100. - 062002. arXiv:1909.04579 [astro-ph.HE].

2. Изучение вариаций низкоэнергетического фона с помощью подземного эксперимента LVD / Н.Ю. Агафонова и др. // Известия РАН Серия физическая. – 2019. – том 83. - № 5. – С. 673–675.

Измерение сезонных вариаций горизонтальных мюонов на подземном детекторе LVD" / Н.Ю. Агафонова и др. // Ядерная физика. – 2020. – том 83. – № 1. – С. 1–7.

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

1. Measurement of the B_c^- meson production fraction and asymmetry in 7 and 13 TeV *pp* collisions / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev. – 2019 – D100. – No11. – 112006. arXiv:1910.13404 [hep-ex].

2. Search for the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^+ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Sci.China Phys.Mech.Astron. – 2020. – 63. - No2. - 221062. arXiv:1909.12273 [hep-ex].

3. Search for the lepton-flavour violating decays $B^+ \rightarrow K^+ \mu^{\pm} e^{\mp}$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. - 2019. - 123. - No24. - 241802. arXiv:1909.01010 [hep-ex].

4. Observation of New Resonances in the $\Lambda_b^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 123. – No15. – 152001. arXiv:1907.13598 [hep-ex].

5. Measurement of CP violation in the $B_s^0 \rightarrow \phi \phi$ decay and search for the $B^0 \rightarrow \phi \phi$ decay / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP - 2019. - 1912. - 155. arXiv:1907.10003 [hep-ex].

6. Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)pK^-$ decay / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1909. – 028. arXiv:1907.00954 [hep-ex].

7. Measurement of CP observables in the process $B^0 \rightarrow DK^{*0}$ with two- and fourbody *D* decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP - 2019. - 1908. - 041. arXiv:1906.08297 [hep-ex].

8. Updated measurement of time-dependent *CP*-violating observables in $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^0 K^-$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – N $_{28}$. – 706. arXiv:1906.08356 [hep-ex].

9. Precision measurement of the Λ_c^+ , Ξ_c^+ , Ξ_c^0 baryon lifetimes / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev. – 2019/ – D100. – No11. – 112006. arXiv:1906.08350 [hep-ex].

10. Amplitude analysis of $B^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} K^{+} K^{-}$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. - 2019. - 123. - No23. - 231802. arXiv:1905.09244 [hep-ex].

11. Amplitude analysis of the $B_{(s)}^0 \to K^{*0}\overline{K}^{*0}$ decays and measurement of the branching fraction of the $B^0 \to K^{*0}\overline{K}^{*0}$ decay / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1907. – 032. arXiv:1905.06662 [hep-ex].

12. Search for the lepton-flavour-violating decays $B_s^0 \rightarrow \tau^{\pm} \mu^{\mp}$ and $B^0 \rightarrow \tau^{\pm} \mu^{\mp} / R$. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. - 2019. - 123. - No21. - 211801. arXiv:1905.06614 [hep-ex].

13. Measurement of *CP*-violating and mixing-induced observables in $B_s^0 \rightarrow \phi \gamma$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 123. – N \ge 8. – 081802. arXiv:1905.06284 [hep-ex].

14. A search for $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow D^+ p K^- \pi^+$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP - 2019. - 1910. - 124. arXiv:1905.02421 [hep-ex].

15. Measurement of charged hadron production in Z-tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 123. – No23. – 232001. arXiv:1904.08878 [hep-ex].

16. Observation of the Radiative Decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \gamma$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. - 2019. - 123. - No. - 031801.

17. Observation of a narrow pentaquark state, $P_c(4312)^+$, and of two-peak structure of the $P_c(4450)^+$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – No22. – 222001. arXiv:1904.03947 [hep-ex].

18. Observation of an excited B_0^+ state / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. - 2019. - 122. - No22. - 222001. arXiv:1904.00081 [hep-ex].

19. Near-threshold $D\overline{D}$ spectroscopy and observation of a new charmonium state / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1907. – 035. arXiv:1903.12240 [hep-ex].

20. Search for lepton-universality violation in $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. - 2019. - 122. - No19. - 191801. arXiv:1903.09252 [hep-ex].

21. Observation of CP Violation in Charm Decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – №19. – 191801. arXiv:1903.08726 [hep-ex].

22. Measurements of *CP* asymmetries in charmless four-body Λ_b^0 and χ_b^0 decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – N9. – 745. arXiv:1903.06792 [hep-ex].

