

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,
профессор РАН

М.В. Либанов

«31» января 2021 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 2020 год, 2 этап)

ФЦП

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

М.В. Либанов
«31» января 2021 г.

Москва 2021 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



31.01.2021

подпись, дата

М.В. Либанов
(введение, заключение)

Зав. отделом, д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Н.В. Красников
(разделы 1, 2)

К.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Гниненко С.Н.
(разделы 2)

Зав. отделом, д.ф.-м.н.

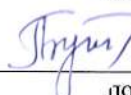


31.01.2021

подпись, дата

Ю.Г. Куденко
(раздел 3, 4, 5)

Д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Буткевич А.В.
(раздел 6)

Д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Пантуев В.С.
(раздел 7)

К.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Титов Н.А.
(раздел 8)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Казалов В.В.
(раздел 9)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Безруков Л.Б.
(раздел 10)

Зав. отделом, д.ф.-м.н.,
чл.-корр. РАН



31.01.2021

подпись, дата

О.Г. Рязская
(раздел 11)

Н.с.



31.01.2021

подпись, дата

Гущин Е.Н.
(раздел 12)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 149 с., 62 рис., 2 табл., 90 источн., 0 прил.

Ключевые слова: АТМОСФЕРНЫЕ МЮОНЫ, ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА, РАДОН, МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, АНТИНЕЙТРИНО, ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, ДВОЙНОЙ БЕЗНЕЙТРИННЫЙ БЕТА РАСПАД АТОМА ГЕРМАНИЯ, СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ИЕРАРХИЯ МАСС НЕЙТРИНО, ФОТОУМНОЖИТЕЛИ, КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ, ЖИДКИЙ СЦИНТИЛЛЯТОР, ИСТОЧНИКИ СВЕТА, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЕЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, ГЕНЕРАТОРЫ МОНТЕ-КАРЛО, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, МАССИВНЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ, ТЕМНЫЙ ФОТОН, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР, АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР, ФИЗИКА КАОНОВ, РЕДКИЕ ПРОЦЕССЫ, C-, P-, T-СИММЕТРИИ И ИХ НАРУШЕНИЕ, ФИЗИКА ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА, НЕЙТРИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, МЮОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ, СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ, БЫСТРЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, СКРЫТЫЕ ФОТОНЫ, МУЛЬТИКАТОДНЫЙ СЧЕТЧИК, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, РЕДКИЕ РАСПАДЫ В-МЕЗОНОВ, НАРУШЕНИЕ СР-ЧЕТНОСТИ, КАЛОРИМЕТРИЯ, 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 2020 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»

Задача посвящена исследованию моделей физики элементарных частиц, которые выходят за рамки Стандартной модели. Кроме того, в рамках данного исследования изучаются процессы, происходящие на инфляционной стадии развития Вселенной, разрабатываются аналитические методы вычисления в теории поля, Монте-Карло моделирования атмосферных ливней. Были изучены перспективы обнаружения процессов

вне рамок Стандартной модели как в столкновительных, так и в лабораторных экспериментах.

Целью исследования является описание новых методов и сценариев физики высоких энергий, которые способны пролить свет на достаточно широкий круг проблем современной физики элементарных частиц, космологии и астрофизики. Кроме того, целью исследования является получение научных результатов мирового уровня для подготовки и закрепления в образовательной и научной сфере научно-педагогических кадров и жизнеспособных научных коллективов.

Главным инструментом исследования процессов в физике элементарных частиц был аппарат математической статистики, аппарат квантовой теории поля, дополненный методами многопетлевых вычислений. Для численного решения задач были использованы пакеты программ, такие как GEANT4, ROOT, CompHep, PYTHIA, Wolfram Mathematica и другие. Кроме того, для расчета реконструкции событий наземной решетки детекторов в эксперименте по детектированию космических лучей ультравысоких энергий был разработан уникальный, основанный на алгоритмах машинного обучения метод.

Ограничения на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий

Многие модели новой физики предсказывают модификацию взаимодействий нейтрино с полями Стандартной модели. В частности, большой интерес представляют новые четырехфермионные нейтринные взаимодействия аналогичные взаимодействию Ферми. Такие взаимодействия приводят к изменению нейтринных осцилляций в веществе. Целью работы было получение ограничений на параметры нестандартных взаимодействий из публичных данных эксперимента IceCube. В результате были получены сильные ограничения на параметры нестандартных взаимодействий нейтрино в нейтральных токах.

Получение ограничений на параметры суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии

Изучена феноменология легкого сголдстино в суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии в прежде неисследованном режиме, в котором с одной стороны масштаб нарушения суперсимметрии достаточно большой и, с другой, имеется смешивание сголдстино с легким бозоном Хиггса. В этом случае, в отличие от ранее изученных режимов без значительного смешивания, сголдстино с массой порядка 1 ТэВ распадается в основном в пары массивных скалярных и векторных бозонов. В частности, одной из сигнатур таких моделей является резонансное рождение пар хиггсовских бозонов. Найдены ограничения на параметры модели из существующих данных, а также получены предсказания сечений изученных процессов для экспериментов на Большой адронном коллайдере.

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

Проект посвящен участию сотрудников ИЯИ РАН в международном эксперименте CMS, проводимого в ЦЕРН (Женева). В результате НИР получены следующие результаты.

- сделан вклад в физическую программу CMS: группа ИЯИ РАН проводила моделирование и анализ экспериментальных данных БАК с целью поиска нового калибровочного правого бозона W_R и майорановского нейтрино и изучала двуструйные события в рамках поиска физики за пределами Стандартной модели (СМ) и определения пределов применимости СМ;

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

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

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

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

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

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

Объектом исследования являются темная материя в виде скрытых фотонов.

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

Изготовлен мультикаточный счетчик с алюминиевым катодом усовершенствованной конструкции. Проведены калибровочные измерения с источником ультрафиолетового излучения. Проведены измерения скорости счета одиночных

электронов, эмитируемых из алюминиевого катода на смеси неон + метан (10%). Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода $(0.81 \pm 0.08) \cdot 10^{-4}$ Hz/cm². По результатам измерений получен верхний предел на параметр кинетического смешивания: $< 1 \times 10^{-11}$ в диапазоне масс скрытого фотона от 9 до 40 эВ. Результат включен в компиляцию данных по свойствам элементарных частиц в Review of Particle Physics в журнале Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

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

Продолжается совершенствование методики на счетчике усовершенствованной конструкции при разных заполнениях счетчика. Проведены первые измерения при температуре, близкой к нулю по Цельсию, при охлаждении с помощью элементов Пельтье. Результаты измерений обрабатываются.

Участие в международном эксперименте NA64

Проект посвящен участию сотрудников ИЯИ РАН в международном эксперименте NA64, проводимого в ЦЕРН (Женева). В результате НИР получены следующие результаты.

- разработаны подсистемы модернизированного детектора NA64 для сеанса 2021 г. и далее, и начато их полномасштабное производство;

- по результатам анализа экспериментальных данных 2016-2018 гг. поставлен предел на константу связи нового гипотетического бозона X17: $\epsilon < 6,8 \times 10^{-4}$ для области масс $m_X \approx 17$ МэВ и на константу связи нового векторного бозона A': $10^{-4} < \epsilon < 3 \times 10^{-3}$ для области масс A': $1 \text{ МэВ} < m_A < 25 \text{ МэВ}$. Этот результат в настоящее время лучше, чем результаты других экспериментов по поиску частиц X17 и A';

- проведен комбинированный анализ экспериментальных данных, полученных в результате экспозиции 2017-2018 гг., и результатов компьютерной симуляции методом Монте-Карло, на основании которого предложена новая установка для поиска видимой моды распада бозонов X17 и A' в сеансах 2021 г. и далее;

- по результатам анализа экспериментальных данных 2016-2018 гг. поставлен предел на константу связи новых аксионоподобных (a) и скалярных (s) частиц из распадов $a/s \rightarrow \gamma\gamma$, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в мишени установки NA64: $2 \times 10^{-4} \leq g_{a\gamma\gamma} \leq 5 \times 10^{-2} \text{ ГэВ}^{-1}$ в области масс $m_{a/s} \leq 55 \text{ МэВ}$, этот результат в настоящее

время лучше, чем результаты других экспериментов по поиску аксионоподобных и скалярных частиц;

- проведены оценки интенсивности потоков аксионоподобных и скалярных частиц, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в мишени установки, а также предложена новая постановка эксперимента по возможной регистрации этих потоков;

- подготовлено и опубликовано в печати предложение нового поколения эксперимента NA64 по поиску скрытого сектора частиц и полей на мюонном пучке M2 SPS CERN.

3. Задача «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP»

Объектом разработки являются пластиковые сцинтилляционные детекторы.

Цель работы — создание в ИЯИ РАН новых нейтринных и мюонных детекторов для экспериментов ГиперКамиоканде, T2HK 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).

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. были протестированы в Италии на космических лучах.

Эксперимент JUNO

Основными результатами работ 2020 года, в которых принимала активное участие группа, является окончательная оптимизация жидкого сцинтиллятора для центрального детектора эксперимента JUNO и завершение массового производства малогабаритных фотоумножителей (26 тысяч штук) для этого эксперимента. Разработана система быстродействующих источников света для отбора, тестирования и исследования параметров малогабаритных фотоумножителей и система инъекции световых импульсов для засветки большого количества тестируемых фотоумножителей на основе пластиковых оптоволоконных кабелей. Эти системы активно используются в настоящее время в экспериментальных комплексах, созданных коллаборацией для массового тестирования

таких фотоумножителей для эксперимента JUNO в Гуансийском университете и в Национальном университете Тайваня.

4. Задача «Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск CP нарушения и возможное обнаружение нового источника CP 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 2020 году ИЯИ РАН продолжил работу в международном нейтринном осцилляционном эксперименте T2K (Япония). С ноября 2019 г. по февраль 2020 г. проведен сеанс (№10, начиная с 2010 г.) по набору статистики, во время которых достигнута мощность нейтринного пучка на уровне 522 кВт, причем ускоритель J-PARC работал в стабильном режиме при мощности пучка 515 кВт. Продолжен осцилляционный анализ данных, набранных в сеансах 2010-2020 гг., как при поиске дефицита мюонных (анти)нейтрино, так и при поиске появления электронных (анти)нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде на расстоянии 295 км от ускорителя J-PARC в Токай. В результате комбинированного анализа нейтринных и антинейтринных данных дальнего детектора Супер-Камиоканде с использованием ограничений на систематические ошибки нейтринного потока и сечений нейтринных взаимодействий, полученных с помощью ближнего детектора ND280, удалось существенно улучшить чувствительность к осцилляционным параметрам и CP нарушающей фазе.

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

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

Объектом исследования являются каонные распады.

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

В 2020 году сотрудники ИЯИ РАН продолжали принимать активное участие в анализе данных и Монте-Карло моделировании каонных экспериментов, в частности, NA62

(CERN), E949 (BNL), E36 (KEK), ОКА (ИФВЭ, Протвино). Была проведена работа по измерению вероятности распада положительного каона на пион и два нейтрино (NA62) на основе данных 2016-2018 гг. и получен новый результат $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (11,0 + 4,0 - 3,5 \text{ (stat.)} \pm 0,3 \text{ (syst.)}) \times 10^{-11}$. Проведён поиск тяжёлых нейтральных лептонов (тяжёлых нейтрино) в продуктах каонных распадов как в данных NA62, так и в данных ближнего детектора ND280 нейтринного эксперимента T2K. Осуществлён поиск «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также проведена оценка чувствительности к массе аксионо-подобных частиц, образовавшихся в каонных распадах эксперимента NA62. Продолжена работа по поиску редких распадов каонов, чувствительных к нарушению CP и T инвариантности. В эксперименте ОКА измерен распад $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \gamma$ и для энергии фотона $E_\gamma > 30 \text{ МэВ}$ измерена вероятность распада, которая находится в хорошем согласии с предсказанием ChPT O(p4).

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

Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis ν_e 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. Миннесота, США). Полученные новые ограничения на разности квадратов масс нейтрино Δm^2_{32} , значения $\sin^2(\theta_{23})$ угла смешивания θ_{23} , фазы нарушения CP-инвариантности и иерархии масс нейтрино.

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

Основным результатом проведенной в 2020 году работы является проведение сеанса измерений на установке «Троицк ню-масс». В результате сеанса были оптимизированы магнитные поля в спектрометре, выполнены калибровочные измерения отклика детектора на электроны с энергией 12-20 кВ. Произведен набор статистики для дальнейшей обработки с целью поиска пределов на возможное существование стерильных нейтрино в диапазоне масс в несколько кэВ. Начата обработка статистики. В ходе сеанса были опробованы новые элементы оборудования – масс-анализатор остаточных газов в спектрометре, был заменен основной магнито-разрядный насос спектрометра с модернизированными блоками питания, расходомер массы газообразного гелия. Выполнен ряд расчетов по оптимизации магнитного поля спектрометра. Продолжен анализ ранее набранной статистики по

прецизионному измерению бета спектра трития в диапазоне энергии электронов 14-18,5 кэВ. Помимо основной системы регистрации, параллельно был задействован вариант с полной оцифровкой сигналов с детектора. Это позволит уменьшить влияние мертвого времени электроники и уменьшить долю сигналов с наложениями. Завершен анализ данных по результатам очистки спектрометра от загрязнения тритием. На основании этого анализа написана и послана в печать статья, которая находится на рассмотрении. Выполнен ряд запланированных расчетных работ по исследованию отклика детектора, особенно в около-пороговой области. В течение 2020 года постоянно проводились работы по профилактике, замене и ремонту криогенного и вакуумного оборудования. Начаты две новые разработки методов поиска стерильных нейтрино с источником трития на основе графена и в распаде изотопа бериллия-7.

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

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

Цель работы - поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета- распаде трития в эксперименте КАТРИН.

В основе установки КАТРИН лежит идея электростатического спектрометра с адиабатической магнитной коллимацией, предложенная в 1983 году советскими физиками, членами-корреспондентами АН СССР, В.М.Лобашевым и П.Е. Спиваком. Новый подход позволил сочетать высокое разрешение спектрометра и неограниченную площадь беззаконного газового источника молекулярного трития. Группой В.М. Лобашева, в ИЯИ РАН была создана установка «Троицк ню-масс» и получено ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино на уровне 2,05эВ. В течение 16 лет этот результат был лучшим в мире.

В конце 1990-х группа В.М. Лобашева приступила к разработке проекта ее расширенного варианта, получившего позднее название КАТРИН, и вошла в первоначальный состав участников международного проекта, который сейчас состоит из

более 120 исследователей из 20 институтов 7 стран.

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

Весной 2019 года был проведен четырехнедельный цикл измерения массы нейтрино. Несмотря на то, что содержание трития составляло только 25% от номинального, анализ данных привел к ограничению на эффективную массу электронного антинейтрино $m_\nu < 1,1$ эВ, что превосходит по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты [1]. В 2020 году было проведено еще три сеанса измерений, результаты обрабатываются. Основное внимание было направлено на повышение чувствительности измерений и долговременную стабильность и контроль качества получаемых данных.

В результате выполненных работ продемонстрирована достижимость проектной чувствительности к эффективной массе электронного антинейтрино. За 2020 год публикации по разным аспектам проекта собрали более 200 ссылок в высокорейтинговых журналах.

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

Проект посвящён решению следующих задач:

1) Поиск 2К-захвата в Xe-124.

В лаборатории Низкофоновых исследований проводится эксперимент по поиску двухнейтринного 2К-захвата в Xe-124. Для этих целей используется медный пропорциональный счетчик большого объема, заполненный до 5 ат (5,8 атт.) ксеноном, обогащенным по изотопу Xe-124, до $\sim 21\%$. Сигналы с детектора через предусилитель подаются на вход цифрового осциллографа и, после оцифровки, с заранее заданными параметрами, записываются на жёсткий диск ПК. Такой способ сохранения информации позволяет в офлайн режиме проводить отбор полезных импульсов по форме импульса. На данный момент, после предварительной обработки, в области интересов искомого процесса ($63,6 \pm 3,7$ кэВ), наблюдается ~ 18 событий, что соответствует значению $T_{1/2} \sim 1,74 \cdot 10^{22}$ лет.

2) Поиск безнейтринного двойного бета распада Mo-100 в составе международной коллаборации AMoRE.

Сотрудники лаборатории низкофонных исследований являются участниками международной коллаборации AMoRE.

Данный эксперимент направлен на поиск безнейтринного двойного бета-распада Mo-100 с помощью криогенных болометров на основе сцинтилляционных кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$, а также $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Эксперимент проводится в Южной Корее, в подземной лаборатории Янг-Янг. В 2020 г. началась первая фаза эксперимента – AMoRE-I. В общей сложности используется 18 сцинтилляционных кристаллов: 13 кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и 5 кристаллов $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Общая масса кристаллов составляет более 6 кг. Ожидается достичь чувствительности экспериментальной установки по периоду полураспада ^{100}Mo относительно безнейтринной моды двойного бета-распада на уровне $\sim 10^{24}$.

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

По задаче «Эксперименты GERDA и LEGEND» – учёные из ИЯИ РАН в 2020 году участвовали в экспериментах GERDA и LEGEND, расположенных в LNGS INFN. Целью экспериментов является поиск двойного безнейтринного бета распада атома германия. В рамках экспериментах GERDA была произведена обработка данных, получен результат и опубликована статья об окончательном результате GERDA. В рамках эксперимента и LEGEND продолжалась подготовка к началу работы эксперимента. Учёные дистанционно участвовали в рабочих совещаниях обоих экспериментов.

По задаче «Эксперимент Double Chooz» – целью работы является измерение третьего угла смешивания нейтрино θ_{13} . В работе использован метод относительных измерений. Измерения выполнялись одновременно двумя идентичными детекторами, расположенными на разном расстоянии от ядерного реактора: в первом осцилляции отсутствовали (400 м), а во втором присутствовали (1050 м). Разница показаний двух детекторов дает искомый эффект осцилляций и позволяет определить угол смешивания нейтрино. В 2020 годы проводился анализ сделанных ранее измерений.

Был сделан анализ на возможность осцилляций в стерильное нейтрино по измерениям на двух расстояниях от ядерного реактора. Получены новые ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние. Проведен анализ по новой методике (RRM, Reactor rate modulation) по определению угла смешивания нейтрино. Проведен анализ измерений во время остановки реактора и впервые получен спектр антинейтрино от долгоживущих осколков деления. Ранее этот спектр никогда не наблюдался.

Полученные результаты могут использоваться для расчетов потоков антинейтрино на различных расстояниях от ядерного реактора при планировании новых экспериментов. Также полученное значение угла смешивания нейтрино будет учитываться при расчете

потоков нейтрино и антинейтрино при постановке любых экспериментов на нейтринных пучках.

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

Объектом исследования являются атмосферные мюоны со средней энергией 280 ГэВ, 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 фон естественной радиоактивности, измеряемый детектором LVD. Проведен анализ мюонов, пересекающих детектор LVD в горизонтальном направлении за 15 лет работы установки. Горизонтальные мюоны проходят в грунте около 5 км в.э., пороговая энергия для них составляет 4,7 ТэВ, средняя энергия около 400 ГэВ. Разработана методика определения вариаций нейтронов от мюонов горизонтального направления. Получено, что величина вариаций удельного числа нейтронов для горизонтальных мюонов составляет $15 \pm 3 \%$.

Проведен анализ низкоэнергетического темпа счета событий детектора, связанный, в основном, с изменением выхода радона из грунта. Установлена зависимость темпа счета установки LVD от изменения температуры, влажности и давления в экспериментальном зале при изменении условий вентиляции помещения.

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

Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г.

Объектом исследования являются редкие распады B- мезонов и прецизионное измерение параметров CP-нарушения с целью проверки Стандартной модели и поиска эффектов Новой Физики. Эксперимент LHCb сегодня является мировым лидером по изучению физики тяжелых кварков. Продолжается обработка набранных ранее данных, в 2020 г. получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе наблюдение новых пентакварков; открытие CP нарушения в распадах B_s частиц; поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$.

Модернизация детектора LHCb

Объектом исследования является модернизация калориметрической системы. Цель работы — подготовка установки к работе с повышенной светимостью. Установка будет оптимизирована для работы с повышенной светимостью $2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{s}^{-1}$, 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.

Работы по полному демонтажу предливневого и сцинтилляционно-падового детектора были выполнены. Супермодули детекторов и пластины свинцового конвертора демонтированы и транспортированы в место временного хранения в кассетах. Все работы выполнены в полном объёме при полном соблюдении правил техники безопасности.