23. Measurement of the *CP*-violating phase ϕ_s from $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$ decays in 13 TeV *pp* collisions Phys. Lett. – 2019. – B797. – 134789. arXiv:1903.05530 [hep-ex].

24. Measurement of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – №19. – 191801. arXiv:1903.03074 [hep-ex].

25. Search for *CP* violation in $D_s^0 \to K_s^0 \pi^+$, $D^+ \to K_s^0 K^+$ and $D^+ \to \phi \pi^+$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – No19. – 191801. arXiv:1903.01150 [hep-ex].

26. Amplitude analysis of $B_s^0 \to K_s^0 K^{\pm} \pi^{\mp}$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1906. – 114. arXiv:1902.07955 [hep-ex].

27. Measurement of *b* hadron fractions in 13 TeV *pp* collisions / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev. – 2019 – D100. – №3. – 031102. arXiv:1902.06794 [hep-ex].

28. Observation of $B^0_{(s)} \rightarrow J/\psi p\bar{p}$ decays and precision measurements of the $B^0_{(s)}$ masses / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – No19. – 191804. arXiv:1902.05588 [hep-ex].

29. Dalitz plot analysis of the $D^+ \rightarrow K^-K^+K^+$ decay / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1904. – 063. arXiv:1902.05884 [hep-ex].

30. Measurement of B^+ , B^0 and Λ_b^0 production in *pPb* collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16 \text{ TeV} / \text{R}$. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev. - 2019 - D99. - No. - 052011. arXiv:1902.05599 [hep-ex].

31. Measurement of the ratio of branching fractions of the decays $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ and $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1903. – 126. arXiv:1902.02092 [hep-ex].

32. Measurement of the mass and production rate of χ_b^- baryons / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev. – 2019 – D99. – No. – 052006. arXiv:1901.07075 [hep-ex].

33. Observation of the doubly Cabibbo-suppressed decay $\Xi_c^+ \rightarrow p\phi$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1906. – 114. arXiv:1901.06222 [hep-ex].

34. Model-Independent Observation of Exotic Contributions to $B^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$ Decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – No15. – 152002. arXiv:1901.05745 [hep-ex].

35. Study of the $B^0 \rightarrow \rho(770)^0 K^*(892)^0$ decay with an amplitude analysis of $B^0 \rightarrow (\pi^+\pi^-)(K^+\pi^-)$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1905. – 026. arXiv:1812.07008 [hep-ex].

36. Measurement of the branching fraction and *CP* asymmetry in $B^+ \rightarrow J/\psi \rho^+$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – No. – 537. arXiv:1812.07041 [hep-ex].

37. Search for the rare decay $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu_{\mu} / R$. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Eur.Phys.J. – 2019. – C79. – N \otimes 8. – 675. arXiv:1812.06004 [hep-ex].

38. Search for *CP* violation through an amplitude analysis of $D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1902. – 126. arXiv:1811.08304 [hep-ex].

39. First Measurement of Charm Production in its Fixed-Target Configuration at the LHC / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – №13. – 132002. arXiv:1810.07907 [hep-ex].

40. Measurement of the Charm-Mixing Parameter y_{CP} / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – No1. – 011802. arXiv:1810.06874 [hep-ex].

41. Measurement of the branching fractions of the decays $D^+ \rightarrow K^-K^+K^+$, $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+K^+$, and $D_s^+ \rightarrow \pi^-K^+K^+$ / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1903. – 176. arXiv:1810.03138 [hep-ex].

42. Observation of Two Resonances in the $\Lambda_b^0 \pi^{\pm}$ Systems and Precise Measurement of Σ_b^{\pm} and $\Sigma_b^{*\pm}$ properties / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev.Lett. – 2019. – 122. – No15. – 191804. arXiv:1809.07752 [hep-ex].

43. Prompt Λ_c^+ production in *pPb* collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV} / \text{ R}$. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // JHEP – 2019. – 1902. – 102. arXiv:1809.01404 [hep-ex].

Measurement of the relative $B^- \rightarrow D^0/D^{*0}/D^{**0}\mu^-\bar{\nu}_{\mu}$ branching fractions using $B^$ mesons from \bar{B}_{s2}^{*0} decays / R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) // Phys.Rev. – 2019 – D99. – No. – 092009. arXiv:1807.10722 [hep-ex].