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 ЛНСб предусматривает увеличение светимости после 2030 года до 2×10^{34} /см²/сек. 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 улучшения энергетического, временного и пространственного разрешения модулей с улучшенной сэмплинг-структурой.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ	16
ВВЕДЕНИЕ	20
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	34
1.1. Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки стандартной модели. Развитие аналитических методов вычисления в квантовой теории поля	34
1.1.1. Разработка аналитических методов многопетлевых вычислений	34
1.2. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели	36
1.2.1. Рождение аксионо-подобных частиц в сверхпроводящем резонаторе	36
1.2.2. Теоретическое обоснование будущих и текущих экспериментов — NA64	37
1.2.3. Развитие методов вычисления структурных функций и партонных распределений ядер	38
1.2.4. Исследование нетопологических солитонов в теории поля	39
1.3. Построение новых космологических моделей ранней Вселенной. Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии. Астрофизика космических лучей	40
1.3.1. Исследование расширенных теорий гравитации Хорднески	40
1.3.2. Построение новых моделей гравитации. Исследование процессов образования и возможных астрофизических проявлений первичных чёрных дыр	42
1.3.3. Исследование возможности поиска новых частиц в эксперименте ShiP и других экспериментах. Исследование механизмов рождения новых частиц в ранне Вселенной	43
1.4. Ограничения на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий	43
1.5. Получение ограничений на параметры суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии	44
1.6. Анализ данных эксперимента CMS	44
1.6.1. Участие в международных экспериментах в CERN: эксперимент CMS	44
1.6.2. Сертификация КФЭУ для новой электроники адронного калориметра	46
1.6.3. Сборка и проверка блоков считывания и модулей новой электроники адронного калориметра	49
1.6.4. Исследование характеристик работы адронного калориметра	52
1.6.5. Программное обеспечение эксперимента CMS	55
2. Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной материи	57

2.1.	Участие в международных экспериментах в CERN: эксперимент NA64	61
2.1.1.	Статус эксперимента NA64 в 2020 г.	61
2.1.2.	Результаты работы и достижения по эксперименту NA64	62
3.	Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP	68
3.1.	Разработка и создание новых нейтринных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK	68
3.1.1.	Магнитный нейтринный детектор Baby-MIND	68
3.1.2.	Сцинтилляционный сегментированный нейтринный 3D детектор SuperFGD70	70
3.2.	Разработка и создание новых мюонных детекторов для эксперимента следующего поколения по поиску темной материи SHiP	70
3.2.1.	Сцинтилляционные счётчики для эксперимента SHiP	72
3.3.	Эксперимент JUNO	72
4.	Существенное улучшение определения осцилляционных параметров мюонных нейтрино и антинейтрино (T2K). Чувствительный поиск CP нарушения и возможное обнаружение нового источника CP нарушения в нейтринном секторе. Поиск стерильных нейтрино	74
4.1.	Продолжение набора статистики в эксперименте T2K по изучению осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в 2020 г.	74
4.1.1.	Осцилляционный анализ данных 2010-2020 гг.	74
4.2.	Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях	74
4.2.1.	Улучшение чувствительности к CP нарушению в эксперименте T2K и получение нового результата	74
4.3.	Поиск стерильных нейтрино в эксперименте T2K	75
4.3.1.	Поиск стерильных нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K	75
5.	Измерение распада каона на пион и два нейтрино. Поиск тяжёлых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах мезонов. Исследование редких распадов каонов, чувствительных к CP и T нечётным эффектам	77
5.1.	Измерение распада каона на пион и два нейтрино в эксперименте NA62 (ЦЕРН)	77
5.1.1.	Результат анализа данных NA62, полученных в сеансах 2016-2018 гг.	77
5.2.	Поиск тяжелых нейтральных лептонов, а также «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к CP и T нечетным эффектам	78
5.2.1.	Поиск «тёмных» фотонов и аксионо-подобных частиц в распадах каонов; исследование редких распадов каонов, чувствительных к CP и T нечетным эффектам	78
5.3.	Исследование распадов каонов на лету в эксперименте ОКА	80

6. Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов	81
7. Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке Троицк-ню-масс	83
7.1. Экспериментальная установка	83
7.2. Полученные в 2020 году результаты	83
7.2.1. Завершающая очистка спектрометра от остаточного трития	83
7.2.2. Проведение сеанса измерений	84
7.3. Разработка новых методов по поиску стерильных нейтрино в диапазоне масс ниже 1 МэВ	85
8. Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов, обработка данных	87
8.1. Эксперименты по поиску эффективной массы электронного нейтрино	87
8.2. Проект КАТРИН	89
8.3. Работы по проекту КАТРИН сотрудников ИЯИ РАН	92
8.3.1. Калибровочные измерения для специальной конфигурации электромагнитных полей	92
8.4. Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино	96
9. Поиск 2К-захвата в Хе-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE	100
9.1. Поиск 2К-захвата в Хе-124	100
9.2. Поиск безнейтринного двойного бета распада Мо-100 в составе международной коллаборации AMoRE	100
10. Поиск двойного безнейтринного бета распада изотопа ^{76}Ge . Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA	102
10.1. Эксперименты GERDA и LEGEND	102
10.2. Эксперимент Double Chooz	104
10.2.1. Измерение угла смешивания нейтрино методом RRM	104
10.2.2. Поиск стерильных нейтрино	105
10.2.3. Измерение спектра долгоживущих осколков во время остановки реактора	105
11. Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо	107
11.1. Измерение сезонных вариаций нейтронов от мюонов, измеренных на LVD	107
11.1.1. Описание эксперимента и метод регистрации мюонов разных направлений	107
11.1.2. Определение временных характеристик нейтронов	108
11.2. Измерение низко-энергетического фона детектора LVD	111

11.2.1.	Метод регистрации фоновых импульсов	111
11.2.2.	Измерения температуры, влажности и давления	112
12.	Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г. Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра	115
12.1.	Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г.	115
12.1.1.	Измерения отклонений от модели “лептонной универсальности” в распадах $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ в эксперименте LHCb	115
12.1.2.	Первое наблюдение время-зависимого CP нарушения в распадах B_s мезонов в эксперименте LHCb	116
12.1.3.	Поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B \rightarrow K + l + l^-$	117
12.2.	Модернизация детектора LHCb	118
12.3.	Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра	119
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	132
	ПУБЛИКАЦИИ	138

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»

Одной из наиболее актуальных задач современной физики является исследование теоретических проблем физики частиц, космологии, астрофизики и столкновительных экспериментов. Новые экспериментальные возможности наземных, космических телескопов, а также запуск Большого адронного коллайдера позволят решить множество вопросов физики частиц, астрофизики и космологии. К таким вопросам, в частности, относятся проблемы возникновения масс и нарушения электрослабой симметрии, а также проблема структура темной материи.

Отметим, что в последнее время большое внимание научного сообщества уделяется проверке сценариев с легкой темной материей, с массой меньше 1 ГэВ, например, аксионо-подобных частиц. Особый интерес представляет проверка таких моделей на ускорительных экспериментах с фиксированной мишенью. Кроме того, поиск легкой темной материи может быть произведен в лабораторных условиях. В частности, в сверхпроводящей полости, заполненной электромагнитным излучением. В основной части отчета описаны теоретические и экспериментальные результаты по этой проблеме. В основной части отчета также дано описание методов многопетлевых вычислений, необходимых при исследовании процессов на Большом адронном коллайдере. 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. В контексте астрофизических исследований, описан уникальный метод анализа направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий с помощью тестовой статистики, построенной с применением алгоритмов машинного обучения. В исследовании также дается описание альтернативных к инфляции сценариев развития Вселенной и изучается проблема первичных черных дыр в ранней Вселенной.

Ограничения на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий

Многие модели новой физики, объясняющие возникновение массы нейтрино, предсказывают модификацию взаимодействий нейтрино с полями Стандартной модели. В настоящее время ведутся активные поиски проявлений нестандартных взаимодействий

нейтрино в различных нейтринных экспериментах, в том числе в экспериментах по изучению нейтринных осцилляций и в экспериментах по измерению когерентного рассеяния нейтрино. Получение ограничений на такие параметры из экспериментальных данных приводит, в свою очередь, к ограничениям на модели новой физики, объясняющие возникновение масс нейтрино, что делает эту задачу весьма актуальной. Целью данной работы было получение ограничений на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий в нейтральных токах из данных эксперимента IceCube/DeepCore по атмосферным нейтрино.

Получение ограничений на параметры суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии

Интересным классом моделей новой физики являются суперсимметричные модели с низким масштабом нарушения суперсимметрии. В таких моделях частицы сектора, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии могут быть достаточно легкими и образовываться в протон-протонных столкновениях на LHC. В частности, этот сектор содержит голдстоуновский фермион – голдстино, который приобретает массу в моделях супергравитации и становится массивным суперпартнером гравитона – гравитино. Суперпартнерами голдстино в простейших сценариях могут быть скалярные поля – сголдстино. Их константы взаимодействия с полями Стандартной модели определяются параметрами MSSM, мягко нарушающими суперсимметрию. Коллайдерная феноменология сголдстино представляет большой интерес и при типичной иерархии мягко нарушающих суперсимметрию параметров доминирующими модами распада тяжелого (с массой более 100 ГэВ) сголдстино являются распады на пару глюонов и пару фотонов. В нашей работе изучена область пространства параметров, в которой сголдстино распадается в основном в массивные бозоны.

Участие в международном эксперименте CMS

Открытие малости масс нейтрино может быть связана с существованием их партнеров – более тяжелых нейтрино, возникающих во многих расширениях Стандартной модели (СМ), что делает их поиск актуальной и важной задачей. Тяжелые нейтрино с массами $M_N > M_Z$ возникают в теориях великого объединения, в моделях с дополнительными измерениями и моделях типа Little Higgs, а также в лево–право симметричных моделях.

Сотрудниками ИЯИ РАН в рамках минимальной лево-право симметричной модели (ЛПСМ) было продолжено исследование процесса рождения и возможности экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте CMS в ЦЕРНе. Модель объясняет нарушение

четности в слабых взаимодействиях и предсказывает существование дополнительных калибровочных бозонов W_R и Z' , а также семейства тяжелых нейтрино N майорановского типа. Тяжелые нейтрино с массами порядка электрослабых могли бы рождаться на современных ускорителях, если их константы связи с фермионами и калибровочными бозонами SM не очень малы, или, например, за счет нестандартных взаимодействий. Обычно полагается, что тяжелые нейтрино являются синглетами SM и не имеют новых взаимодействий. Таким образом, поиск тяжелых нейтрино является одним из актуальных и, возможно, оптимальных путей, которые могут привести к созданию новой, более полной, теории.

Эксперимент CMS на БАК в ЦЕРНе является одним из основных экспериментов, использующим крупномасштабный многоцелевой детектор и открывающим новые перспективы для исследования широкого круга фундаментальных проблем и поиска новых явлений, лежащих за пределами SM . Среди нескольких расширений SM , которые могут быть исследованы на CMS, ЛПСМ определенно является одной из наиболее привлекательных. Модель включает дополнительно три тяжелых калибровочных бозона, $W_R^\pm$ и Z' , а также три правых тяжелых майорановских нейтрино, N_i . Эти нейтрино могут быть партнерами легких нейтринных ароматов, т.е. соответственно электронного, мюонного и тауонного нейтрино, и могут генерировать их массы посредством механизма типа «see-saw». Это делает поиски тяжелых нейтрино в эксперименте CMS чрезвычайно важными и актуальными.

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

В 2020 году CERN находился в периоде длительной остановки ускорителя (LS2 – Long Shutdown 2). Эти остановки необходимы для исправления и улучшения работы ускорителя и экспериментальных установок. В течение 2020 года на установке CMS было

проведено несколько сеансов работы с космическими лучами, так называемые MWGR (Mid-Week Global Runs), чтобы контролировать работу детекторов CMS. Изучение с помощью космических лучей дает хорошую возможность проверить фоновые условия в адронном калориметре установки CMS (аппаратный фон) в отсутствие физических процессов.

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

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

В настоящее время надежно установлено из множества астрофизических наблюдений, а также точного измерения космологического фона микроволнового излучения, что не барионная холодная темная материя является существенным ингредиентом в нашем понимании, как устроена Вселенная. Поиск темной материи, имеющей примерно в 5 раз большую массу, чем видимая (барионная) материя, является важной задачей современности. В период с 90-х годов прошлого столетия по настоящее время создан ряд экспериментальных установок, на которых предприняты попытки обнаружения частиц – кандидатов на темную материю. Наибольшие надежды до сих пор возлагались на слабовазаимодействующие 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 [2].

Одним из альтернативных кандидатов на темную материю являются скрытые фотоны. Поиск темной материи в виде скрытых фотонов предпринимался в ряде работ, продолжается он и по настоящее время. Нами был предложен оригинальный метод поиска скрытых фотонов по регистрации одиночных электронов с поверхности металла. За 2016-2020 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.
7. Разработан новый метод регистрации скрытых фотонов по суточным вариациям скорости счета с помощью сборки мультикатодных счетчиков в подземной лаборатории. Метод позволяет по результатам суточных вариаций скорости счета восстановить направление вектора поля скрытых фотонов относительно плоскости Галактики.
8. Проведены первые измерения на счетчике при температуре близкой к нулю по Цельсию при охлаждении детектора с помощью элементов Пельтье. Результаты измерений обрабатываются.
9. Продолжается работа по дальнейшему совершенствованию методики.

Участие в международном эксперименте NA64

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

Проект эксперимента по поискам нового бозона на протонном суперсинхротроне в ЦЕРНе был разработан и направлен в научный комитет SPSC CERN осенью 2014 года учеными из ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ (Протвино) и ОИЯИ (Дубна). Тёмный бозон - гипотетическая частица-посредник, переносящая дополнительные взаимодействия между нашим видимым миром и темной материей. Новая частица аналогична обычному фотону, кванту света, переносящему электромагнитные взаимодействия между элементарными частицами, однако, в отличие от него, обладает массой. Многие научные группы в мире, включая такие страны, как США и Япония, ищут тёмный бозон, но пока безуспешно. Сегодня в физике высоких энергий нет задачи более важной, чем поиск хоть каких-то указаний на свойства темной материи, например, проявления сил, которые связывают ее с обычным миром. Известно, что темная материя взаимодействует с нашим веществом слабо, в основном посредством гравитации, поэтому

судить о ее дополнительных свойствах и взаимодействиях приходится по косвенным признакам – нестыковкам в экспериментах и аномалиям в наблюдениях, таким, как избыток позитронов, который обнаружила коллаборация спутника PAMELA несколько лет назад. Строятся различные гипотезы, в которых пытаются объяснить эти необычные факты. Одна из гипотез предполагает существование легкого темного бозона. Постановкой экспериментов по поиску темного бозона занимаются многие научные группы в мире, в том числе ЦЕРН. Проблема в том, что неизвестны ни константа взаимодействия этой частицы, ни ее масса, и вариантов распада можно предположить множество. Однако лет десять назад появилась т. н. мюонная $g-2$ аномалия, расхождение между теоретическим и экспериментальными значениями величины аномального магнитного момента мюона, которая усилила интерес к этой гипотезе. Это известный эксперимент по измерению аномального магнитного момента мюона, проведенный Брукхейвенской национальной лабораторией в США. Результаты эксперимента расходились с предсказаниями на величину 3,6 стандартного отклонения. Были исключены несколько объясняющих расхождение сценариев, таких, например, как суперсимметрия. В числе оставшихся объяснений наиболее привлекательным является вклад в $g-2$ за счет существования легкого темного бозона, который может распадаться невидимым образом, например, на пару более легких частиц из скрытого сектора. Такие свойства процесса – распад невидимой частицы по невидимому каналу – делает поиск крайне затруднительным.

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

Впервые метод поиска процесса рождения и регистрации невидимых распадов A' был предложен С.Н. Гниненко. Если A' , перемешивающийся с обычным фотоном, существует, он может рождаться в процессах тормозного излучения фотонов обычными электронами высокой энергии. Существование таких частиц может быть зарегистрировано путем аккуратного измерения полной энергии, выделившейся в детекторе, и проявляет себя

как присутствие событий с большой недостающей энергией. В этом и состоит основная идея эксперимента NA64.

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

Установка NA64 состоит из следующих детекторов:

- магнитный спектрометр с трековыми камерами типа Micromegas;
- система мечения 100-гэВных электронов на основе регистрации синхротронных фотонов с помощью специально разработанных детекторов типа сэндвич из примерно 200 слоев (Sc+Pb) с толщиной абсорбера порядка 100 мкм;
- электромагнитный калориметр типа «шашлык»;
- массивный адронный калориметр;
- высокоскоростная система сбора данных.

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

3. Задача «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP»

В 2020 году в ИЯИ РАН была продолжена разработка, создание и тестирование различных детекторов для экспериментов следующего поколения, начало работы которых планируется на 2026-2027 годы. К ним относятся ГиперКамиоканде – многоцелевой эксперимент с черенковским детектором объёмом 260 тысяч тонн чистой воды; T2HK (из Токая в ГиперКамиоканде) – нейтринный эксперимент с протонным ускорителем и ближним детектором в J-PARC (Японский протонный ускорительный центр), Токай, Япония, и ГиперКамиоканде в качестве дальнего детектора; SHiP (Search for Hidden Particles) – эксперимент по поиску частиц тёмной материи на ускорителе SPS (Super Proton Synchrotron) в Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN). Для ГиперКамиоканде и T2HK разрабатываются нейтринные детекторы, а для SHiP – мюонные детекторы, основой которых являются пластиковые сцинтилляторы. Часть детекторов уже создана и работает (Baby-MIND, WAGASCI), а часть детекторов (SuperFGD, ToF) в

ближайшее время будет использована для модернизации ближнего детектора ND280 действующего нейтринного эксперимента T2K (Tokai to Kamioka).

Эксперимент JUNO

Одной из основных задач эксперимента JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) является измерение иерархии масс нейтрино. Экспериментальная установка состоит из 20 ктонн жидкого сцинтиллятора, который просматривается 18 тысячами крупногабаритными фотоумножителями с полусферическими фотоумножителями диаметром 0,5 м и 25 тысячами малогабаритных фотоумножителей с фотокатодами размером ~8 см. Такая двойная система фотодетекторов призвана обеспечить наряду с высокими параметрами жидкого сцинтиллятора рекордное энергетическое разрешение эксперимента, которое необходимо для измерения иерархии масс нейтрино. Для улучшения чувствительности эксперимента JUNO разрабатывается проект ближнего детектора ТАО, который будет располагаться в непосредственной близости от реакторных комплексов. В этом детекторе гадолинийсодержащий жидкий сцинтиллятор будет просматриваться кремниевыми фотоумножителями. Для достижения высокой чувствительности детектора ТАО жидкий сцинтиллятор и кремниевые фотоумножители будут поддерживаться при температуре -50°C. Поэтому необходимо тщательно исследовать их поведение при этой температуре.

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

В 2020 году ИЯИ РАН продолжил работу в международном нейтринном осцилляционном эксперименте T2K (Япония). С ноября 2019 г. по февраль 2020 г. проведен сеанс (№10, начиная с 2010 г.) по набору статистики, во время которых достигнута мощность нейтринного пучка на уровне 522 кВт, причем ускоритель J-PARC работал в стабильном режиме при мощности пучка 515 кВт. Продолжен осцилляционный анализ данных, набранных в сеансах 2010-2020 гг., как при поиске дефицита мюонных (анти)нейтрино, так и при поиске появления электронных (анти)нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде на расстоянии 295 км от ускорителя J-PARC в Токай. В результате комбинированного анализа нейтринных и антинейтринных данных дальнего детектора Супер-Камиоканде с использованием ограничений на систематические ошибки нейтринного потока и сечений нейтринных взаимодействий, полученных с помощью ближнего детектора ND280, удалось существенно улучшить чувствительность к осцилляционным параметрам и CP нарушающей фазе.

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

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

В 2020 году сотрудники ИЯИ РАН продолжали принимать активное участие в анализе данных и Монте-Карло моделировании каонных экспериментов, в частности, NA62 (CERN), E949 (BNL), E36 (KEK). Была проведена работа по измерению вероятности распада положительного каона на пион и два нейтрино (NA62) на основе данных 2016-2018 гг. и получен новый результат $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11,0 + 4,0 - 3,5 \text{ (stat.)} \pm 0,3 \text{ (syst.)}) \times 10^{-11}$. Проведён поиск тяжёлых нейтральных лептонов (тяжёлых нейтрино) в продуктах каонных распадов как в данных NA62, так и в данных ближнего детектора ND280 нейтринного эксперимента T2K. Осуществлён поиск «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также проведена оценка чувствительности к массе аксионо-подобных частиц, образовавшихся в каонных распадах эксперимента NA62. Продолжена работа по поиску редких распадов каонов, чувствительных к нарушению CP и T инвариантности.

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

Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые могут появиться в пучках мюонных (анти)нейтрино, в результате $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. Это дает возможность определить вероятность таких переходов, а следовательно, и угол смешивания θ_{13} , фазу нарушения CP инвариантности в лептонном секторе и иерархию масс нейтринных состояний. Наблюдение нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, которое само по себе является открытием, явилось бы экспериментальным базисом для фундаментальной идеи лептогенезиса, которая объясняет барионную асимметрию Вселенной. Этот эксперимент также определит с высокой точностью и другие параметры осцилляций, что позволит понять различие между смешиванием кварков и лептонов. Описание программы исследований и детекторов можно найти на сайте <https://novaexperiment.fnal.gov>.

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

Определение массовой шкалы абсолютных и число нейтрино массовых состояний является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для

космологии и астрофизике. Ненулевая масса для левых активных нейтрино, косвенно наблюдалась в экспериментах по осцилляции нейтрино, что допускает существование правых стерильных нейтрино. Диапазон возможных значений массы нейтрино для правых нейтрино ничем не ограничен в настоящее время. Предположение о том, что достаточно одного очень легкого состояния нейтрино в дополнение к трем активным состояниям не может быть совместимо с современными космологическими данными. Стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько кэВ могут являться естественным кандидатом на роль темной материи.

Нейтринные состояния, такие как ν_e , ν_μ , ν_τ и стерильные нейтрино ν_s не являются собственными массовыми состояниями, и могут быть представлены в виде когерентных сумм таких состояний. В частности, спектр электронов в бета-распаде можно представить как $S(E) = \sum U_{ei}^2 \cdot S(E, m_i^2)$, где $S(E, m_i^2)$ является спектром с определенной массой собственного состояния нейтрино. Число стерильных состояний нейтрино неизвестно. Если три первых состояния имеют массу близкую к нулю, то можно отдельно выделить вклад тяжелого нейтрино, m_4^2 , и записать как

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

Существующие лучшие ограничения на U_{e4}^2 , полученные в прямых экспериментах, показаны на рисунке 1. В диапазоне масс m_N 0,1 – 2 кэВ лучшие пределы были получены нашей группой в Троицке [3, 4].

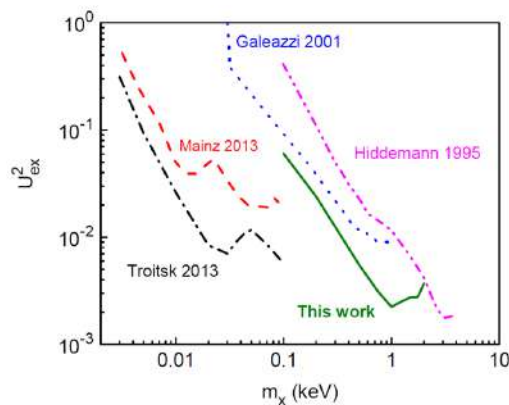


Рисунок 1 – Существующие экспериментальные ограничения (95% CL) на примесь тяжелого нейтрино в электронном нейтрино в зависимости от массы.

Сплошная кривая взята из публикации полученных ранее наших данных [4]

В представленном эксперименте мы расширяем энергетический диапазон измерения бета спектра трития, что позволит исследовать стерильные нейтрино в диапазоне до масс 6 кэВ. Несмотря на пандемию и ограничения в фактической работе, требующей физического присутствия людей, в 2020 году был проведен полноценный сеанс измерений.

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

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

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

Поиск 2К-захвата в Xe-124

В лаборатории низкофоновых исследований, начиная с 2014 года, идет эксперимент по поиску 2К-захвата в Xe-124. Для поиска данного процесса используется медный пропорциональный счетчик высокого давления с рабочим объемом 8,77 л. На последнем этапе эксперимента счетчик был заполнен ксеноном, обогащенным по изотопу Xe-124 ~ 21%, до давления +5 ат (5,8 ат.). Сигналы с детектора оцифровываются осциллографом Лан-10-12PCI, и записываются на жёсткий диск ПК. Такой способ сохранения информации позволяет в офлайн режиме проводить отбор полезных импульсов по форме импульса. Применение специальных процедур отбора полезных событий, позволяет снизить фон в области интересов ($63,6 \pm 3,7$ кэВ) до 2000 раз.

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

Поиск безнейтринного двойного-бета распада различных изотопов является одной из основных проблем физики элементарных частиц и астрофизики. Этот процесс возможен в том случае, если у нейтрино существует ненулевая масса покоя, а также если нейтрино является майорановской частицей. На наличие массы у нейтрино указывают результаты экспериментов по изучению осцилляций нейтрино. Однако из параметров осцилляций нейтрино можно определить только разницу между массами между различными типами нейтрино, не абсолютные их значения.

Данный процесс предсказан для более чем 10 ядер. Одно из этих ядер – Mo-100. Энергия перехода для Mo-100 составляет 3034 кэВ, что значительно больше, чем

максимальная энергия гамма-излучения от природной радиоактивности (линия 2615 кэВ Tl-208). Также достаточно большая природная распространённость (9,7%) позволяет, с меньшими затратами, наработать большое количество изотопа.

С целью поиска безнейтринного двойного бета-распада Mo-100 в 2010 году была организована международная коллаборация AMoRE (Advanced Mo-based Rare process Experiment). Эксперимент проводится в Южной Корее, в подземной лаборатории Янг-Янг. Экспериментальная установка основана на сцинтилляционных кристаллах, используемых в качестве криогенных болометров, расположенных в криостате растворения при температуре ~ 10 мК. На данный момент задействовано 18 сцинтилляционных кристаллов: 13 кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и 5 кристаллов $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Общая масса кристаллов составляет более 6 кг.

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

Эксперименты GERDA и LEGEND

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

«В GERDA полностью закончена подготовка второй фазы и начаты измерения и их анализ. Целью второй фазы является достижение индекса фона на уровне $10^{-3}/\text{кэВ}\cdot\text{кг}\cdot\text{год}$. На основе полученных результатов планируется начать разработку крупномасштабного проекта ~ 200 кг ^{76}Ge ».

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

Наиболее важный шаг в деле поиска $0\nu\beta\beta$ распада сделан в 2017 году в эксперименте GERDA путем достижения наиболее низкого уровня радиоактивного фона в сравнении со всеми конкурирующими проектами. Таким образом, GERDA является первым в мире «бесфоновым» экспериментом по поиску данного процесса. Статья, посвященная этому результату, опубликована в журнале Nature в 2017 году (doi:10.138/nature21717). В 2020 году эксперимент GERDA закончен и продолжена обработка данных.

Одновременно проводятся работы по созданию нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND, монтаж которого начат в 2020 году.

В коллаборацию GERDA входит более 100 ученых из 17 научных центров шести стран. Ученые из ИЯИ РАН, КИ и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с самого начала участвуют в подготовке и проведении эксперимента GERDA.

Эксперимент Double Chooz

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

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

После открытия осцилляций мюонных нейтрино в таонные и электронных нейтрино в мюонные стоял вопрос о возможности осцилляций электронных нейтрино в таонные. Сотрудником ИЯИ РАН В.В. Синевым совместно с Л.А. Микаэляном [5] была предложена схема эксперимента, в котором возможно измерить недостающие параметры осцилляций электронных нейтрино в таонные.

Были организованы три эксперимента в разных странах. В один из них, Double Chooz, вошли сотрудники ИЯИ РАН [6]. Эксперимент начал измерения в 2011 году одним детектором, а с 2015 по 2017 годы вел измерения двумя сразу. Было получено значение угла смешивания $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm 0,014$.

По ходу эксперимента совершенствовалась методика и методы анализа данных. Параллельно с основной задачей измерением величины $\sin^2 2\theta_{13}$ решались и другие задачи. В 2020 году в результате анализа данных новым способом было получено новое значение угла смешивания, были получены ограничения на параметры осцилляций реакторных нейтрино в стерильное состояние и измерен спектр долгоживущих осколков во время остановки сразу двух ядерных реакторов.

11. Задача «Изучение фона при поиске частиц темной 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. Подземная лаборатория Гран-Сассо обеспечивают очень низкий радиоактивный фон, необходимый для поиска этих редких ядерных и субъядерных явлений. Детектор LVD является уникальным детектором, работающим с 1992 г., по

программе поиска нейтрино, который способен изучать мюоны, нейтроны и частицы естественной радиоактивности.

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 c - и b - кварками и поиск эффектов Новой Физики в параметрах, имеющих точное предсказание в Стандартной модели (СМ). За годы успешной работы уже получены ключевые результаты, особенно чувствительные к проявлениям Новой Физики. Среди них такие, как измерение вероятности редкого распада $B_s \rightarrow \mu\mu$, 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 надежную 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 $2 \times 10^{34} / \text{см}^2 / \text{сек}$. Для этого требуется модернизация электроники всех подсистем и создание гибкого программируемого триггера. Модернизированный детектор во второй фазе эксперимента должен быть способен за 10 лет набрать статистику около $50 / \text{fb}^{-1}$ интегральной светимости. В этой связи, в частности, существенно возрастают требования к нагрузочным 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 деталях исследованы теоретические неопределённости различных подходов (процедуры эффективных зарядов, метода наивной неабелизации и ренормальной техники), позволяющих получать оценки пяти и шести-петлевых вкладов теории возмущений (ТВ) к соотношению между полюсными и бегущими массами тяжёлых кварков в КХД [7]. Оценки пятой поправки особенно важны для случая b -кварка, поскольку именно они позволили понять, что асимптотический характер рассматриваемого соотношения начинает проявляться с четвёртого порядка ТВ, который учитывается в при изучении свойств в частности, наблюдающихся на Большом адронном коллайдере и, в первую очередь, в данных эксперимента LHCb адронов, содержащих b -кварк. Результаты демонстрируют, что при анализе экспериментальных данных, проводящихся с учетом трех членов разложения по константе связи КХД можно использовать для параметризации данных как полюсную, так и бегущую массы b -кварка. Однако, при зависящих от массы b -кварка наборы различных партонных распределений, извлекающихся из сравнения с экспериментальными данными процессов глубоконеупругого лептон-нуклонного рассеяния, и в первую очередь, высокоэнергетических данных крайне полезно отработавшего коллайдера HERA (Германия), в которых в настоящее время учитываются результаты вычислений 4-го порядка ТВ КХД, необходимо использовать лишь определение бегущей массы b -кварка. В работе показано, что в случае t -кварка, асимптотическое поведение соответствующего ряда ТВ будет проявляться только после учёта поправки 7-го порядка. Это служит дополнительным теоретическим аргументом в пользу применимости как бегущих, так и полюсных масс для определения этого фундаментального параметра наиболее тяжелого шестого кварка, образование которого напрямую наблюдается на установках CMS и ATLAS и БАК и используется в различных исследованиях по физике частиц и космологии, можно уверенностью использовать не только понятие бегущей массы топ-кварка, но и значение полюсной массы топ-кварка, близкого по величине впервые

фиксированной из данных коллайдера Тэватрон (Фермилаб, США) в 1995 году так называемого Монте-Карло определения массы топ-кварка.

Выявлено согласие результатов применения исследуемых приближённых методов оценок высших порядков ТВ, в первую очередь, основанных на использовании процедуры эффективных зарядов и метода ренорм-группы, с результатами продолжающегося активно-применяться реномалонного подхода. Демонстрируется, что все изучаемые методы получения оценок выявляют знакопеременный характер коэффициентов соотношения между полюсными и бегущими массами тяжелых кварков, разложенных по степеням количества безмассовых ароматов, который естественно возникает из проведенных еще в 1995 г. вплоть до 8-го порядка ТВ некоторых явных численных вычислений после применения широко используемой и в настоящее время процедуры наивной неабелизации, т.е. замены числа ароматов безмассовых кварков на первый коэффициент ренорм-групповой бета-функции КХД.

Применительно к реномалонному подходу этот новый результат, основанный на использовании более детальной информации о нормировочном факторе, входящем в асимптотическую реномалонную формулу, углубляет понимание деталей применения этого широко-используемого приближенного метода КХД.

Используя С-схему в КХД, которая, как показано ранее авторами данной работы имеет ренорм-групповую бета-функцию, связанную по своей структуре с точной ренорм-групповой бета-функцией $N=1$ суперсимметричных теорий Янга-Миллса, получено в $SU(N_c)$ КХД аналитическое выражение для вклада в неизвестные в настоящее время поправки пятого порядка ТВ в КХД в функцию Адлера и правило сумм Бьеркена поляризованного глубоконеупругого рассеяния не проявлявшейся ранее в низших приближениях КХД трансцендентной функции Римана $\zeta(4)$ [8]. Показано, что в произведении этих величин, связанных с амплитудой распада пи-мезона в два Фотона, эти аналитические выражения для этих вкладов сокращаются. Изучена природа данных сокращений. Показано, что сокращение части вкладов согласуется с соотношениями, возникающими при применении конформных преобразований, включающих в себя и масштабные преобразования, а часть сокращений объясняется только масштабной симметрией.

Продолжались исследования проблемы построения дифференциальных операторов для обобщённого IBP метода (Бернштейн-Ткачев) на 2-петлевом уровне. С помощью глубоко оптимизированного программного обеспечения удалось эффективно построить такие операторы для первых невырожденных 2-петлевых случаев. Обнаружено, что наиболее эффективным подходом является построение т.наз. частичных D-операторов, понижающих комплексную степень только одного из полиномов в произведении.

Частичные D-операторы оказываются гораздо проще полных, фигурирующих в базовой теореме Бернштейна. Математического объяснения этому факту неизвестно [9], [10].

Обобщённая схема минимальных вычитаний для ультрафиолетовых перенормировок (Кузнецов и Ткачев, 1988 г.) изучалась с целью адаптации к вычислительным приложениям.

Построена новая схема MS 4 , отличающаяся тем, что она не использует искусственных регуляризаций и делает интегралы по виртуальным импульсам сходящимися посредством физически корректного вычитания опасных асимптотических членов благодаря использованию особых минимальных регуляризующих операторов, определённых согласованно с физически естественными обрезаниями Полчинского. В схеме MS 4 оказывается возможным прямой вывод уравнений Каллана-Симанзика, в котором ни на одном шаге не появляются бесконечные константы перенормировки, при этом впервые удалось получить явные точные конечные интегральные выражения для ренормгрупповых функций (бета и проч.) [11, 12].

Продолжалось исследование проблемы получения доверительных интервалов в основном однопараметрическом случае для метода квази-оптимальных весов, представляющего собой полноценную, более мощную и универсальную альтернативу методу максимального правдоподобия. Было рассмотрено два типа искажений таких интервалов в случае малых выборок, в обоих случаях было проведено аналитическое исследование. Во-первых, разработан критерий справедливости предположения об асимптотической нормальности вместе с конструктивным рецептом получения соответствующих поправок. Во-вторых, получен метод учёта систематического сдвига доверительного интервала из-за нелинейности теоретического среднего квази-оптимального веса как функции оцениваемого параметра. Построен численный пример, демонстрирующий два изученных типа поправок [13].

1.2. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели

1.2.1. Рождение аксионо-подобных частиц в сверхпроводящем резонаторе

Было рассмотрено гипотетическое рождение аксионо-подобных частиц в лаборатории с помощью стоячих электромагнитных волн в сверхпроводящем цилиндрическом резонаторе и их детектированию [14]. С помощью численного моделирования была рассчитана плотность энергии рождённых аксионов для различных пар электромагнитных мод, значений массы аксионов и конфигураций цилиндрического резонатора, что позволяет оценить оптимальные условия производства аксионов. Кроме

того, было рассмотрено детектирование рождённых аксионов с помощью отдельного резонатора с магнитным полем и предсказаны ограничения на константу связи аксионов с электромагнитным полем g_{agg} для различных пар электромагнитных мод накачки в зависимости от массы аксионов. Работа направлена в журнал JHEP.

1.2.2. Теоретическое обоснование будущих и текущих экспериментов — NA64

Аксионоподобные частицы (ALP), которые взаимодействуют с калибровочными полями Стандартной модели, можно было наблюдать в рассеянии фотонов высоких энергий $\gamma N \rightarrow Na$ с последующим распадом $a \rightarrow \gamma\gamma$. В работе [15] были изучены перспективы эксперимента NA64 по поиску ALP в диапазоне масс $10 \text{ МэВ} \lesssim m_a \lesssim 100 \text{ МэВ}$ для статистики, соответствующей до 5×10^{12} электронов на мишени.

Была рассмотрена конфигурация NA64, изначально предназначенная для поиска невидимых распадов темных фотонов, которая также подходит для поиска ALP (см. рисунок 2). В этой конфигурации электромагнитный калориметр (ECAL), который служит активной мишенью, расположен перед тремя модулями адронного калориметра (HCAL), которые обозначены как HCAL1, HCAL2, HCAL3. Электронный пучок в 100 ГэВ проходит через два дипольных поворотных магнита (MBPL) и детектором синхротронного излучения (SRD) очищается от вторичных частиц на уровне 10^{-6} . Импульс налетающих электронов измеряется с точностью 1%.

Возможны две различные стратегии поиска ALP в эксперименте NA64. В первой сигнатуре ALP распадается во втором и третьем модулях HCAL, причем первый модуль (HCAL1) служит в качестве вето. Таким образом, мы потребовали, чтобы энерговыделение было совместимое с фоном в HCAL1 (ниже 1 ГэВ) и не менее 15 ГэВ в HCAL2 и HCAL3. Кроме того, распределения энергии в HCAL2 и HCAL3 должны быть совместимы с двумя почти коллинеарными фотонами от распада ALP $a \rightarrow \gamma\gamma$, очень близко к оси электронного пучка из-за очень малых углов излучения ALP. Это означает, что почти вся энергия (более 95%) должна отдаваться в центральную ячейку модулей HCAL. Это важно для подавления фона, поскольку адронные ливни обычно намного шире и выделяют значительную энергию в периферических ячейках HCAL. Также при анализе этой сигнатуры мы исходим из сохранения энергии с учетом энергетического разрешения калориметров.

Во второй сигнатуре (невидимая сигнатура) ALP распадается за пределы всех детекторов NA64. Это сигнатура связана с потерей энергии электронного пучка из-за излучения ALP. Наиболее важными энергетическими обрезаниями в этой сигнатуре являются верхние обрезания на энерговыделение в ECAL и требование отсутствия выделения энергии во всех трех модулях HCAL, HCAL1 – HCAL3. На рисунке показана

90% C.L. область чувствительности эксперимента NA64 в пространстве параметров ALP для бесфонового случая и 5×10^{12} электронов на мишени в диапазоне масс $10 \text{ МэВ} \lesssim m_a \lesssim 100 \text{ МэВ}$. Эти результаты демонстрируют, что эксперимент NA64 способен искать ALP с константой связи с фотонами в диапазоне $5 \times 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-1} \lesssim g_{a\gamma\gamma} \lesssim 10^{-3} \text{ ГэВ}^{-1}$.

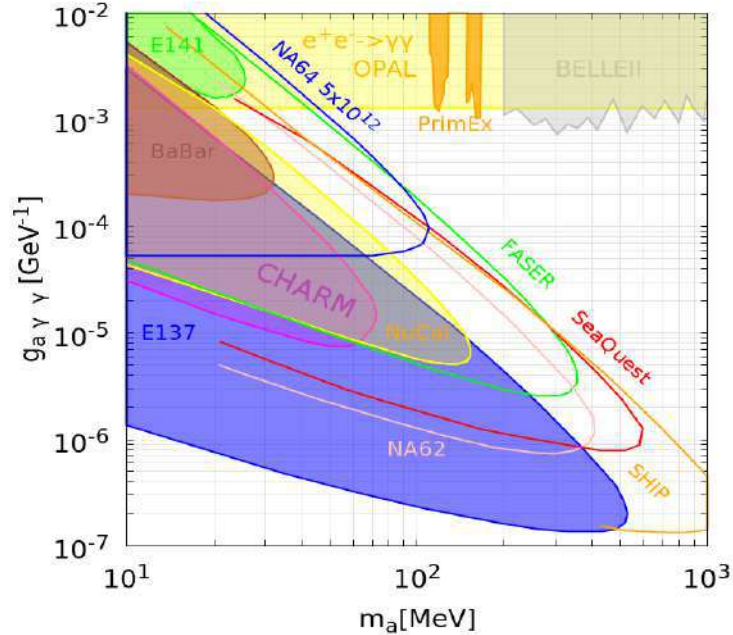


Рисунок 2 – Ожидаемая чувствительность эксперимента NA64 к поиску ALP

1.2.3. Развитие методов вычисления структурных функций и партонных распределений ядер

Разработана гибридная модель неупругих структурных функций протона, включающая в себя как процессы возбуждения нуклонных резонансов, так и КХД-механизм глубоконеупругого рассеяния и обеспечивающая гладкий переход между разными физическими областями (совместно с аспирантом В.Бариновым). Параметры модели и соответствующие неопределенности определены из фитов к экспериментальным данным по сечениям рассеяния электронов на фотоне и полным сечениям фоторождения на протоне. По результатам работы готовится статья. В дальнейшем результаты работы будут применены для извлечения нейтронных сечений из комбинации протонных и ядерных данных, а также для количественного анализа ядерных эффектов в области возбуждения нуклонных резонансов.

Продолжено развитие методов вычисления структурных функций и партонных распределений ядер и их использование в феноменологии и интерпретации экспериментальных данных. В рамках этого направления проведены следующие работы.

Получены глобальные КХД фиты партонных распределений с учетом экспериментальных данных на дейтроне и феноменологически изучено немассовое поведение партонных распределений связанных нуклонов. Следует отметить, что функции характеризующие немассовое поведение партонных распределений носят универсальный характер и определяют ядерные эффекты как в легких, так и в тяжелых ядрах. В этой связи проделанный анализ позволяет существенно улучшить точность описания ядерных поправок. Статья по результатам работы в процессе подготовки.

Участие в эксперименте MARATHON (JLab) по измерению нейтронной структурной функции (отношения F_{2n}/F_{2p}) из данных глубоконеупругого рассеяния на легких ядрах ^3H и ^3He . Проведены расчеты глубоконеупругих сечений на дейтроне, ядрах ^3H и ^3He и оценены соответствующие неопределенности, а также разработан итерационный метод извлечения структурной функции нейтрона F_{2n} из данных MARATHON. По результатам эксперимента готовятся две статьи, которые планируется опубликовать в Phys Rev Lett.

Результаты работ по этому направлению доложены на осенней 2020 конференции американского физического общества (DNP2020) [16] а также были представлены на конференцию DIS2020 [17].

Участие в нейтринном эксперименте DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)

Проведена теоретическая поддержка эксперимента в контексте КХД и ядерных эффектов. В 2020 г. были опубликованы работы [18 – 26] по эксперименту DUNE.

1.2.4. Исследование нетопологических солитонов в теории поля

Подготовлен обзор «Нетопологические солитоноподобные решения и $U(1)$ -инвариантность» специально для журнала ЖЭТФ [27]. В нем обсуждаются решения классических уравнений движения в теориях с комплексным скалярным полем и глобальной или калибровочной $U(1)$ -симметрией. Примерами таких решений являются Q-шары, однородный заряженный скалярный конденсат, а также нелинейные локальные неоднородности на фоне классически устойчивого конденсата. Свойства этих решений, в том числе их устойчивость, обсуждаются с точки зрения различных перспективных приложений в физических задачах. Развитый формализм позволяет рассматривать модели с дополнительными массивными полями и связать нетопологические солитоны, возникающие в таких моделях, с Q-шарами. Также обсуждаются эффекты, связанные с наличием в теории дополнительных безмассовых полей, таких как электромагнитное или гравитационное.

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

На сегодняшний день теория инфляции является основным сценарием эволюции ранней Вселенной. Тем не менее, альтернативные ранние эпохи жизни Вселенной также заслуживают рассмотрения. Нами рассматриваются такие альтернативные теории ранней Вселенной как отскок (англ. "bounce") и генезис (англ. «genesis»).

Данные модели были изучены в рамках скалярно-тензорной теории модифицированной гравитации Хорндески. Использование лагранжиана теории Хорндески позволяет построить необходимые космологические решения без начальной сингулярности. Кроме того, был рассмотрен аналог теории Хорндески с использованием векторных полей (векторный галилеон) для построения устойчивых и несингулярных космологических моделей.

В работе Tsutomu Kobayashi, Phys. Rev. D 94, 043511 было замечено, что одним из возможных сценариев генезиса, свободных от неустойчивостей во все космологические эпохи, является тот, в котором, наивно, возникает режим сильной связи на очень ранних временах (эффективная масса Планка стремится к нулю). Следовательно, исчезает возможность описывать систему классическими методами. Мы изучили предложенную в вышеупомянутой работе модель и убедились, что классическое полевое описание эволюции Вселенной на ранних временах всё же возможно. Анализ возможности применения классического полевого описания эволюции Вселенной на ранних стадиях основывается на сравнении характерных масштабов энергии: квантового масштаба сильной связи и обратного характерного времени космологической эволюции. Мы проверили и убедились, что классический энергетический масштаб намного меньше, чем масштаб сильной связи для любых типов взаимодействий возмущений метрики. Последнее утверждение выполняется при определенном подборе параметров лагранжиана. Результаты данных исследований опубликованы в статьях [28] и [29].

На основе векторного галилеона была построена модель начальной стадии генезиса. Было показано, что на этом этапе полевые возмущения устойчивы, а ускоренное расширение Вселенной достигается за счёт наличия векторного поля, нарушающего изотропное условие энергодоминантности. В приближении отсутствия динамической гравитации была изучена проблема сильной связи в данной модели генезиса. На основе данных результатов была опубликована статья [30].

В расширенной теории Хорндески была изучена проблема потенциального сверхсветового распространения гравитационных волн в ранее предложенном космологическом решении типа отскока, а также в конфигурациях, соседствующих с ним в фазовом пространстве. Было показано, что предложенное ранее решение с отскоком находится прямо на границе области, где гравитационные волны распространяются со скоростью, превышающей скорость света. Таким образом даже при небольшом отклонении от решения, на его фоне возникают сверхсветовые распространения, в этом смысле предложенное ранее решение с отскоком не вполне удовлетворительно, так как имеет проблему сверхсветовых возмущений. Была построена новая версия полностью устойчивой модели отскока в расширенной теории Хорндески. В этой модели и скалярные, и тензорные возмущения остаются до-световыми не только на самом решении, но и в его окрестности. Более того, было показано, что модель остается свободной от сверхсветовых возмущений даже при добавлении в теорию дополнительной материи с не слишком большой скоростью звука, например, радиации. В более общем смысле, подходит идеальная жидкость с параметром уравнения состояния $w \leq 1/3$, и, даже, немного больше. Сверхсветовые возмущения снова появляются, если добавленная дополнительная материя имеет скорость звука равную или близкую к свету; один из примеров – скалярное поле, минимально связанное с гравитацией. Явление возникновения сверхсветовых возмущений при добавлении дополнительной материи со скоростью звука, близкой к скорости света, является общим свойством расширенной теории Хорндески и характерно для любого космологического решения. Статья опубликована в журнале [31].

Кроме того, подобное явление возникновения сверхсветовых возмущений при добавлении дополнительной материи было изучено в теории DHOST Ia. В теорию добавлялось дополнительное скалярное поле, минимально связанное с гравитацией, и взаимодействующее с полем DHOST только гравитационно. Было показано, что при добавлении небольшого количества (малой энергии) дополнительного скалярного поля в теорию одна из скалярных мод над космологическим фоном в общем случае распространяется со сверхсветовой скоростью. То есть как и в расширенной теории Хорндески, гравитационное взаимодействие между двумя секторами приводит к кинетическому смешиванию полей и возможности сверхсветовых скоростей несмотря на то, что в каждом из секторов (при отсутствии другого) сверхсветовых скоростей нет. Этот результат действителен для любых стабильных космологических сценариев и для теории DHOST Ia общего вида. Исключением является только найденный нами узкий подкласс теорий DHOST Ia, в них это свойство отсутствует, и все моды могут распространяться (до) световыми скоростями даже при добавлении дополнительного поля. Изученное явление

накладывает серьезные ограничения на теории типа DHOST, если иметь в виду построение реалистичных космологических моделей. Статья опубликована в журнале [32].

1.3.2. Построение новых моделей гравитации. Исследование процессов образования и возможных астрофизических проявлений первичных чёрных дыр

Исследовано образование первичных черных дыр (ПЧД) в ранней вселенной в скалярно-тензорной теории Бранса-Дике [33]. Вычислены поправки к пороговым значениям возмущений плотности. Для надпороговых возмущений плотности происходит их гравитационный коллапс после пересечения космологического горизонта. Поправки зависят от эволюционирующего скалярного поля и влияют на вероятность формирования черных дыр. Это в свою очередь может вести к кластеризации ПЧД на больших масштабах, если скалярное поле неоднородно. Формирование кластеров, в свою очередь, повышает вероятность слияния ПЧД и, соответственно, частоту гравитационно-волновых всплесков. Таким образом, сигналы из кластеров ПЧД могут составлять значительную часть событий детектируемых обсерваториями LIGO/Virgo.

Также изучены условия сохранения в теории квадратичной гравитации с двойным слоем [34]. Показано явным вычислением, что тождества Бьянки ведут к сохранению левой части уравнений для гравитационного поля. Таким образом, полный тензор энергии-импульса сохраняется в объеме. Однако в квадратичной гравитации сингулярные гиперповерхности могут разделять области пространства-времени с различным поведением тензора энергии-импульса полей материи. Получены условия сохранения для таких гиперповерхностей и продемонстрирована возможность рождения материи на этих гиперповерхностях.

Исследована теория квадратичной гравитации с двойным слоем [35]. Такая теория интересна тем, что в качестве частных случаев включает в себя вариант $F(R)$ -гравитации и ОТО со слагаемым Гаусса-Бонне. Получены уравнения движения для двойного слоя в квадратичной гравитации из принципа наименьшего действия. Преимущество использованного подхода заключается в том, что в процессе вычислений производные дельта-функции отсутствуют, в то время как сами дельта-функции взаимно сокращаются до интегрирования. Исследована структура полученных уравнений. В частности, показано, что поверхностный тензор энергии-импульса полей материи, составляющих двойной слой, не играет роли в определении траектории двойного слоя. Выдвинута гипотеза, что с помощью пространственно-подобного двойного слоя можно эффективно описать возникновение вселенной из сингулярности черной дыры.

1.3.3. Исследование возможности поиска новых частиц в эксперименте SHiP и других экспериментах. Исследование механизмов рождения новых частиц в ранне Вселенной

Были проведены исследования в рамках темы физика элементарных частиц и космология. Результаты исследований опубликованы в прилагаемых к отчёту статьях [37 – 51]. В статьях [37] и [39] изучалась чувствительность проекта SHiP (400 ГэВный протонный пучок на фиксированной мишени) к моделям с тёмным фотоном и моделям с лёгкой тёмной материей. Работы [48] и [50] посвящены анализу результатов измерения рождения мюонов этим пучком на комбинированной молибденово-вольфрамовой мишени. В работе [49] предлагается новая экспериментальная установка на Большом адронном коллайдере для поиска частиц тёмной материи. В работе [44] была вычислена дифференциальная ширина распада пиона в заряженный лептон и три нейтрино, что позволило экспериментаторам из коллаборации PIENU поставить ограничение сверху на темп этого процесса.

В работах [43] и [45] предлагается новый способ рождения частиц гравитационным полем, актуальный для задачи рождения частиц (тёмной материи или даже с целью создания первичной плазмы после инфляции) в расширяющейся Вселенной.

1.4. Ограничения на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий

В работе использовались данные IceCube/DeepCore, отобранные примерно за 3 года (2012-2015 гг.) с направлений со всего неба. При этом, отбираемые события имели как трековые, так и каскадные сигнатуры, что означает регистрацию нейтринных событий и в заряженных и в нейтральных токах. В нашей работе было проведено моделирование распространения атмосферных нейтрино через Землю для различных направлений прихода нейтрино в интервале энергий 1-1000 ГэВ. Моделирование распространения нейтрино показало значительную зависимость вероятностей перехода между нейтрино различных флейворов от значений констант, параметризующих нестандартные нейтринные взаимодействия. Для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными использовались публичные результаты Монте-Карло моделирования эксперимента IceCube/DeepCore для данной выборки событий. В результате сравнения были получены новые ограничения на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий для ряда моделей, в которых ненулевыми является либо лишь один параметр, либо два. В анализе были учтены экспериментальные и теоретические систематические неопределенности и проведена оценка величины их влияния. Проведено

сравнение полученных ограничений с другими имеющимися ограничениями на параметры нестандартных нейтринных взаимодействий.

По результатам подготовлена публикация [52].

1.5. Получение ограничений на параметры суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии

В суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии была изучена ранее не рассматриваемая область пространства параметров, в которой с одной стороны масштаб нарушения суперсимметрии достаточно большой и, с другой, имеется смешивание сголдстино с легким бозоном Хиггса. В этом случае, в отличие от ранее изученных режимов без значительного смешивания, сголдстино с массой порядка 1 ТэВ распадается в основном в пары массивных скалярных и векторных бозонов. Это приводит к модификации феноменологии сголдстино в экспериментах на LHC. В частности, одной из сигнатур таких моделей является резонансное рождение пар хиггсовских бозонов. Из имеющихся данных, полученных в экспериментах ATLAS и CMS, были найдены ограничения на параметры модели в рассмотренном режиме. Кроме того были получены предсказания для сечений процессов рождения пар тяжелых бозонов (hh , $W+W-$ и ZZ) с участием сголдстино для экспериментов на Большом адронном коллайдере.

По результатам работы подготовлена публикация [53].

1.6. Анализ данных эксперимента CMS

1.6.1. Участие в международных экспериментах в CERN: эксперимент CMS

Двухструйные события в эксперименте CMS и поиск асимптотических эффектов КХД

Одной из основных целей эксперимента на CMS на Большом адронном коллайдере (LHC) является поиск физики за пределами Стандартной модели (СМ). Другая цель эксперимента – это определение пределов применимости СМ. Для достижения этой цели CMS постоянно улучшает точность измеряемых параметров СМ и проверяет свойства СМ при новых энергиях. Существуют два основных кинематических режима при столкновениях при высоких энергиях. Один из них, жесткий режим рассеяния ($\sqrt{s} \sim k_T \gg \Lambda_{QCD}$), который описывается эволюционными уравнениями Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД), хорошо проверен и широко используется для предсказаний СМ. Другой, полужесткий режим ($\sqrt{s} \gg k_T \gg \Lambda_{QCD}$), который должен стать доминирующим при асимптотически высоких энергиях, описывается уравнением эволюции Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (БФКЛ).

В 2012 - 2018 годах эксперимент CMS представил указания на асимптотическое поведение при высоких энергиях в КХД, измерив в pp-столкновениях при энергии 7 ТэВ отношения двухструйных сечений с большим интервалом быстроты между струями и двухструйные азимутальные угловые декорреляции с большим разделением струй по скорости соответственно. Измеренные азимутальные декорреляции согласуются с эволюцией БФКЛ в главном логарифмическом приближении с учетом следующих за ведущими вкладами, улучшенном по предписанию Бродского-Фадина-Кима-Липатова-Пивоварова. В то же время различные генераторы событий Монте-Карло, основанные на эволюции ГЛАПД, не могут описать все особенности наблюдаемых величин, что указывает на то, что наблюдаемые азимутальные декорреляции могут являться указанием на проявление асимптотических эффектов эволюции БФКЛ.

К сожалению, имеющиеся статистические и систематические неопределенности данных как по упомянутым выше отношениям сечений двухструйных событий, так и по их азимутальным декорреляциям не позволяют с достаточной уверенностью утверждать о наблюдаемых эффектах. Поэтому исследования продолжаются при других энергиях соударений, а также и для других наблюдаемых. В частности, группа ПИЯФ-ИТЭФ-ИЯИ РАН проводит анализ данных также для энергий 2,76, 8 и 13 ТэВ, а также для увеличения чувствительности к возможным БФКЛ-эффектам рассматривает отношения сечений двухструйных событий с вето на образование дополнительных струй. Таким образом, эксперимент CMS получает новое указание об асимптотическом проявлении БФКЛ-эволюции в азимутальных декорреляциях двухструйных событий с большим скоростями между струями при энергии ЛНС 7 ТэВ. Необходимы дальнейшие измерения при более высоких энергиях, чтобы установить новую высокоэнергетическую асимптотику СМ.

Очередной этап поиска тяжелых нейтрино в эксперименте CMS

Были обработаны экспериментальные данные 2016-2017 гг. по триггеру «двойной τ_h » с порогом 30 ГэВ. Распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов на предварительной стадии отбора хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Такое согласие с наблюдаемыми данными говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях. В электрон-мюонном канале экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора, которые хорошо согласуются с предсказаниями СМ. В электронном и мюонном каналах зарегистрирован пик от распада Z-бозона. Наблюдается хорошее согласие с результатами моделирования методом Монте-Карло. Для моделирования фона использовались генераторы AMC@NLO ($tt + \text{jets}$), madgraph ($W + \text{jets}$), pythia8 (WW , WZ , ZZ), powheg (tW), а для сигнала – pythia8 (LRSM). В результате анализа

данных, полученных в течение 2018 г. и соответствующих полной светимости БАК порядка 80 фб^{-1} , были получены ограничения на массу тяжелого нейтрино в зависимости от массы W_R . Сделано сообщение на совещании CMS о поиске правовинтового W-бозона и тяжёлого нейтрино, проведён сравнительный анализ этого поиска и соответствующих поисков в других каналах (две струи, два электрона + струи, два мюона + струи), связанных с третьим поколением лептонов (конечное состояние содержит два тау-лептона).

1.6.2. Сертификация КФЭУ для новой электроники адронного калориметра

Участие группы ИЯИ РАН в работах по модернизации

Группа ИЯИ РАН принимает активное участие в разработке и исследовании КФЭУ для модернизации CMS. Участниками группы были созданы уникальные автоматизированные экспериментальные стенды для прецизионных измерений наиболее важных параметров КФЭУ: коэффициента усиления, квантовой эффективности, быстродействия, шумов, ёмкости, последовательного сопротивления, линейности. Были проведены измерения многочисленных прототипов КФЭУ, изучена их радиационная стойкость, стабильность в условиях повышенных температур и влажности. Результаты этих измерений существенно продвинули понимание принципов работы КФЭУ и помогли оптимизировать их структуру для работы в условиях LHC.

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

Стенд для измерения и проверки качества КФЭУ для проекта CMS MTD

В проекте CMS MTD BTL (Muon Timing Detector / Barrel Timing Layer) будет задействовано примерно 23000 линеек КФЭУ. Каждая линейка представляет собой массив из 16 отдельных каналов. Таким образом, общее количество каналов в детекторе составит около 370000. Все линейки КФЭУ будут расположены в непосредственной близости от точки соударения пучков в области с большой радиационной нагрузкой, что будет приводить к значительному росту темнового тока в процессе эксплуатации. Чтобы снизить величину темнового тока, все линейки в детекторе будут охлаждаться до температуры минус 30°C , это позволит соблюсти соответствие запланированным параметрам временного разрешения. Поставки линеек будут происходить в течение одного года,

начиная с осени 2021 г. Все линейки и каналы КФЭУ будут проходить приемочные измерения для подтверждения параметров. Таким образом, для соблюдения выполнения плана работ требуется обеспечить скорость измерений 2000 линеек (32000 каналов) в месяц.

Для проведения приемочных работ был подготовлен измерительный стенд. Стенд состоит из лабораторного морозильника (для обеспечения температуры -30°C), коммутатора каналов, датчиков температуры, источников света, источника напряжения и пикоамперметра, а также компьютера (рисунок 3). Для управления компонентами стенда разработано программное обеспечение. Таким образом, стенд позволяет проводить измерения вольт-амперных характеристик КФЭУ и управлять температурой и уровнем освещения. Модификация стенда для установки 24 линеек КФЭУ одновременно позволит соблюсти необходимый ритм измерений (2000 линеек в месяц), финальный стенд на 24 линейки будет собран в начале 2021 года.

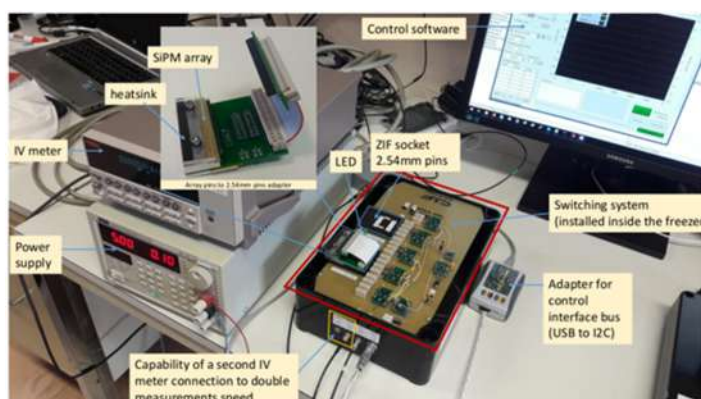


Рисунок 3 – Стенд измерения вольт-амперных характеристик для двух линеек КФЭУ

Моделирование процесса восстановления КФЭУ

В процессе эксплуатации происходит радиационное повреждение всех элементов детектора. В случае КФЭУ повреждение структуры приводит к увеличению величины темнового тока и ухудшению соотношения сигнал/шум. Тем не менее, повреждения некоторых компонентов обратимы, и со временем происходит частичное восстановление структуры КФЭУ. Для изучения эволюции темнового тока были обработаны данные, набранные во время сеанса работы ускорителя в 2018 году, по измерениям темнового тока в приборах КФЭУ, установленных в торцевой части адронного калориметра. Поскольку темновой ток увеличивается во время работы ускорителя и уменьшается в паузах его работы, полученные результаты позволили построить модель восстановления КФЭУ.

Модель эволюции темнового тока включает две составляющие: рост темнового тока из-за радиационных повреждений и замедление роста из-за восстановления обратимых компонентов повреждения структуры описывается следующим выражением:

$$I(t) = A\tau + (I_0 - A\tau) \exp\{-(t-t_0)/\tau\}.$$

В результате фитирования данных по темновому току получено, что необратимая компонента составляет 35%, а обратимая - 65% с характерным временем восстановления порядка 40 дней. С помощью построенной модели было вычислено изменение темнового тока по планируемой программе работы ускорительного комплекса ЛНС, финальное значение составило 25 мкА (рисунок 4).

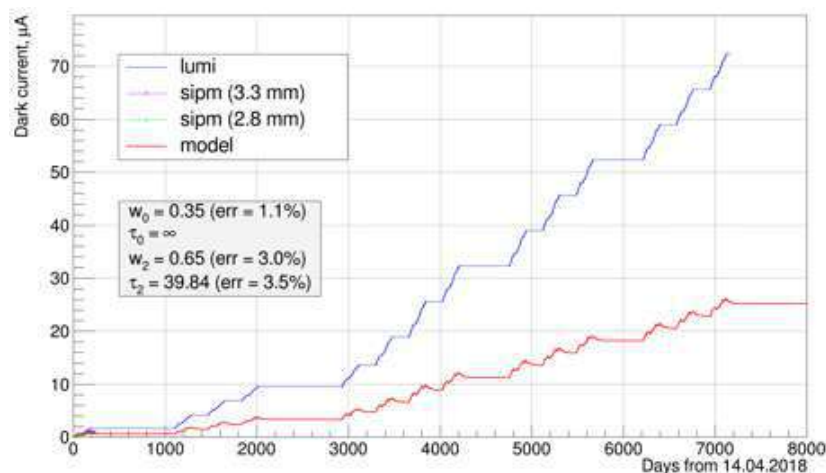


Рисунок 4 – Изменение темнового тока КФЭУ диаметром 2,8 мм, полученное с помощью моделирования, для планируемой программы работы комплекса ЛНС

Облучение и измерение образцов КФЭУ для HGCal

Для изучения радиационной стойкости КФЭУ, предназначенных для проекта HGCal, было проведено облучение образцов и выполнен цикл измерений. В том числе была изучена возможность ускоренного восстановления прибора (а именно, уменьшения темнового тока) с помощью отжига. Применение модели восстановления позволило рассчитать поведение прибора при различных сценариях отжига (рисунок 5). Как видно из полученных результатов измерений для образцов, облученных с интенсивностью 5×10^{13} нейтронов/см², темновой ток растет со временем из-за накопления радиационных повреждений в структуре КФЭУ. Применение отжига позволяет значительно уменьшить величину темнового тока (происходит частичное восстановление структуры).

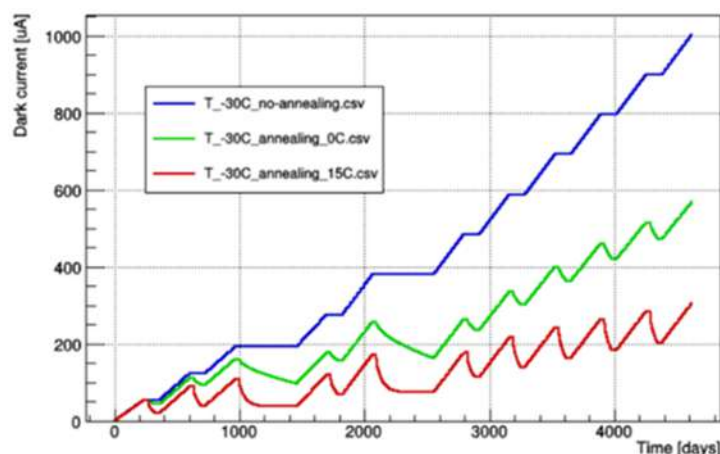


Рисунок 5 – Моделирование поведения темнового тока КФЭУ во время работы ЛНС без отжига и при различных сценариях отжига

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

Разработка и проверка системы улучшенного охлаждения оптического приемника блоков регистрации и считывания модулей АК

В течение последнего сеанса набора данных была выявлена проблема потери мощности оптического сигнала с модулей управления и контроля торцевых адронных калориметров CMS. В результате проведенных исследований было показано, что основной вклад в снижение мощности выходного оптического сигнала вносит чрезмерный нагрев так называемого универсального оптического приемника (VTRx), смонтированного на одной из печатных плат модуля контроля.

Для устранения данной проблемы была разработана система улучшенного охлаждения оптического приемника без изменения существующей механики модуля, но с необходимостью монтирования системы охлаждения в изъятый для модификации модуль. Монтаж системы охлаждения включает в себя установку медного радиатора с термопадами для улучшенного отвода тепла от определенных частей универсального оптического приемника. Проведенные испытания показали существенное уменьшение потерь мощности оптического сигнала.

Температурные измерения фронтальной электроники адронного калориметра

Адронный калориметр (АК) установки CMS в зависимости от области покрытия по псевдобыстроте подразделяется на четыре компоненты: баррельная часть HB ($0,0 \leq |\eta| \leq 1,3$), торцевая HE ($1,3 \leq |\eta| \leq 3,0$), внешняя HO ($0,0 \leq |\eta| \leq 1,3$) и

передняя HF ($3,0 \leq |\eta| \leq 5,0$). В рамках работ по модернизации АК проводились температурные измерения модулей фронтальной (установленной непосредственно на детекторе) считывающей электроники НВ. Калориметр НВ разделён на 18 секторов, покрывающих азимутальный угол в диапазоне ($0^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$) каждый, таким образом обеспечивая покрытие ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Каждый сектор имеет массив световыводящих волокон, передающих свет от 17 слоёв сцинтиллятора калориметра в корпус считывания (RBX – readout box).

Корпус считывания состоит из четырёх модулей считывания (RM₁₋₄ - Readout Module), калибровочного модуля (CM – Calibration Module) и модуля контроля и времени (CCM – Control and Clock Module). Помимо этого, к корпусу подключены источники низко- и высоковольтного питания. Каждый модуль RM содержит в себе массив кремниевых фотоумножителей (КФЭУ), которые преобразуют свет от пройденной частицы в калориметре в электронный сигнал.

Массив световыводящих волокон соединяется через коннектор с массивом фотоумножителей КФЭУ. Для получения равномерного преобразования света в сигнал на массиве КФЭУ поддерживается постоянная температура (в пределах $\pm 0,1^\circ\text{C}$), устанавливаемая входным напряжением, подаваемым на пельтье-элементы через модуль CCM при помощи сервера управления ngCCM. В работе используется термоэлектрический пельтье-элемент серии ZT Laird ZT6 размером $40 \times 40 \times 3,9$ мм³ с максимальной разностью температур 74°C , максимальным входным напряжением 15,4 В и максимальным током 6 А. Кроме того, для охлаждения компонент RM его корпус соединяется с контуром водного охлаждения RBX.

Для проведения температурных измерений элементов RBX был организован стенд с несколькими RBX, включающий в себя контур водного охлаждения, а также контур продува элементов азотом N₂. Азот использовался для предотвращения окисления элементов RM и избавления от возможного конденсата. Скорость потока воды в контуре охлаждения поддерживалась на уровне 1,3-1,5 л/мин. Использовались источники питания Marathon для подачи низковольтного (ниже 10 В) и Keysight для высоковольтного (выше 100 В) напряжения на модули RM, CM и CCM. Управление температурами на пельтье-элементах и напряжениями в системе осуществлялось через модуль CCM на сервере ngCCM. Компоненты измерительного стенда изображены на рисунке 6.

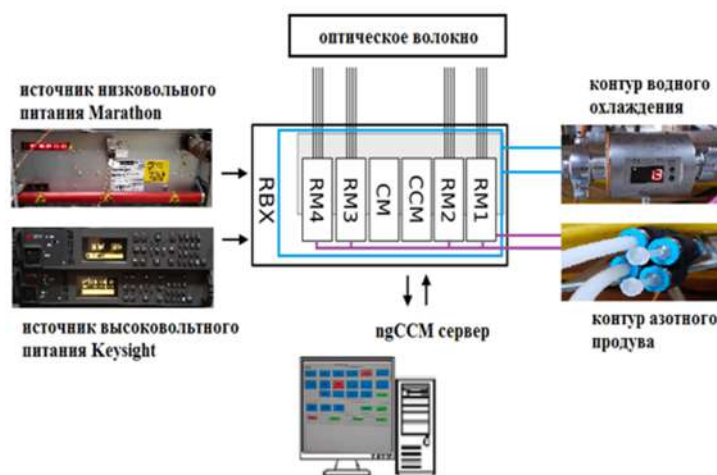


Рисунок 6 – Схема измерительного стенда RBX

Для модернизации корпуса RBX с улучшенными температурными характеристиками модулей RM была решена задача по измерению температур в различных точках RBX при включённой нагрузке на модули, а также составлению температурной карты компонент RBX. При измерениях использовались две системы температурных сенсоров – четырёх- и восьмиканальная. Четырёхканальная система устанавливается на каждый RBX в HCAL во время набора данных CMS и служит для экстренного отключения модулей при перегреве. Для составления более подробной температурной карты RBX была собрана дополнительная система восьми температурных сенсоров с увеличенной частотой измерений. В то время как четырехканальная система (сенсоры P1-P4) производила замер температур раз в 30 секунд, восьмиканальная система (сенсоры T0-T7) получала данные каждые 1,2 секунды. Измеряемые температуры сохранялись в двух форматах, текстовом и бинарном, для дальнейшего анализа. В настоящее время температурные измерения продолжаются в различных режимах работы элементов RBX с целью выяснения всех возможных вариантов значений температур и проектирования корпуса RBX, позволяющего максимально эффективно записывать данные АК.

Установка и проверка работоспособности новой электроники на основе КФЭУ

После подготовки на стенде новая электроника устанавливалась в состав центральной АК. В процессе установки старая электроника вынималась и на её место вставлялась модернизированная. После установки нового оборудования происходил процесс его проверки и отладки. Проверялись работа всех компонентов: наличие напряжения смещения на КФЭУ, работа пельтье-элементов, показания датчиков температуры и влажности, корректная работа чипов QIE, оптических передатчиков и приёмников данных. Осуществлялась проверка при помощи специализированного программного обеспечения.

Для успешной работы модернизированной электроники была разработана новая схема подключения новой передней считывающей электроники к задней электронике с учётом особенностей, позволяющих быстро и надёжно реконструировать энергоснабжения во всех секторах центрального АК. В процессе установки новой передней считывающей электроники в состав центральных частей АК осуществлялась проверка правильности подключения новой передней считывающей электроники к задней электронике при помощи автоматизированной системы iQi-gun, основанной на возможности чипа QIE посылать уникальный код. После анализа с помощью специализированной программы, в которую закладывалась схема подключения данных, делался вывод о правильности подключения.

Сотрудники ИЯИ РАН осуществляли руководство и экспертную помощь в течение всего периода установки, ввода в эксплуатацию, тестирования, сертификации модернизированной регистрирующей и считывающей электроники на основе КФЭУ в состав центральных частей АК. В результате слаженной работы, грамотного распределения задач и оперативного решения возникающих проблем установку в состав центральных частей адронного калориметра установки CMS, отладку и калибровку новой регистрирующей и считывающей передней электроники удалось завершить успешно и в срок.

1.6.4. Исследование характеристик работы адронного калориметра

Проверка фоновых условий с помощью космических лучей

В 2020 году CERN находился в периоде длительной остановки ускорителя (LS2 – Long Shutdown 2). Эти остановки необходимы для исправления и улучшения работы ускорителя и экспериментальных установок. В течение 2020 года на установке CMS было проведено несколько сеансов работы с космическими лучами с тем, чтобы контролировать работу детекторов CMS.

Изучение с помощью космических лучей дает хорошую возможность проверить фоновые условия в АК (аппаратный фон) в отсутствие физических процессов. В качестве триггера использовались сигналы с дрейфовых трубок (DT), расположенных в нижней части установки CMS. Регистрировались космические мюоны, которые проходили установку в направлении, перпендикулярном оси установки. В случае космических лучей имеется низкая интенсивность и отсутствие наложения событий. Если потребовать низкую активность в мюонных камерах (DT, CSC, RPC) на уровне фона в этих детекторах, то можно ожидать, что сигналы в HB и HE могут быть обусловлены только возможным аппаратным фоном. Подобные изучения также проводились в период LS1.

Отсутствие активности в мюонных камерах может быть определено следующим образом: $(\text{MuonCSC2DRecHitSize} < 4) \ \&\& \ (\text{MuonDTRecHitSize} < 12)$. При более жестких отборах $(\text{MuonCSC2DRecHitSize} < 0) \ \&\& \ (\text{MuonDTRecHitSize} < 0)$ получаются распределения, показанные на рисунке 7.

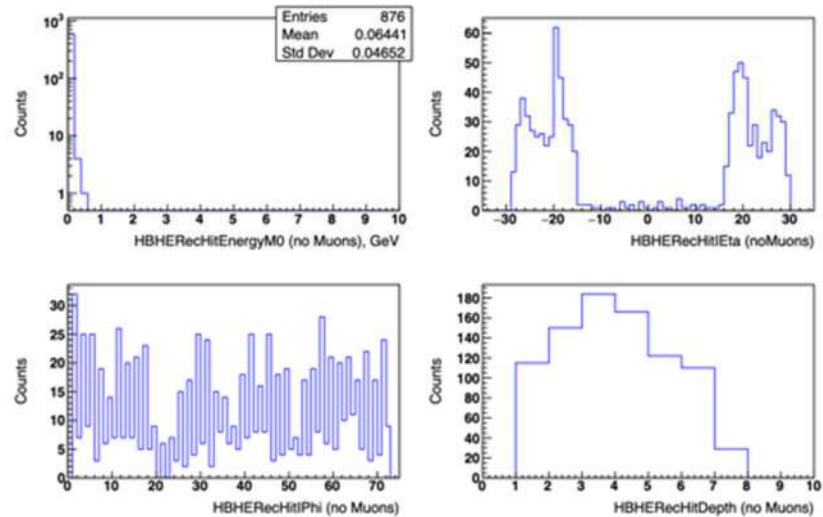


Рисунок 7 – Сигналы в HBHE после более жестких отборов

Из этого изучения можно сделать вывод, что события с очень низкой мюонной активностью показывают присутствие в HBHE только случайных сигналов с очень малой энергией. Никаких специальных выделенных позиций по IEta , IPhi , Depth не наблюдается. Случайные сигналы могут быть обусловлены темновым током в КФЭУ (в системе съема информации в HBHE). Вывод: аппаратный фон в HBHE не наблюдается.

Изучение HFStripFilter для PF-объектов

В конце 2018 г. группа JetMET (CMS, CERN) доложила о наблюдении заметного числа ложных струй при обработке информации, записанной в 2018 г. Все эти струи не отбраковывались стандартными HF-фильтрами, характеризовались большими импульсами и начинались в модулях HF с $\text{IEta} = 29 \div 34$. При этом было замечено, что сработавшие элементы HF образуют структуры в виде полос с одним и тем же значением IPhi , но с разными IEta . С целью уменьшения количества событий с ложными струями подобного типа был разработан специальный фильтр HFStripFilter.

Отладка HFStripFilter проводилась на специальном наборе событий, выделенном группой JetMET из событий триггера MET из набора данных 2018 г. (2721 событие). Этот специальный набор состоит из событий, имеющих возможные ложные струи, начинающиеся в модулях HF. Существует два типа объектов, описывающих струи и недостающую поперечную энергию, а именно, CaloJets и CaloMET , составленные из

информации от калориметров, и PFJets и PFMET, составленные с привлечением дополнительной информации с трековых детекторов.

В случае ложных струй эти два типа струй и два типа недостающей энергии должны быть сравнимыми по величине, т.к. основная энергия сосредоточена в HF. После применения HFStripFilter эти распределения оказались различными. Распределения для наиболее энергетических струй в событиях приведены на рисунке 8.

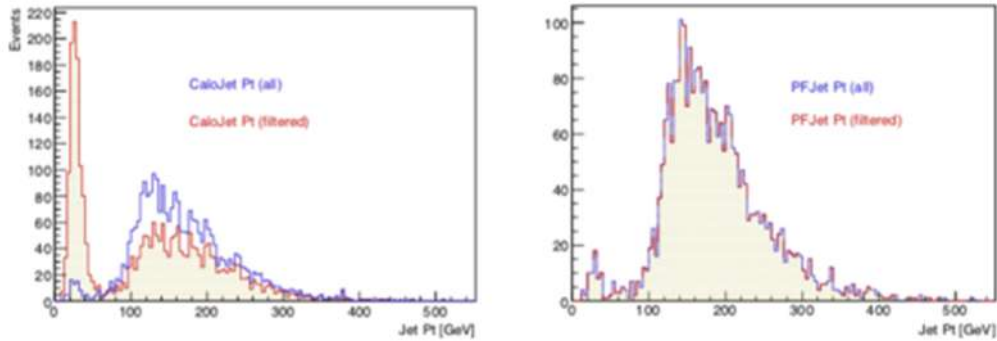


Рисунок 8 – Распределения CaloJet (слева) и PFJet (справа)

В результате изучения распределений (CaloJets, CaloMET) и (PFJets, PFMET) оказалось, что PF-алгоритмы группы JetMET не используют информацию от фильтров, разработанных для калориметра HF в последние несколько лет, а именно, QAsymmetry и HFStripFilter. Для калориметрических объектов (CaloJets, CaloMET) результаты работы фильтров применяются автоматически. После введения соответствующих коррекций распределения стали сравнимыми.

Изучение HFNoisyHitsFilter для miniAOD datasets

Для использования результатов работы HFStripFilter в группе JetMET был разработан HFNoisyHitsFilter, предназначенный для работы с уменьшенными наборами данных miniAOD, получающимися после реконструкции. Набор переменных, хранящихся в miniAOD, ограничен. В частности, для HF хранятся только RecHits, имеющие любой выставленный флажок в FlagWord, соответствующий срабатыванию одного из HF-фильтров (TOPological, QAsymmetry, HFStripFilter). Поэтому HFNoisyHitsFilter может только полностью отбраковывать события, имеющие RecHits с выставленными флажками, в отличие от HFStripFilter, который только помечает флажками фоновые RecHits, которые могут быть удалены либо при последующей обработке, либо сразу при ужесточении уровня отбраковки (SeverityLevel). Результаты обработки при применении этих двух фильтров могут отличаться, поскольку HFStripFilter отбраковывает RecHits, а HFNoisyHitsFilter отбраковывает целиком события, в которых присутствуют фоновые RecHits. Поэтому было решено сравнить результаты работы этих фильтров. Для упрощения процедуры сравнения

было решено вместо полной реконструкции (RECO) использовать Ntuples, приготовленные при помощи HcalTupleMaker, который используется в PSG специально для изучения параметров реконструированных событий, производит более быструю обработку и занимает значительно меньше места для хранения реконструированных данных. Было проведено сравнение результатов, полученных при помощи RECO и HcalTupleMaker.

Для проверки HFNoisyHitsFilter, который используется в фильтрах PAT (Physics Analysis Toolkit), был оставлен только один PAT-фильтр с HFNoisyHitsFilter. В результате обработки остались только события, в которых не присутствуют сигналы, помеченные HF-фильтрами. Аналогичный результат можно получить из Ntuples, приготовленных при помощи HcalTupleMaker, если удалить события, в которых есть сигналы, помеченные фильтрами. Распределения по PFJet для событий, полученных при помощи HcalTupleMaker, и после обработки miniAOD событий с помощью HFNoisyHitsFilter показаны на рисунке 9.

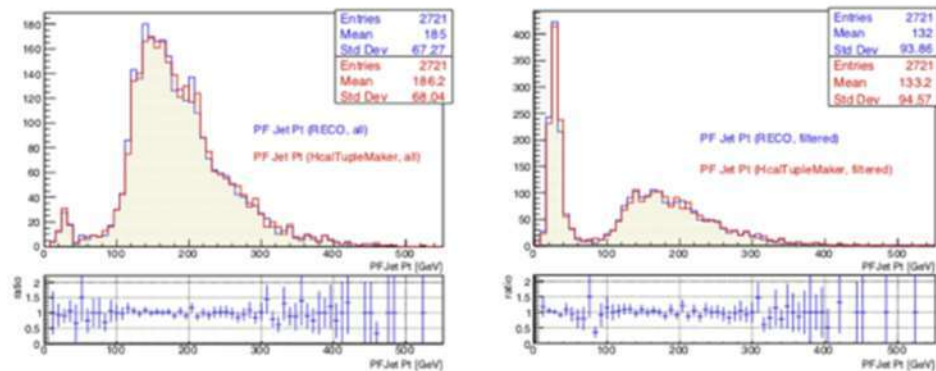


Рисунок 9 – Сравнение PFJet-распределений для событий, полученных с помощью HcalTupleMaker (слева) и miniAOD (справа)

Сравнение очищенных распределений для PFJets после обоих случаев очистки показывает, что распределения сравнимы. Таким образом, можно сделать вывод, что необходимая дополнительная очистка событий может быть применена к компактным наборам данных miniAOD после реконструкции, что приводит к аналогичным результатам, как и в случае фильтрации событий в процессе реконструкции. Это обеспечивает дополнительную гибкость при обработке информации.

По результатам этой работы было сделано четыре доклада на митингах рабочих групп DPG, PSG, JetMET.

1.6.5. Программное обеспечение эксперимента CMS

Сотрудники ИЯИ РАН исполняли обязанности помощника руководителя генераторной группы в коллаборации CMS. Эти обязанности включают в себя координацию работ по интеграции в программное обеспечение детектора CMS (CMSSW)

генераторов событий методом Монте-Карло, вспомогательных пакетов для генераторов, а также разработку компонентов CMSSW для их работы. Таких генераторов и пакетов в CMS насчитывается более двух десятков. В рамках этой деятельности необходимо два раза в неделю участвовать в митингах по генераторам и в общих митингах по развитию CMSSW, в среднем раз в две недели делать доклад о статусе генераторной части CMSSW, а также участвовать раз в месяц в специальном координационном митинге по генераторам. Осуществлялась общая координация деятельности ответственных за интерфейсы к генераторам, в случае необходимости давались консультации по интеграции генераторов. Одним из аспектов координации является участие в распределении количества пледжей (способ оценки объёма сервисных работ в CMS), имеющих отношение к генераторам.

Выполнялись обязанности ответственного за интерфейсы к генераторам pythia8, tauola++, за интеграцию и обновления генератора GENEVA и вспомогательного пакета LHAPDF. Была проведена большая работа по адаптации интерфейса CMSSW к новой серии версий Pythia8 3XX, производилось усовершенствование соответствующих скриптов и интерфейсов. Pythia8 в настоящее время является основным пакетом для генерации образцов в CMS как самостоятельная программа и как программа для адронизации. Производилось усовершенствование скриптов и кодов для быстрого тестирования новых версий. Выполнялись необходимые работы по поддержке твики-страницы по интеграции генераторных и вспомогательных пакетов в CMSSW.

Список докладов

Yu. Musienko, A. Heering, A. Karneyeu, M. Wayne. Change of SiPM parameters after very high neutron irradiation // Пленарный доклад на международной конференции "Instrumentation for Colliding Beam Physics" (INSTR-20), Новосибирск, 24-28 февраля 2020 года

2. Поиск скрытых фотонов в качестве холодной тёмной 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 счет использования оригинальной конструкции мультикатодного счетчика. Подробно работа мультикатодного счетчика нами описана в работах [54, 55]. Общий вид счетчика в момент его сборки изображен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Общий вид счетчика (слева) и счетчик в сборке (справа)

В этом счетчике, схематически изображенным на рисунке 11, рабочей поверхностью является внешний катод цилиндрической формы, из которого эмитируются электроны. За счет относительно большой (примерно 0.3 м^2) площади катода достигается высокая чувствительность детектора. Одиночные электроны, эмитируемые из катода, дрейфуют в газе по направлению к внутреннему цилиндрическому счетчику, где регистрируются за счет высокого (примерно 10^5) газового усиления. Рядом со сплошным металлическим катодом располагается второй катод, образованный натянутыми нитями с определенным интервалом, который выполняет функцию сетки в электронном лампе. На этот катод подается либо положительный (относительно потенциала сплошного катода), либо отрицательный (запирающий) потенциал. На рисунках 12, 13 представлены картины потенциала полей для этих двух конфигураций.

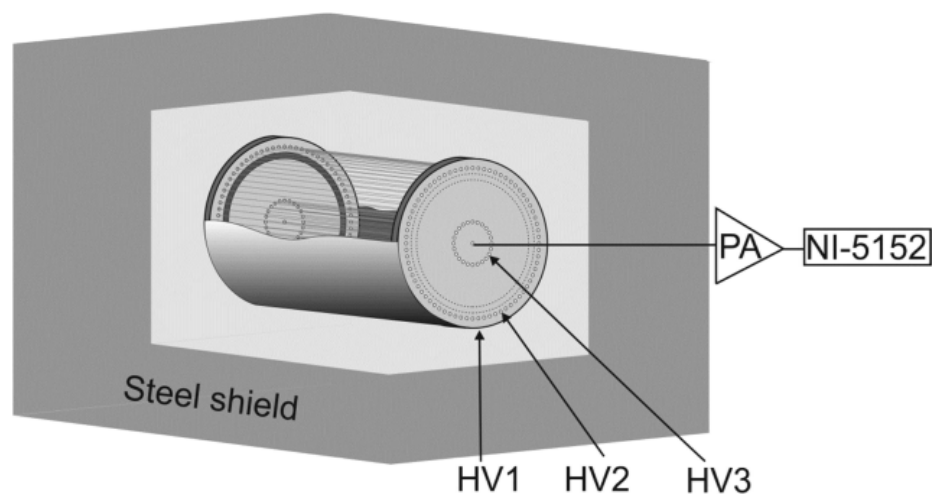


Рисунок 11 – Схема мультикатодного счетчика

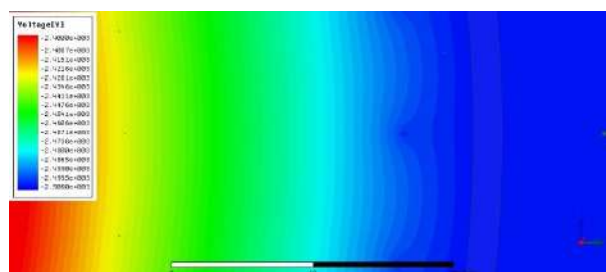


Рисунок 12 – Потенциалы поля в конфигурации 1

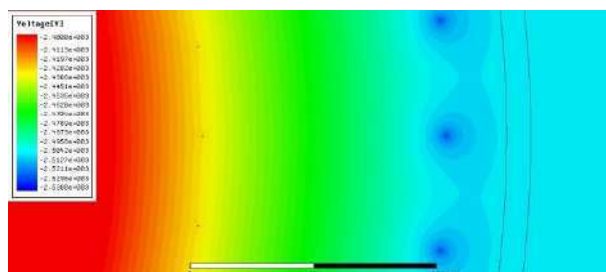


Рисунок 13 – Потенциалы поля в конфигурации 2

На рисунке 14 показаны напряженности полей в этих конфигурациях.

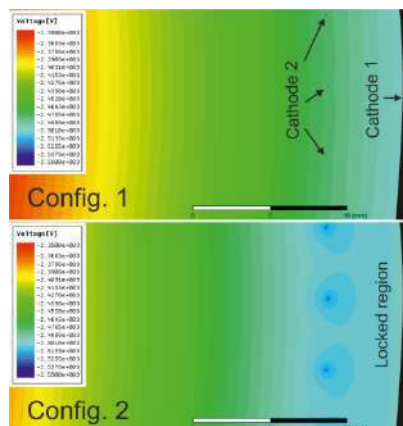


Рисунок 14 – Напряженности поля в конфигурации 1, 2

В первом случае (конфигурация 1) электроны, эмитируемые из катода, свободно диффундируют в поле по направлению к центральному счетчику. В этой конфигурации детектор измеряет скорость эмиссии одиночных электронов плюс фон R_1 . Во втором случае (конфигурация 2) измеряется только фон R_2 . Скорость эмиссии одиночных электронов находится как разность этих двух измеренных величин $R_1 - R_2$. Калибровка счетчика производилась по одиночным электронам, выбиваемым из катода счетчика ультрафиолетовыми фотонами от кварцевой лампы.

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

Проведены измерения скорости счета одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода при разных температурах, см. рисунок 15. Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода $(0,81 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$ Hz/cm². Результаты опубликованы в журнале JCAP07 (2019) 008. По результатам измерений получен верхний предел на параметр кинетического смешивания: $< 1 \times 10^{-11}$ в диапазоне масс скрытого фотона от 9 до 40 эВ. Результат включен в компиляцию данных по свойствам элементарных частиц в Review of Particle Physics в журнале Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

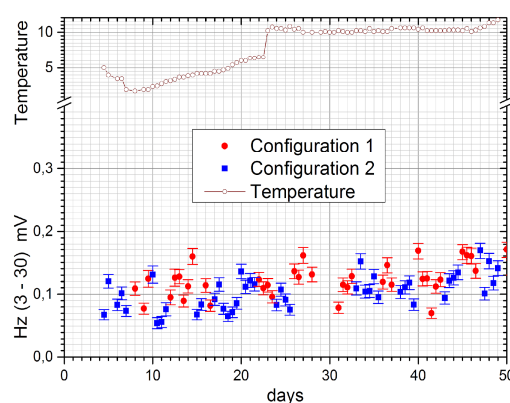


Рисунок 15 – Результаты измерений с алюминиевым счетчиком

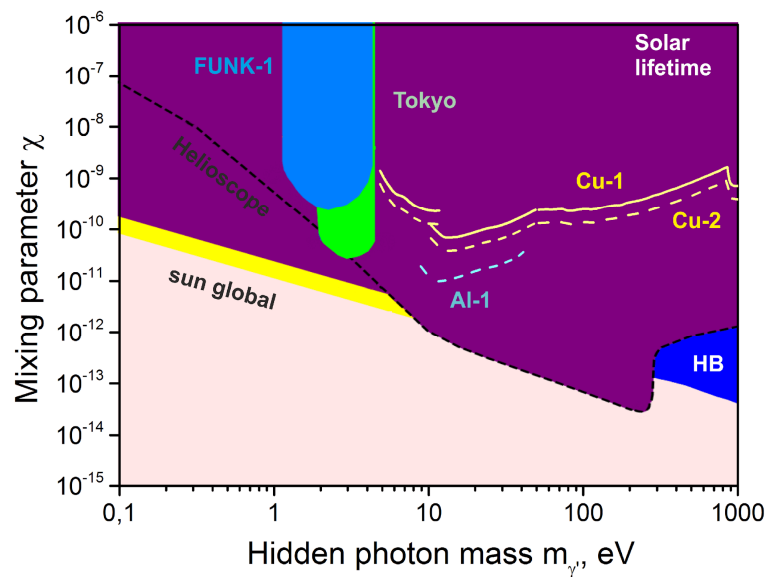


Рисунок 16 – Ограничения на величину константы смешивания по данным, полученным с помощью мультикатодного счетчика с медным (Cu-1, Cu-2) и алюминиевым (Al-1) катодом

Разработан новый метод регистрации скрытых фотонов по суточным вариациям скорости счета с помощью сборки мультикатодных счетчиков в подземной лаборатории. Метод позволяет по результатам суточных вариаций скорости счета восстановить направление вектора поля скрытых фотонов относительно плоскости Галактики. Работа доложена на международной конференции ICPPA-2020 и опубликована в трудах конференции. Подробное изложение метода опубликовано в журнале ЭЧАЯ в январском выпуске 2021 года. На рисунке 17 приведена схема установки в предлагаемом эксперименте PHELEX на Баксанской нейтринной обсерватории. Описание метода было выложено в Архив в июне 2020 года: arXiv:2006.05452. В январе 2021 года в Архиве была выложена работа 2101.02805 группы авторов из США, где предлагается эксперимент по той же методике, но только в радиодиапазоне. Разумеется, без ссылки на нашу работу.

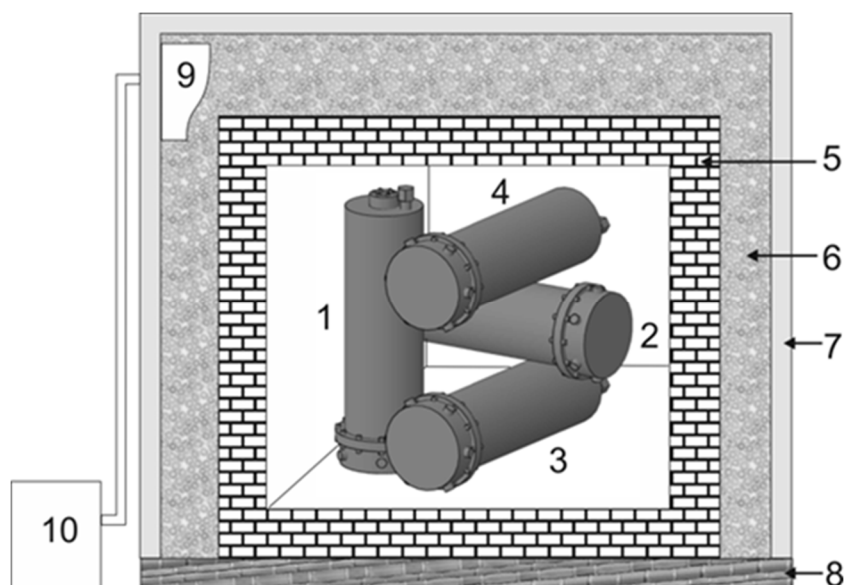


Рисунок 17 – Сборка из мультикатодных счетчиков в подземной лаборатории (схематичное изображение). 1 - 4 – счетчики с различной ориентацией (вдоль параллели, вдоль меридиана, вертикально и контрольный с матовой поверхностью), 5 – пассивная защита из свинцовых кирпичей, 6 – теплоизолятор, 7 – стальная облицовка, 8 – листы ДВП, 9 – вентилятор, 10 – холодильный аппарат (кондиционер)

2.1. Участие в международных экспериментах в CERN: эксперимент NA64

2.1.1. Статус эксперимента NA64 в 2020 г.

Набор статистического материала проводился в сеансе на установке NA64 в течение 2016-2018 гг. вплоть до остановки ускорителя SPS на период 2019-2020 гг. Решением комитета Research Board CERN рекомендовано продолжение набора статистики, начиная с 2021 г., позволяющее обнаружить массивные бозоны с массами вплоть до 1 ГэВ. Результаты, полученные в результате обработки данных 2016-2018 гг., позволили сделать вывод о возможности расширения чувствительности NA64 к константе перемешивания и массам бозонов в диапазоне 1...600 МэВ. Отсутствие избыточных событий в режиме, когда магнит установки был включен, подтверждает правильность концептуальной идеи проведения такого эксперимента и позволяет сделать вывод о возможности установления верхнего предела на константу смешивания $\gamma\text{-}A' \epsilon < 10^{-6}$ на 95%-ном доверительном уровне. Точное значение предела зависит от значения интенсивности пучка в сеансе 2021 г. и количества набранных событий. Полученные сотрудничеством NA64 предварительные результаты дают основание получить в 2021 г. наилучшие экспериментальные пределы на константу связи темный бозон-фотон, которые впервые находятся в области значений, предсказываемых моделями скрытого сектора. Ожидаемая чувствительность составит величину примерно на порядок выше, чем ныне достигнутая. Долгосрочные планы

следующего этапа эксперимента в 2021 г. включают также подготовку и проведение измерений по поиску а) невидимых распадов фотонов скрытого сектора на пару частиц темной материи; б) видимых распадов фотонов скрытого сектора на пары e^+e^- с последующей их регистрацией в детекторе NA64, в) аксионоподобных и скалярных частиц и ряд других процессов.

2.1.2. Результаты работы и достижения по эксперименту NA64

Усовершенствование системы контроля и сбора данных

Дальнейшее усовершенствование автоматической системы контроля и мониторингирования параметров такой многофункциональной установки, какой является установка NA64 (рисунок 18), необходимо как для существенного увеличения “скорострельности” установки, что влечет за собой увеличение чувствительности поисков, так и для предотвращения аварий и поломок оборудования, влекущих за собой как потерю средств, необходимых для устранения поломки, так и потерю времени набора статистического материала.



Рисунок 18 – Установка NA64 на канале H4 CERN SPS

Основной целью разработки и начала создания системы сбора данных и автоматической системы контроля и блокировки узлов установки в 2020 г. являются:

- разработки быстродействующей системы сбора данных DAQ и ее основных компонент, таких, например, как контролер, прескейлер и высокочастотные амплитудно-цифровые преобразователи MSADC;
- проверка и контроль низкошумящей электроники, используемой для считывания информации с детекторов NA64, особенно узлов, связанных с работой системы калориметров WCAL, VHCAL, ECAL и HCAL;
- контроль состояния магнитного спектрометра и электроники камер трека;
- контроль состояния системы высокого напряжения калориметров.

Мониторирование установки осуществлялось путем периодического сравнения текущих показаний и контрольных значений параметров с возможностью вывода информации по любому детектору или узлу установки на дисплей, а также с записью информации на диск. При наличии отклонений от предусмотренных спецификацией параметров система контроля оповещала систему блокировки о необходимости произвести остановку набора данных. Разработка и внедрение такой системы контроля позволило существенно повысить эффективность работы установки и избежать поломок дорогостоящего оборудования.

^8Be аномалия: продолжение эксперимента по поиску распада $X \rightarrow e^+e^-$

В 2020 г. сотрудниками ИЯИ РАН в рамках программ эксперимента NA64 был продолжен анализ данных по поиску X-бозона массой 17 МэВ, распад которого по каналу $X \rightarrow e^+e^-$ объясняет т.н. ^8Be -аномалию, а также по поиску легкой темной материи в диапазоне масс 1...100 МэВ, распадающуюся по видимой моде (т.е. на частицы СМ). Схема эксперимента на ускорителе SPS в ЦЕРН показана на рисунке 19.

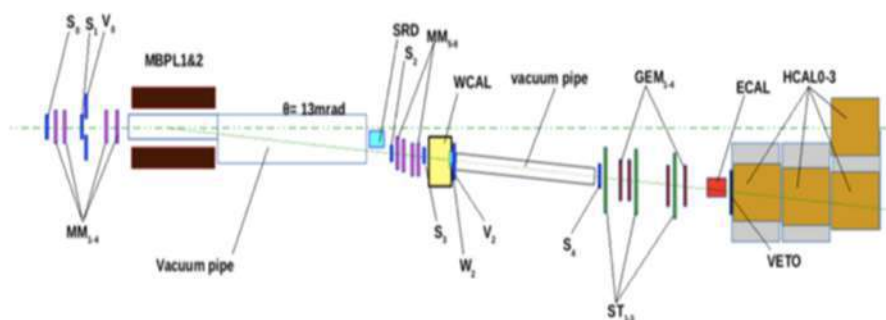


Рисунок 19 – Схема детектора для поиска распада бозона X_{17} и скрытого фотона A' легкой темной материи на пару e^+e^- на ускорителе SPS с использованием электронного пучка с энергией в диапазоне 100...150 ГэВ

Существование X-бозона является возможным объяснением не только аномального избытка пар e^+e^- в распадах возбужденных ядер ^8Be , обнаруженного экспериментом АТОМКИ в 2016 г., но и недавнего аналогичного избытка пар e^+e^- в распадах возбужденных ядер ^4He . Поиск гипотетического бозона X с массой около 17 МэВ в эксперименте NA64 в рамках группы анализа NA64 на основе данных, полученных на полной статистике сеансов 2016-2018 гг., завершен.

Получены улучшенные результаты прямого поиска нового X-бозона (16,7 МэВ), которые могут объяснить аномальный избыток пар e^+e^- , наблюдаемых в распадах возбужденного ядра $^8\text{Be}^*$ («бериллиевая аномалия»). X-бозон мог образоваться в реакции тормозного излучения $e^-Z \rightarrow e^-ZX$ пучком электронов высокой энергии, падающим на активную мишень в эксперименте NA64 на SPS ЦЕРН и наблюдаться через его

последующий распад на пару e^+e^- . Не было найдено никаких свидетельств таких распадов из комбинированного анализа выборки данных с общей статистикой, соответствующей $8,4 \times 10^{10}$ электронов на мишени, набранных в 2017 и 2018 годах. Это позволяет установить новые ограничения на связь $X-e^-$ в диапазоне $1,2 \times 10^{-4} \leq \epsilon_e \leq 6,8 \times 10^{-4}$, без учета части пространства параметров, благоприятной для бериллиевой аномалии (рисунок 20, область красного цвета). Отсутствие наблюдения распада $A' \rightarrow e^+e^-$ позволяет также установить новые ограничения на силу смешивания фотонов с темными фотонами (A') с массой меньше 24 МэВ. Проведены оценки всех значимых для поиска источников фона и систематических неопределённостей. В результате анализа сигнальных и контрольных областей существенных превышений над фоном от оценок вкладов СМ-процессов не обнаружено и получены уникальные, наиболее строгие на данный момент, ограничения на параметр смешивания A' -бозона с фотоном как функции массы A' -бозона (рисунок 20).

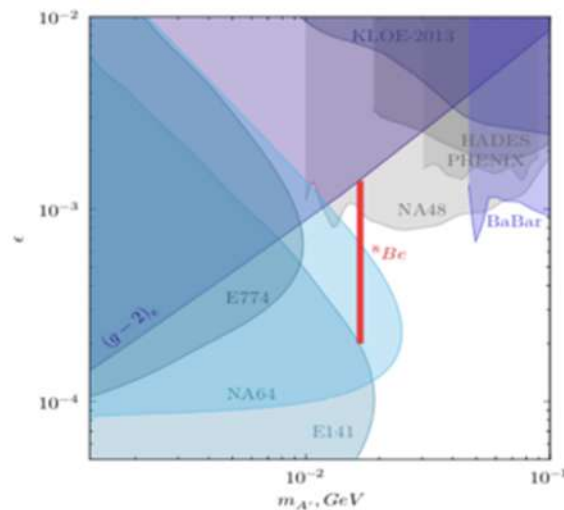


Рисунок 20 – Ограничения эксперимента NA64 на константу связи векторного X -бозона, предложенного для объяснения ^8Be -аномалии (красная область), и результаты других экспериментов

В настоящее время статья с результатами анализа и полученными ограничениями опубликована в журнале *Physical Review D* [56].

Дальнейшее повышение чувствительности установки для поиска $X17$

Недавно эксперимент АТОМКИ сообщил о новых доказательствах избытка пар e^+e^- с массой около 17 МэВ в ядерных переходах ^4He , который они ранее наблюдали при измерениях с ^8Be . Эти наблюдения можно также объяснить существованием нового векторного бозона $X17$. Пока поиск распада $X17 \rightarrow e^+e^-$ в эксперименте NA64 на SPS в ЦЕРН дал отрицательные результаты. Сотрудничество NA64 разработало новую технику, которая может быть реализована в NA64 с целью повышения чувствительности и проверки

оставшегося пространства параметров бозона $X17$. С помощью предложенного метода при обнаружении сигнального события однозначность наблюдения $X17$ достигается путем восстановления инвариантной массы пар e^+e^- от распада $X17$. Для достижения этой цели требуется оптимизация мишени образования $X17$, а также эффективная и точная реконструкция двух близких треков распада. На рисунке 21 показана схема новой установки NA64 по поиску распада $X17 \rightarrow e^+e^-$.

Проведенный специальный анализ имеющихся экспериментальных данных с использованием информации трекеров в сочетании с методами компьютерной симуляции событий показывает, что данное предложение может быть реализовано в NA64 для существенного повышения чувствительности и проверки оставшейся области пространства параметров бозона $X17$. Новый метод обеспечивает независимое подтверждение уже опубликованных результатов NA64 [56] и саму процедуру возможного обнаружения $X17$. Детальное изучение предложенной установки методом Монте-Карло и оценка фона показывают, что цель предлагаемого поиска достижима.

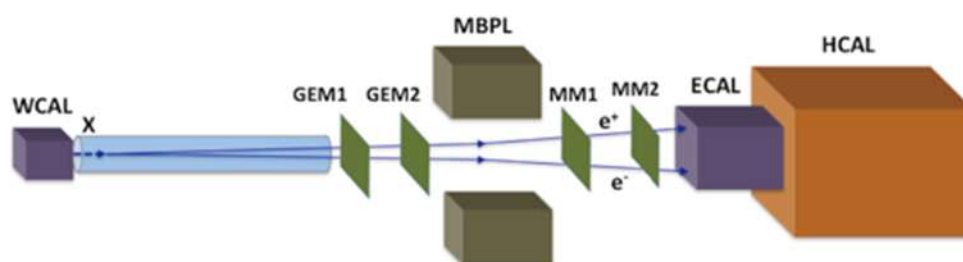


Рисунок 21 – Схема новой установки эксперимента NA64 для поиска бозона $X17$ в оставшейся области параметров с существенно повышенной чувствительностью

Возможность дальнейшего улучшения чувствительности поиска массивных бозонов $X17$ и A' на установке NA64 была доложена в 2020 г. на июньском заседании комитета SPSC CERN и получила положительные отзывы членов комитета. В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для повышения эффективности регистрации бозона $X17$ в сеансах 2021–2024 гг. Реализация такого детектора возможна с использованием трекера на основе GEM-камер с улучшенными шумовыми характеристиками и быстродействием, что позволит улучшить чувствительность модернизированной установки 2021 г. по сравнению с установкой, использованной для поисков бозона $X17$ в 2018 г.

Результаты по поиску сигнала легких скалярных и аксионоподобных частиц в 2020 г.

В 2020 году коллаборация NA64 также провела анализ по модельно-независимому поиску легких скалярных (s) и псевдоскалярных аксионоподобных (a) частиц, которые связаны с двумя фотонами, с использованием данных, полученных от 100-гэвного электронного пучка H4 SPS. Новые частицы, если они существуют, могут быть образованы с помощью эффекта Примакова при взаимодействии жестких тормозных фотонов, генерируемых электронами с энергией 100 ГэВ в активном поглотителе NA64, с виртуальными фотонами, создаваемыми ядрами поглотителя.

Частица a/s , как показано на рисунке 22, будет проходить через стоящий ниже по пучку модуль HCAL1, выступающий в качестве экрана, и будет наблюдаться либо через их распад $a/s \rightarrow \gamma\gamma$ в оставшейся части детектора HCAL2,3, либо как события с большой потерей энергии, если a/s распадается за пределами детектора HCAL. Этот метод позволяет исследовать пространство параметров a/s , в том числе те параметры общих моделей аксионов, которые были недоступны для поисков в предыдущих экспериментах. При анализе данных, соответствующих $2,84 \times 10^{11}$ электронов на мишени, пока не было обнаружено никаких свидетельств таких процессов. В результате были получены уникальные, наиболее строгие на данный момент ограничения на константу связи частиц a/s с фотоном $g_{a\gamma\gamma}$ как функцию массы $m_{a(s)}$, показанные на рисунке 23 для масс a/s меньше 55 МэВ. Полученные результаты опубликованы в журнале Physical Review Letters [57].

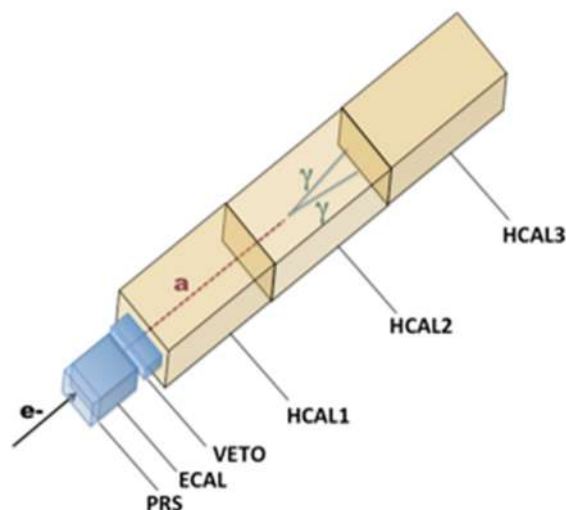


Рисунок 22 – Схема конфигурации установки NA64 для поиска легких скалярных и псевдоскалярных аксионоподобных частиц, распадающихся на два фотона

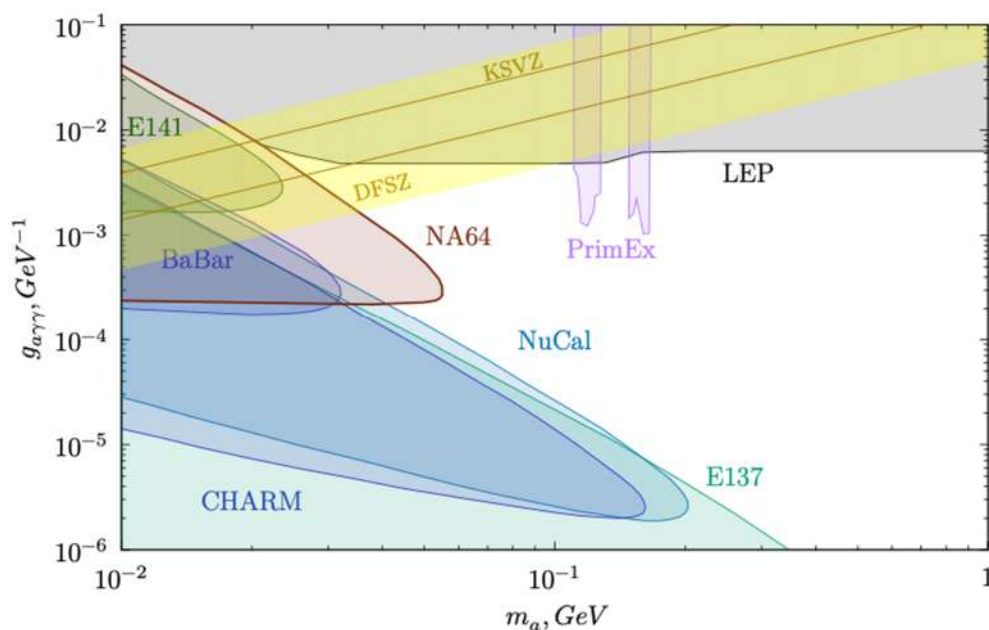


Рисунок 23 – Область исключения на уровне достоверности 90% для связи АПЧ с фотонами в плоскости $(m_a; g_{a\gamma\gamma})$ как функция массы (псевдо)скаляра m_a , полученная из анализа данных NA64

Повышение чувствительности установки для дальнейшего поиска легких скалярных и аксионоподобных частиц в 2021 г.

Возможность дальнейшего улучшения чувствительности поиска легких скалярных (s) и аксионоподобных (a) частиц на установке NA64 была доложена в 2020 г. на июньском заседании комитета SPSC CERN и положительно отмечена членами комитета. В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для эффективной регистрации частиц a/s в сеансах 2021-2025 гг. Реализация такого детектора возможна, например, с использованием дополнительного более короткого модуля адронного калориметра на основе уранового поглотителя вместо модуля HCAL1. Это позволит улучшить эффективность регистрации короткоживущих скалярных и аксионоподобных частиц, что в свою очередь позволит улучшить чувствительность модернизированной установки 2021 г. по сравнению с установкой 2018 г.

Список докладов

S.N. Gninenko. Search for LDM and Vector/ALPs mediators in the sub-GeV mass range at NA64, NA62, MESSA, and PADME // Invited talk, Feebly Interacting Particles, International Workshop, 31 Aug-4 Sept 2020, CERN

С.Н. Гниненко. Поиски новой физики на ускорителях // Приглашенный доклад на Конференции, посвященной 50-летию ИЯИ РАН, 3-4 декабря 2020 г., Москва

3. Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP

3.1. Разработка и создание новых нейтринных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK

3.1.1. 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 углеродно-водной мишени детектора WAGASCI, что позволит существенно уменьшить 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 T2K на протонном ускорителе J-PARC, Япония, 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 был смонтирован в полном объеме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента T2K в 2019 г. – под углом 1,5 градуса относительно направления протонного пучка (рисунок 24).

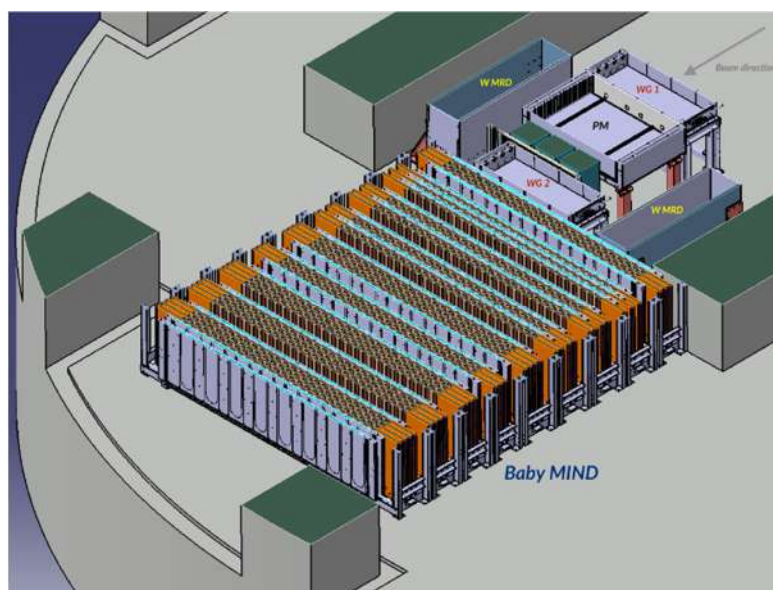


Рисунок 24 – Схема детекторов Baby-MIND и WAGASCI на нейтринном пучке J-PARC (под углом 1,5 градуса относительно протонного пучка)

С ноября 2019 г. по февраль 2020 г. детектор Baby-MIND провел первый полноценный физический сеанс, в ходе которого была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени около 4.8×10^{20} POT. Мощность протонного пучка составила 515 кВт. Детектор работал с магнитным полем 1,5 Тесла, что позволило надежно различать треки заряженных частиц, рожденных при взаимодействии нейтрино или антинейтрино в водном детекторе WAGASCI и в детекторе Baby-MIND (см. рисунки 25 и 26). Продолжается анализ данных по измерению сечений взаимодействия нейтрино с водородом, водой и углеродом при энергии около 1 ГэВ, также анализируются данные по сечениям взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядрами железа.

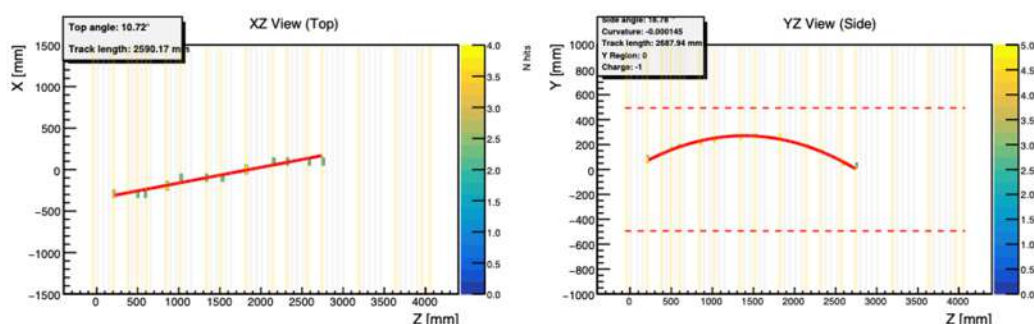


Рисунок 25 – Реальное событие в детекторе Baby-MIND. Слева: вид сверху, справа: вид сбоку. Кандидат в CCQE событие, в котором мюонное *нейтрино* провзаимодействовало в железе детектора Baby-MIND, а образовавшийся *отрицательный мюон* под влиянием магнитного поля движется по искривленной траектории с изгибом *вниз* (магнитное поле направлено вдоль оси X - перпендикулярно правому рисунку).

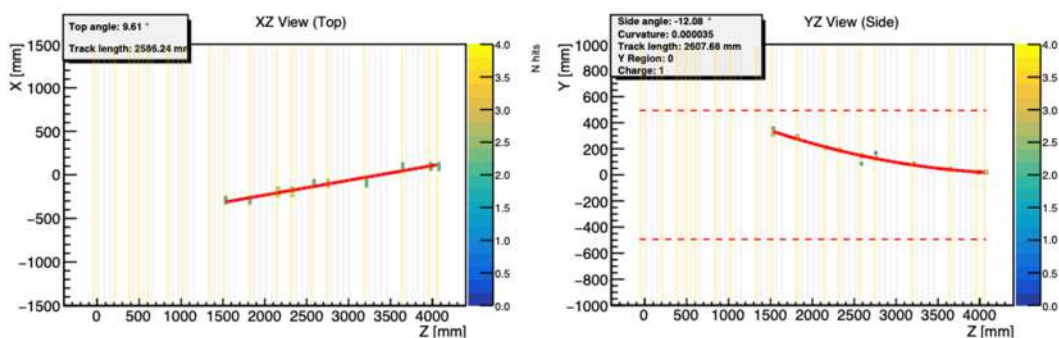


Рисунок 26 – Реальное событие в детекторе Baby-MIND. Слева: вид сверху, справа: вид сбоку. Кандидат в CCQE событие, в котором мюонное *антинейтрино* провзаимодействовало в железе детектора Baby-MIND, а образовавшийся *положительный мюон* под влиянием магнитного поля движется по искривленной траектории с изгибом *вверх* (магнитное поле направлено вдоль оси X - перпендикулярно правому рисунку)

3.1.2. Сцинтилляционный сегментированный нейтринный 3D детектор SuperFGD

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также для ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK (с дальним детектором ГиперКамиоканде), группой ИЯИ РАН разработан 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 184 см, ширина 192 см, высота 56 см. Сцинтилляционные сигналы регистрируются микропиксельными лавинными фотодиодами Hamamatsu MPPC. 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 (x, y, z).

Продолжаются тесты отдельных кубиков как по измерению световыхода с помощью космических мюонов, так и по измерению геометрических характеристик (размеры и вес). Средний световыход отдельного кубика составляет примерно 35 фотоэлектронов, а вес – около 1 грамма с процентной точностью. Кроме того, продолжается анализ данных, набранных в ходе тестов прототипов SuperFGD детектора на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе в 2017-2018 гг.

В декабре 2019 г., а также в декабре 2020 г., были проведены сеансы на пучке нейтронов в Лос-Аламосе (США), в ходе которых были измерены параметры двух прототипов детектора SuperFGD в области энергий нейтронов 1 ГэВ и ниже. В 2020 г. сотрудники ИЯИ принимали участие в этих сеансах удаленно. Анализ всех накопленных данных проводится в разных лабораториях, в том числе и в ИЯИ, и будет продолжен в следующем году.

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

3.2.1. Сцинтилляционные счётчики для эксперимента SHiP

В 2020 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 планировалось протестировать с помощью космических лучей в 2020 г., но ситуация с пандемией COVID-19 внесла свои коррективы в эти планы.

В январе 2020 года сотрудники ИЯИ РАН принимали участие в работах по обеспечению светоизоляции полученных сцинтилляционных пластин в ЦЕРН. Каждая из 120 пластин оборачивалась несколькими слоями тонкой алюминиевой фольги и чёрной полиэтиленовой плёнки. Затем с помощью металлических направляющих были собраны рамы для крепления пластин: 20 пластин на одну стену (рисунок 27).



Рисунок 27 – Плоскости прототипа временного детектора в сборке (ЦЕРН, ноябрь 2020 г.)
для эксперимента SHiP

Эти стены будут смонтированы на специальном каркасе, в котором предусмотрено пространство для электроники, кабелей и т.д. Работы с прототипом временного детектора должны были быть продолжены в ЦЕРН в 2020 году: в частности, планировалось проведение тестов на космических лучах, но из-за пандемии COVID-19 доступ в ЦЕРН был ограничен, поэтому планы не были осуществлены.

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 (рисунок 28). Каждая из этих плиток будет считываться четырьмя фотодиодами SiPM без использования спектрсмещающих оптических волокон. Планировалось, что эти плитки будут

протестированы во Фраскатти на пучке ВТФ в 2020 г., но ситуация с пандемией COVID-19 внесла свои коррективы и в эти планы: доступ во Фраскатти был закрыт, поэтому нашим итальянским коллегам удалось провести измерения только с космическими лучами. Более дешевый вариант пластин из УНИПЛАСТА показал меньший световыход (35 ф.э.), в то время как более дорогая пластина Eljen EJ200 показала 98 ф.э.



Рисунок 28 – Сцинтилляционные пластины из полистирола для прототипа мюонного детектора SHiP (~20 см x ~20 см x ~1 см), предложенные сотрудниками ИЯИ РАН и изготовленные методом экструзии на производстве ООО УНИПЛАСТ, г. Владимир. Слева: пластины с отражателем, полученным методом травления; в центре: пластины без отражателя; справа: пластина с 4 канавками для фотосенсоров

3.3. Эксперимент JUNO

Основными результатами работ 2020 года, в которых принимала активное участие группа, является окончательная оптимизация жидкого сцинтиллятора для центрального детектора эксперимента JUNO и завершение массового производства малогабаритных фотоумножителей (~26 тысяч штук) для этого эксперимента. Разработана система быстродействующих источников света для отбора, тестирования и исследования параметров малогабаритных фотоумножителей и система инъекции световых импульсов для засветки большого количества тестируемых фотоумножителей на основе пластиковых оптоволоконных кабелей. Длительность световых импульсов составляет ~1 нс (FWHM). Световыход регулируется в широком диапазоне 0-10⁸ фотонов в импульсе. Эти системы активно используются в настоящее время в экспериментальных комплексах, созданных коллаборацией для массового тестирования таких фотоумножителей для эксперимента JUNO в Гуансийском университете и в Национальном университете Тайваня.

При исследовании параметров малогабаритных фотоумножителей, произведенных для эксперимента JUNO, членами группы ИЯИ РАН обнаружены послеимпульсы с аномально большими временами задержки от основного сигнала, которые не могут быть объяснены существующими моделями образования послеимпульсов в вакуумных

фотоумножителях. Показана необходимость учета такого явления при создании регистрирующих электронных систем и анализе данных эксперимента.

Разработан специализированный измерительный стенд для исследования зависимости параметров жидкого сцинтиллятора и кремниевых фотоумножителей различных типов, которые являются возможными кандидатами для использования в ближнем детекторе ТАО эксперимента JUNO, от температуры в диапазоне температур $-60^{\circ}\text{C} \div +25^{\circ}\text{C}$. Показано, что в этом диапазоне температур не обнаружено какое-либо существенное изменение эффективности регистрации фотонов этих кремниевых фотоумножителей. Подтверждено ранее сообщавшееся в литературе повышение световыхода жидкого сцинтиллятора на $\sim 20\%$ при понижении температуры от $+20^{\circ}\text{C}$ до -50°C .

Начата разработка калибровочной системы для ближнего детектора ТАО эксперимента JUNO.

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

4.1. Продолжение набора статистики в эксперименте T2K по изучению осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в 2020 г.

4.1.1. Осцилляционный анализ данных 2010-2020 гг.

С ноября 2019 года по февраль 2020 года в эксперименте T2K был проведен сеанс (№10, начиная с 2010 г.) с пучком мюонных нейтрино. Достигнута максимальная мощность протонного 30-ГэВного пучка на уровне 522 кВт, а стабильная работа в сеансе осуществлялась при средней мощности пучка 515 кВт (интенсивность пучка в одном импульсе ускорителя каждые 2,48 с составила $2,6 \times 10^{14}$ протонов, в каждом импульсе 8 банчей). Всего за сеанс №10 (ноябрь 2019 – февраль 2020 гг.) был набран интегральный поток протонов на мишени около 5×10^{20} POT.

Результаты осцилляционного анализа данных сеансов №№1-9, накопленных с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино с 2010 по 2018 год, были опубликованы в 2020 г. в журнале Nature (580 (2020) 7803, 339-344, Nature 583 (2020) 7814, E16 (erratum)). Анализ данных базировался на интегральном потоке $1,49 \times 10^{21}$ протонов на мишени (POT) для нейтринной моды и $1,64 \times 10^{21}$ POT для антинейтринной моды.

Добавление событий из сеанса №10 (+33% по протонам на мишени) предварительно привело к следующим результатам: суммарно по всем сеансам (1-10) в дальнем детекторе выделено 94 электроноподобных событий с одним «черенковским» кольцом и 14 событий с рождением электрона и одного пиона от взаимодействия электронного нейтрино – в нейтринной моде. В случае измерений с мюонными антинейтрино было зарегистрировано 16 событий, соответствующих появлению электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.

4.2. Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях

4.2.1. Улучшение чувствительности к CP нарушению в эксперименте T2K и получение нового результата

Использование данных о спектрах нейтрино и антинейтрино в ближнем детекторе позволило существенно снизить систематические погрешности в измерении числа событий в Супер-Камиоканде с 11-19% до 3-4% для мюоноподобных событий, до 4,7-5,9% для

электроноподобных событий без пионов в конечном состоянии и до 14,3% для событий с одним пионом в конечном состоянии. В результате анализа были получены предварительные результаты по измерению CP-нарушающей фазы δ_{CP} (рисунок 29).

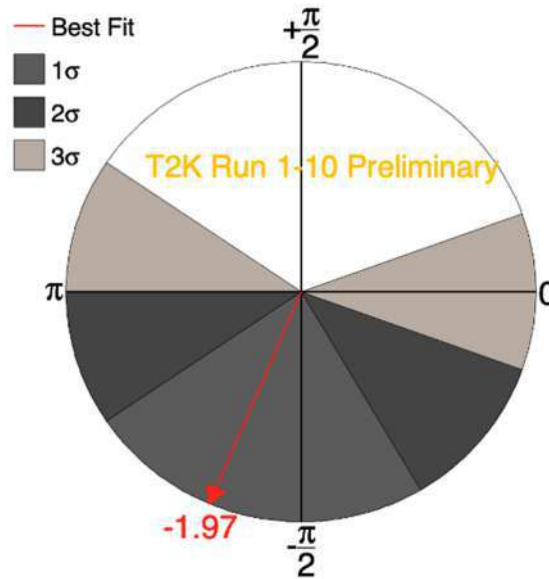


Рисунок 29 – Предварительные результаты измерений CP нечетной фазы в эксперименте T2K (данные 2010-2020 гг., сеансы 1-10): разными оттенками от серого до черного показаны доверительные вероятности значения CP нечетной фазы δ_{CP} , от 1 σ (68.27%) до 3 σ (99.73%), а красная стрелка указывает на наилучшую оценку δ_{CP} (предварительно)

Было получено, что наиболее вероятными значениями CP нечетной фазы являются $\delta = (-1,97^{+0,93}_{-0,58})$ рад для нормальной иерархии масс и $\delta = (-1,38^{+0,48}_{-0,54})$ рад для инверсной иерархии масс. Полученный результат подтверждает первоначальное указание T2K на максимальное CP нарушение в лептонном секторе Стандартной Модели.

4.3. Поиск стерильных нейтрино в эксперименте T2K

4.3.1. Поиск стерильных нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K

Помимо изучения *стандартных* нейтринных семейств в эксперименте T2K продолжают работы по поиску *стерильных* нейтрино и/или частиц темной материи (DM), не участвующих в слабых взаимодействиях.

В течение 2020 года в эксперименте T2K проводился анализ по поиску массивных нейтрино в диапазоне масс менее 150 МэВ. Использовался подход, разработанный в ИЯИ РАН, по поиску массивных нейтрино через их распады во время-проекционных камерах ближнего нейтринного детектора. Получены предварительные результаты, которые обсуждаются в коллаборации T2K.

Частицы темной материи (V) могут рождаться на протонном ускорителе в двух типах процессов:

- 1) прямое рождение, когда частица темной материи появляется в результате ядерных реакций протонов с веществом: $pp \rightarrow ppV$;
- 2) не прямое рождение, когда частица темной материи образуется как продукт распада, например, нейтрального пиона, который в свою очередь образовался в результате взаимодействия протона с веществом: $\pi^0 \rightarrow \gamma V$.

Регистрировать частицы темной материи (до их распада) можно при детектировании либо рассеянных электронов, либо ядер отдачи. В эксперименте T2K первый метод регистрации предпочтительнее – в ближнем детекторе ND280, который содержит трекер, включающий в себя времяпролетные камеры TPC и сегментированные детекторы FGD. Главная проблема при поиске стерильных нейтрино и частиц темной материи в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K – подавление фона нейтринных взаимодействий. В настоящий момент ведется работа по изучению всех возможных фоновых процессов и методов их подавления, моделируются отклики детекторов на сигнальные и фоновые события, а также разрабатывается программное обеспечение для реконструкции событий.

Схема возможного детектирования темного фотона в ближнем нейтринном детекторе ND280 показана на рисунке 30.

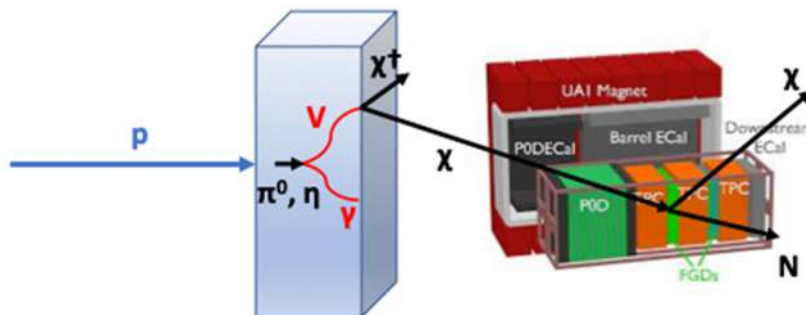


Рисунок 30 – Возможная схема рождения и распада частиц темной материи на протонном пучке J-PARC, а также возможный метод регистрации продуктов распада частиц темной материи в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K

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

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

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

В течение 2020 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: $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) < 14 \times 10^{-10}$ 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. В 2020 году был проведен анализ данных 2018 года (~2 раза больше распадов каонов, чем в 2017 году). Для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ 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 $m_{\text{miss}}^2 = (p_K - p_\pi)^2$ используется для кинематического выделения искомого распада на фоне других мод распада K-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. События распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, прошедшие критерии отбора показаны на рисунке 31.

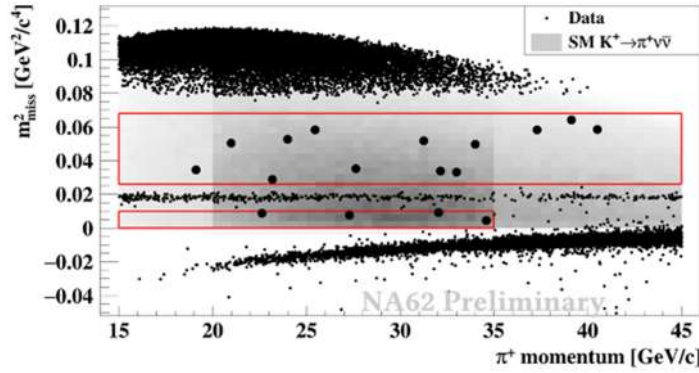


Рисунок 31 – Реконструированное значение квадрата недостающей массы m_{miss}^2 в зависимости от измеренного импульса пиона p_π в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора. Точки – экспериментальные данные, серая область – ожидаемая область в Стандартной модели, красные линии – границы сигнальных областей. Наблюдаются 17 событий в сигнальной зоне

На рисунке 31 показано реконструированное значение квадрата недостающей массы m_{miss}^2 в зависимости от измеренного импульса пиона p_π в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора для данных 2018 года. Видно, что в сигнальную область попадают 17 событий. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 7,6, а фон – на уровне $5,28 \pm 0,99$. Суммарный анализ данных 2016-2018 гг. приводит к самому точному на данный момент измерению вероятности искомого распада: число наблюдаемых событий = 1 (2016 г.) + 2 (2017 г.) + 17 (2018 г.) = 20; уровень фона: $\sim 0,2$ (2016 г.) + 1,5 (2017 г.) + 5,3 (2018 г.) = 7; $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11,0 + 4,0 - 3,5 \text{ (stat.)} \pm 0,3 \text{ (syst.)}) \times 10^{-11}$. Этот предварительный результат был доложен на конференции ICHEP2020 в августе 2020 г.

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

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

В каонном эксперименте NA62 проведен анализ данных с целью поиска распада нейтрального пиона в невидимые частицы (пару нейтрино-антинейтрино, если подразумевать частицы СМ) $\pi^0 \rightarrow \text{invisible}$. Анализ данных, включавших в себя 4×10^9 нейтральных пионов из распадов $K^+_{\pi 2}$, не привёл к статистически значимому отклонению числа наблюдаемых событий от предсказанных фоновых событий, поэтому установлен

верхний предел на вероятность распада $BR(\pi^0 \rightarrow \text{invisible}) < 4,4 \times 10^{-9}$ (90% CL), что улучшает текущее ограничение в 60 раз. Результаты работы опрарвлены в JHEP для публикации.

Для объяснения так называемой проблемы сильного CP 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 МэВ/ c^2 . Продолжается работа над оптимизацией критериев отбора событий для поиска ALP-частиц и построения модели фона.

На основе данных 2017-2018 гг. в эксперименте NA62 выполнен поиск запрещенных процессов с нарушением лептонного числа $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ e^+$. Данный поиск основан на методе “слепого” анализа, при котором необходимо детальное предсказание фоновых событий в сигнальной области. Для данного анализа было набрано $1,32 \times 10^{12}$ распадов каонов. Полный аксептанс для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+$ равен 4,90% (6,21% для процесса $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ \mu^-$). Для распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+$ ожидаемое число фоновых событий в сигнальной области равно $1,06 \pm 0,20$, а в эксперименте не найдено ни одного события. Для распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+$ ожидаемое число фоновых событий в сигнальной области равно $0,92 \pm 0,34$, а найдено 2 события. Таким образом, установлены следующие ограничения на процессы с нарушением лептонного числа: $BR(K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+) < 4,2 \times 10^{-11}$, 90% CL; $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+) < 6,6 \times 10^{-11}$, 90% CL, что улучшает текущие ограничения в 12 и 8 раз, соответственно.

Чувствительность NA62 к распаду $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ e^-$ находится на уровне чувствительности предыдущих поисков данного процесса. Продолжается анализ данных для поиска распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ e^+$, ожидается улучшение текущих пределов примерно в 200 раз, а также распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^+$, поиски которого не велись до сих пор, и NA62 может установить верхнее ограничение на уровне 5×10^{-11} . Результаты доложены на конференции ICHEP2020, статья готовится к отправке в Phys.Lett.B.

Поиск тяжелых нейтрино в процессе $K^+ \rightarrow e^+ N$ выполнен в данных 2017-2018 гг. (поиск пика). В результате анализа статистически значимых доказательств существования тяжелых нейтрино найдено не было и были установлены верхние пределы на квадрат элемента матрицы смешивания между тяжелым и электронным нейтрино $|U_{e4}| < 10^{-9}$, 90% CL для диапазона масс 144-462 МэВ, что значительно улучшает предыдущие ограничения, полученные из поиска тяжелых нейтрино в распадах каонов. Результаты опубликованы в

статье Physics Letters B 807 (2020) 135599. Аналогичный метод был применен для поиска тяжелых нейтрино в распаде $K^+ \rightarrow \mu^+ N$. Установлены верхние пределы на квадрат элемента матрицы смешивания между тяжелым и мюонным нейтрино $|U_{\mu 4}| < 10^{-8}$, 90% CL для диапазона масс 200-384 МэВ, что улучшает текущие ограничения, полученные из поиска тяжелых нейтрино в распадах каонов для диапазона масс 300-384 МэВ. Статья готовится к отправке в Phys.Lett.B.

5.3. Исследование распадов каонов на лету в эксперименте ОКА

В каонном эксперименте ОКА (ИФВЭ, Протвино) проведен анализ данных с целью измерения вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ измерена вероятность распада и сравнения с предсказанием киральной пертурбативной теории ChPT O(p4). После проведенного анализа было наблюдено 32000 событий – кандидатов в этот распад. Диаграммы, описывающие этот распад показаны на рисунке 32.

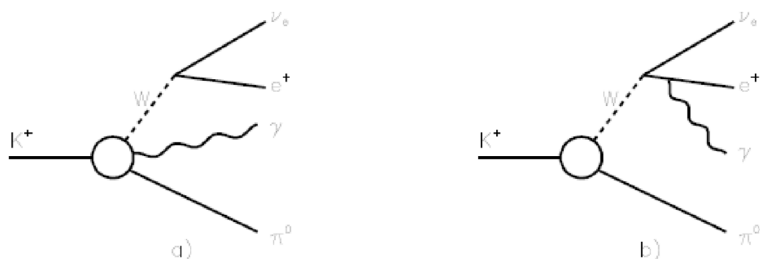


Рисунок 32 – Диаграммы, описывающие распад $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$

Полученный результат приведен в таблице. В настоящее время это наиболее точное измерение вероятности этого распада.

Таблица 1 – Отношение вероятностей распада $Br(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma) / Br(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu)$

$R_3 \times 10^2$	N_{ev}	experiment
$0,53 \pm 0,01 \pm 0,01$	7248	this experiment
$0,48 \pm 0,02 \pm 0,03$	1423	ISTRA+
$0,46 \pm 0,08$	82	XEBC
$0,56 \pm 0,04$	192	ISTRA
$0,76 \pm 0,28$	13	HLBC

Полученный результат находится в хорошем согласии с вероятностью распада, полученной в киральной пертурбативной теории ChPT O(p4) $R = (0,592 \pm 0,005) \times 10^{-2}$. Измерение этого распада является хорошим тестом эффектов за рамками ChPT.

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

Для новой экспозиции нейтрино + антинейтринного пучка получены следующие результаты.

1. Регистрация мюонных нейтрино.

На дальнем детекторе зарегистрировано 211 мюонных нейтринных событий (включая 8 фоновых событий) и 105 событий (включая 2 фоновых событий), рожденных мюонными антинейтрино.

2. Регистрация электронных нейтрино.

На дальнем детекторе зарегистрировано 82 электронных нейтринных событий (включая 27 фоновых событий) и 33 события (ожидаемый фон – 14 событий), от взаимодействия электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$, которые появились в пучке мюонных антинейтрино из-за $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций.

В результате подгонки спектров мюонных и электронных событий, измеренных в нейтринных и антинейтринных пучках как функций параметров $\Delta m^2_{32} = |m^2_3 - m^2_2|$ – разности квадратов масс нейтрино, угла смешивания θ_{23} и фазы нарушения CP-инвариантности δ_{CP} , получены 1σ доверительные интервалы для значений этих параметров при нормальной иерархии масс нейтрино ($m_1 < m_2 < m_3$): Δm^2_{32} (10^{-3}эВ^2) – [2,34, 2,48], $\sin^2(\theta_{23})$ – [0,54, 0,60], $\delta_{CP}(\pi) = 0,82$. Как представлено на рисунке 33, обратная иерархия масс нейтрино ($m_3 < m_1 < m_2$) и $\delta_{CP}(\pi) = 0,5$ исключается на 90% доверительном уровне. При нормальной иерархии масс значение $\delta_{CP}(\pi) = 1,5$ исключается с достоверностью 2σ .

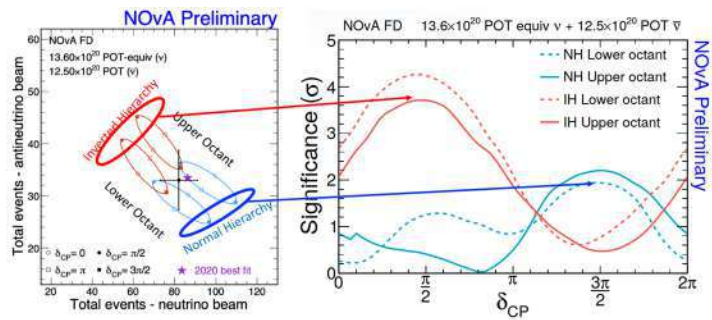


Рисунок 33 – На левом рисунке представлено число электронных событий зарегистрированных на дальнем детекторе, рожденных от взаимодействия электронных нейтрино и антинейтрино. На правом рисунке показана достоверность исключения значений δ_{CP} для нормальной и обратной иерархий масс нейтрино и значений $\theta_{23} > \pi/4$ и

$$\theta_{23} < \pi/4$$

3. Получены поправки к сечениям взаимодействия нейтрино, которые используются в генераторе нейтринных событий GENIE. Это привело к существенному улучшению согласия результатов моделирования с данными эксперимента NOvA с ближнего детектора.

4. Была определена точность расчета сечений рассеяния электронов на обменных мезонах, используя данные по рассеянию электронов на ядрах углерода, кальция и аргона. Показано, что она зависит только от переданного импульса и улучшается по мере роста последнего.

Доклады на онлайн конференции NEUTRINO2020, Fermilab, USA

A. M. Himmel (for NOvA Collaboration) «New oscillation results from the NOvA experiments». <https://indico.fnal.gov/event/43209/contributions/187840/attachments/130740/159597/NOvA-Oscillations-NEUTRINO2020.pdf>

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

7.1. Экспериментальная установка

Установка «Троицк ню-масс» состоит из двух основных частей: безоконного источника трития (WGTS) и электростатического спектрометра с магнитной адиабатической коллимацией, рисунок 34.

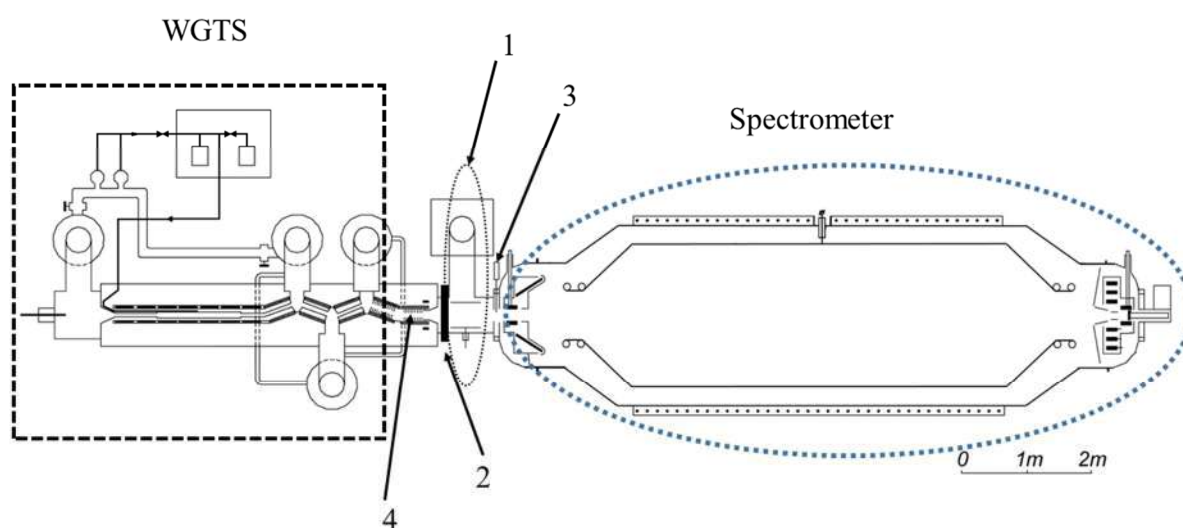


Рисунок 34 – Основные элементы установки: тритиевый источник расположен слева(WGTS), спектрометр – справа: 1 – объем преспектрометра с откачным постом; 2 – заслонка-шибер преспектрометра; 3 – заслонка спектрометра; 4 – крио-насос остаточного трития с замороженным аргоном

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 [58].

7.2. Полученные в 2020 году результаты

7.2.1. Завершающая очистка спектрометра от остаточного трития

После проведения очистки от трития в спектрометре в предыдущем году в 2020 г. продолжилась систематическая очистка поверхностей внутри спектрометра посредством длительной откачки с прогревом корпуса в течение нескольких месяцев до достижения высокого вакуума. На спектрометре был установлен новый высокочувствительный масс-

анализатор остаточных газов, который позволил контролировать процесс откачки. Установлено, что основным компонентом остаточных газов при прогреве стенок спектрометра является вода, которая активно скачивается насосами. При холодных стенках спектрометра основной компонентой, ограничивающей давление снизу, является водород, который был накоплен на внутренних поверхностях годом ранее при очистке спектрометра от трития. Однако, величина давления остаточного водорода не препятствует проведению физических измерений.

7.2.2. Проведение сеанса измерений

Несмотря на пандемию, было решено в декабре провести сеанс измерений с наполнением тритиевого источника рабочим газом – тритий содержащими изотопами молекулярного водорода. Сеанс проводился в круглосуточном режиме в течение 12 дней с соблюдением всех мер безопасности в условиях пандемии. Было получено и распределено по криогенным хранилищам 15 тонн жидкого азота. Жидкий азот требуется для работы криогенной системы сжижения гелия. В течение 5-ти дней проводилось наполнение криостатов со сверхпроводящими соленоидами. В задачах сеанса стояло исследование фоновых условий в спектрометре после его очистки, оптимизация конфигурации магнитных полей сверхпроводящих обмоток и корректирующих полей, подбор положения и калибровка детектора электронов для измерений спектра трития. В результате было выполнено несколько циклов калибровок и измерений спектра трития в диапазоне энергий 14-18,7 кэВ. В измерениях была также задействована высокоточная электронная пушка, которая контролировала плотность заполнения рабочего газа в источнике.

При работе с большими интенсивностями при регистрации отдельных событий ограничивающими факторами являются наложение сигналов и мертвое время электроники. На установке эта ситуация решается дополнительной полной оцифровкой потока аналоговых сигналов с детектора. Был использован оригинальный алгоритм восстановления сигналов по ожидаемой форме одиночного импульса. Начата обработка спектров, набранных в таком режиме.

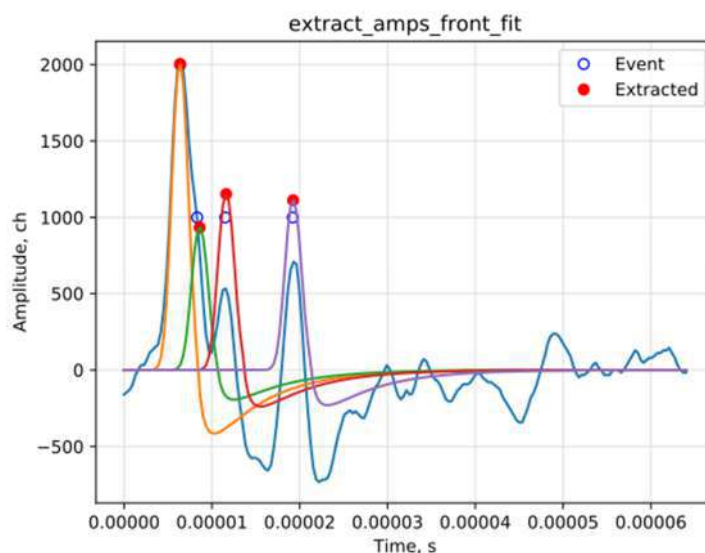


Рисунок 35 – Пример работы алгоритма вычленения и оценки фактических параметров сигналов в условиях большой загрузки и наложения импульсов. На диаграмме амплитуда-время оцифрованных сигналов (сплошная синяя линия) синими кружочками отмечены реальное время и амплитуда 4-х сигналов. Красными кружочками отмечены восстановленные время и амплитуда импульсов [59]

7.3. Разработка новых методов по поиску стерильных нейтрино в диапазоне масс ниже 1 МэВ

Параллельно с основной задачей по поиску стерильных нейтрино в распаде трития с использованием имеющегося газообразного источника начаты работы по созданию источника трития на основе графена. Тритиевый источник на основе графена может существенно упростить процедуру измерений, а также является перспективным направлением для разработки средств и материалов для хранения водорода. Проведена и продолжается работа с имеющимися источниками информации по сбору и осмыслению сведений для создания графеновой пленки или графеновых трубок. Получены консультации от сотрудников из Института общей физики РАН им. А.М. Прохорова, которые разрабатывают и исследуют различные материалы на основе графена. Было установлено, что на первом этапе будет достаточно начать с пленками на основе графеновых трубок. Разработан план совместных действий.

Помимо этого начаты работы по разработке нового эксперимента по поиску стерильных нейтрино в распаде изотопа бериллия-7. Измерение полной энергии, выделенной в этом распаде, позволит провести поиск стерильных нейтрино с массой до 850 кэВ. Проведен анализ имеющихся экспериментов, установлены основные проблемы и ограничения при измерении этого процесса. Определено, что наилучшим детектором для

таких измерений является криогенный микрокалориметр. Начата работа по разработке конкретных методов реализации нового эксперимента.

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

8.1. Эксперименты по поиску эффективной массы электронного нейтрино

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 36) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

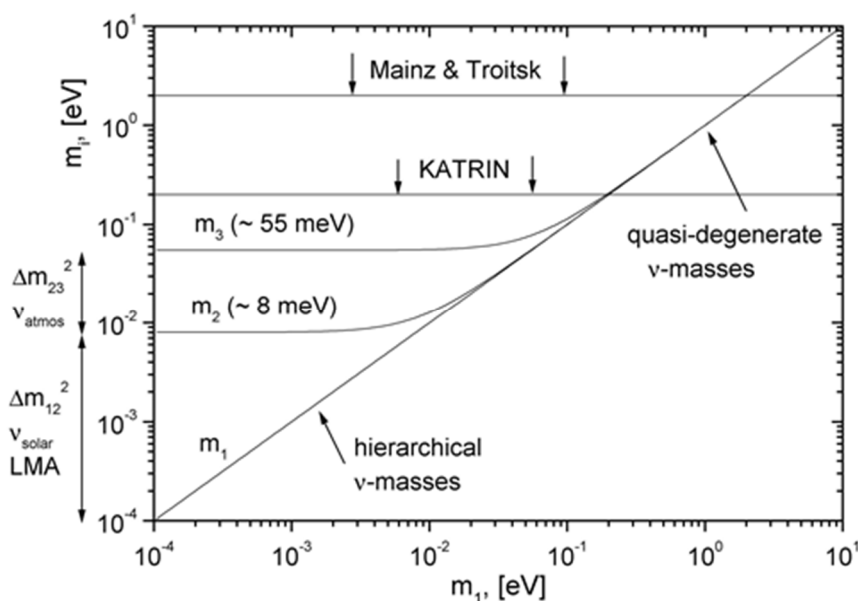


Рисунок 36 – Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия)

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

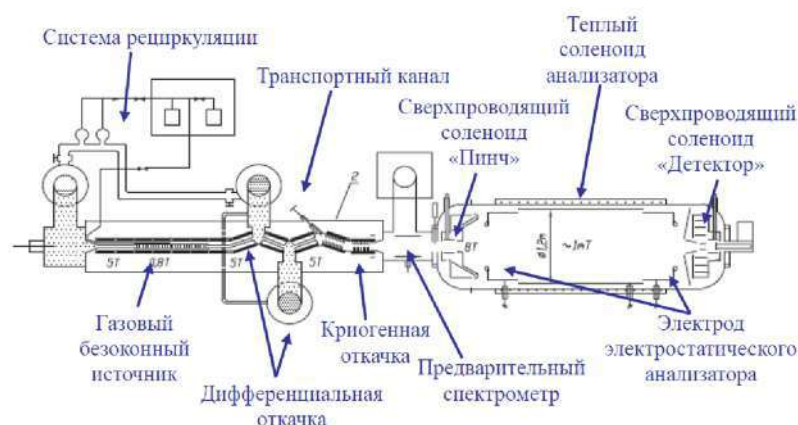


Рисунок 37 – Установка «Троицк ню-масс»

Альтернативный подход к измерению массы электронного нейтрино основан на применении болометрических детекторов для регистрации полного энергосодержания 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 [60]. Этот же процесс исследуется в эксперименте ECHo Collaboration [61].

Новый подход предложен в Project8 [62]. 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 на 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan.

Проект КАТРИН, являющийся продолжением экспериментов в Троицке и Майнце, первым улучшил существовавшее ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино. В ноябре 2019 коллектив КАТРИН опубликовал результаты первого сеанса набора физических данных (KNM1) продолжительностью четыре недели. Был получен новый, лучший в мире, предел на массу электронного антинейтрино $m_\nu < 1,1 \text{ эВ}/c^2$ (90% C.L.) [63]. В 2020 году проведены три новых сеанса измерений (KNM2, KNM3, KNM4). Результаты обработки сеанса KNM2 предполагается представить в начале 2021 года.

Следует упомянуть новую большую программу, предложенную для установки КАТРИН. Она состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно $1 \text{ эВ}/c^2$ до нескольких $\text{кэВ}/c^2$ [64].

В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трех состояний с определенной массой. Кроме того, есть основания предполагать существование дополнительных состояний, не участвующих во взаимодействиях в рамках Стандартной модели и называемых поэтому «стерильными». Эти состояния являются смесью массовых состояний отличных от входящих в состав активных нейтрино. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси стерильных состояний в активных нейтрино. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния, спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из этих трех состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады. Так, примесь четвертого массового состояния должна проявляться в изломе β -спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [65]. Установка КАТРИН предоставляет для поиска стерильных нейтрино прежде всего уникальный беззаконный источник газообразного трития активностью 100 ГБк (примерно 3 Ки). В тоже время, ее система регистрации электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена. При наборе данных в течение трех лет КАТРИН имеет возможность вести поиск вклада стерильных нейтрино с массой несколько кэВ на уровне, не исключенном существующими астрофизическим наблюдениями.

8.2. Проект КАТРИН

В основе установки КАТРИН лежит электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией, предложенный в 1983 году советскими физиками, членами - корреспондентами АН СССР, В.М.Лобашевым и П.Е. Спиваком [66]. Новый подход позволил сочетать высокое разрешение спектрометра и неограниченную площадь беззаконного газового источника молекулярного трития. На его основе, группой В.М. Лобашева, в ИИИ 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 [67]. До самого последнего времени этот результат был лучшим в мире.

В конце 1990-х группа В.М. Лобашева приступила к разработке проекта, получившего позднее название КАТРИН, и вошла в первоначальный состав участников, который был сформирован в 2001 году. Сейчас коллектив проекта КАТРИН,

базирующегося в Институт технологий Карлсруэ, Германия включает более 120 исследователей из 20 институтов 7 стран [68].

Структура установки КАТРИН повторяет схему «Троицк ню-масс» (см. рисунки 37 и 38).

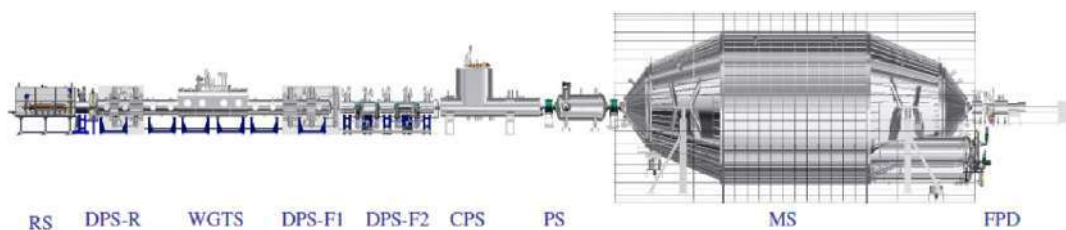


Рисунок 38 – Установка КАТРИН: RS-задняя стенка, DPS-R- задняя дифференциальная откачная станция, WGTS- безоконный газовый источник трития, DPSF-1- передняя откачная станция-1, DPSF-2 передняя откачная станция-2, CPS- криогенная откачная станция, PS- предварительный спектрометр, MS- основной спектрометр, FPD- основной детектор электронов

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк ню-масс», которая является прототипом установки КАТРИН [69].

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

Создание установки такого масштаба потребовало решения множества технических и даже логистических задач (см. рисунок 39).



Рисунок 39 – 25-е ноября 2006 года: корпус спектрометра КАТРИН доставляется в Технологический институт Карлсруэ

В 2018 году завершена подготовка установки к проведению исследований спектра трития в проектом режиме. Этому факту была посвящена связанная с первым напуском трития в систему «Инаугурация КАТРИН», состоявшаяся 11.06.2018 (см. рисунок 40).



Рисунок 40 – Запуск трития в установку КАТРИН. Участвуют известные ученые и организаторы науки, в том числе Нобелевские лауреаты 2015 года Артур Макдоналд и Такааки Кадзита. Россию представляет директор ОИЯИ, многолетний директор ИЯИ РАН, академик В.А.Матвеев

Первый тритий был запущен в систему 11.06.2018 на уровне 1% от номинальной величины. Далее количество трития в источнике постепенно увеличивалось, одновременно велась проверка надежности работы системы дифференциальной откачки с целью не допустить загрязнения спектрометра тритием. Проводились различные технологические и физические исследования: проверялась стабильность толщины источника, его

температуры, измерялась функция потерь энергии электронами при столкновениях с молекулами трития.

Весной 2019 года был проведен первый, четырехнедельный, цикл измерения массы нейтрино (KNM1). На рисунке 41 показан спектр электронов распада трития вблизи граничной точки, измеренный в первом сеансе КАТРИН. Вверху: абсолютные единицы; внизу: отклонения от теоретического спектра деленные на экспериментальные ошибки.

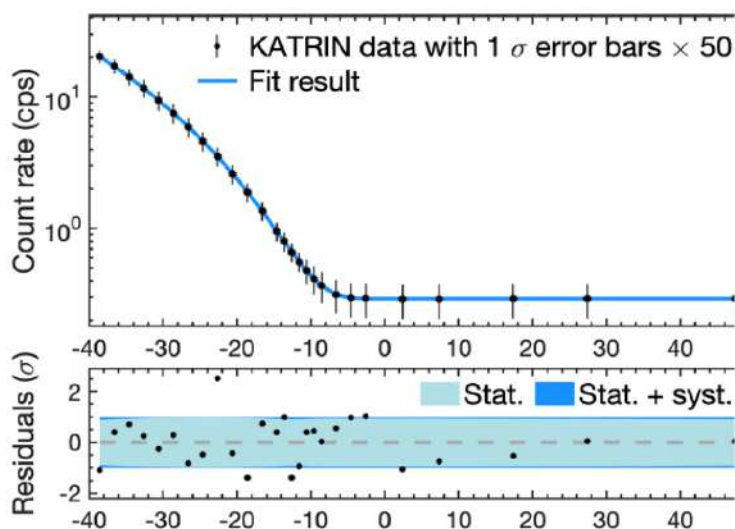


Рисунок 41 – Спектр электронов распада трития вблизи граничной точки, измеренный в первом сеансе КАТРИН

Несмотря на то, что содержание трития в источнике составляло только 25% от номинального, анализ данных позволил получить ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино $m_{\bar{\nu}} < 1,1 \text{ эВ}/c^2$ (90% C.L.), [63], что превосходит по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты. Была также проанализирована величина возможной примеси стерильного нейтрино в диапазоне масс $1 \text{ эВ}/c^2 < m_4 < 30 \text{ эВ}/c^2$ [70]. Полученные данные не противоречат результатам эксперимента «Нейтрино-4» [71].

В 2020 году проведены три новых сеанса измерений (KNM2, KNM3, KNM4). Результаты обработки сеанса KNM2 предполагается представить в начале 2021 года.

8.3. Работы по проекту КАТРИН сотрудников ИЯИ РАН

8.3.1. Калибровочные измерения для специальной конфигурации электромагнитных полей

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

возбуждённом состоянии (так называемые ридберговские состояния), а также фон детектора.

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 и порождают множество вторичных электронов при ионизации газа. Первичные электроны могут потерять большую часть кинетической энергии и вместе с вторичными ускориться в анализирующем поле спектрометра до энергии близкой к локальной величине электростатического потенциала. В детекторе при этом появляется «пачка» импульсов, по длительности близкая к времени торможения первичного электрона.

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, имитируя полезные события.

Плотность ридберговских атомов 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 эффективный объём. Однако, увеличение поля ухудшает энергетическое разрешение эксперимента, снижая чувствительность к массе нейтрино. Более того, увеличение магнитного поля приводит к увеличению систематической ошибки связанной с функцией пропускания спектрометра КАТРИН.

Как было продемонстрировано в ряде измерений фона в 2019 году, смещая поверхность с наибольшим потенциалом (анализирующую плоскость) в сторону детектора, можно также уменьшить объём спектрометра, который проецируется на детектор. В этом случае объём после анализирующей плоскости оказывается существенно меньше, а разрешение по энергии оказывается сопоставимым или даже лучшим, чем для немодифицированной конфигурации. Этот метод проиллюстрирован на рисунке 42, он получил название метода смещённой анализирующей плоскости (shifted analyzing plane - SAP). Изменение конфигурации полей производится с помощью специальных магнитов (см. рисунок 43) и электродов внутри спектрометра КАТРИН. Поля настраиваются таким образом, чтобы минимум магнитного поля совпадал в пространстве с минимальным

потенциалом (см. рисунок 44). Это гарантирует оптимальные условия для функции пропускания спектрометра и разрешения по энергии.

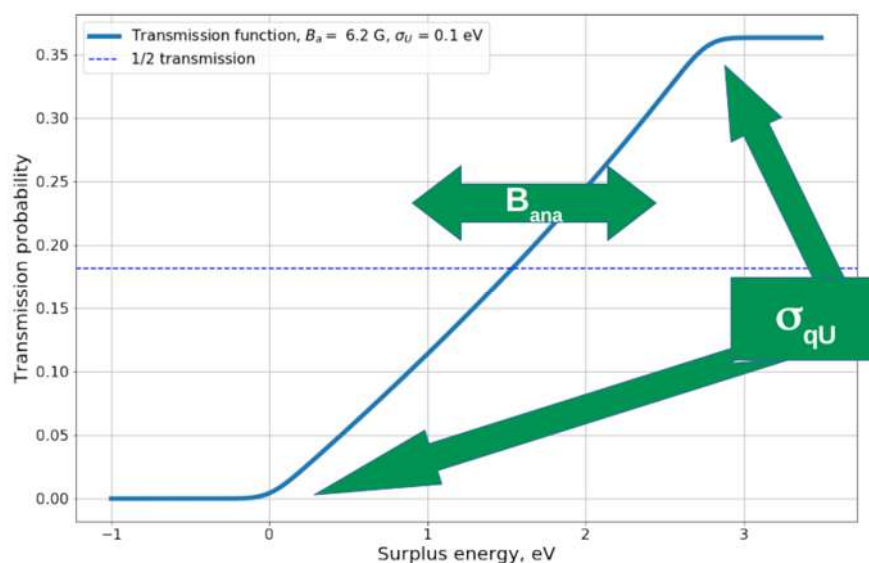


Рисунок 42 – Иллюстрация функции пропускания спектрометра для магнитного поля 6,2 Гаусс в анализирующей плоскости и уширения электрического потенциала нормальным распределением с $s = 0,1$ эВ

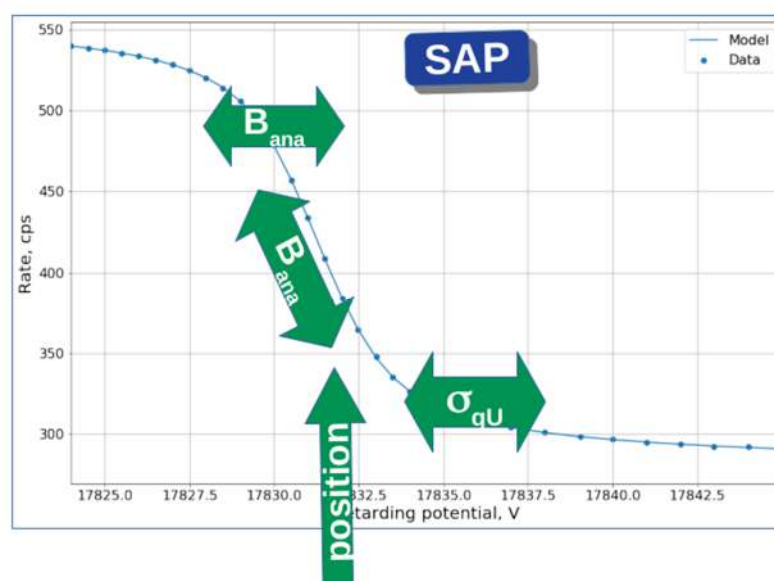


Рисунок 43 – Параметры функции пропускания спектрометра определяют форму спектра K-32 линии криптона-83м. Измерения интегрального спектра дают информацию об электромагнитных полях в анализирующей плоскости

В 2020 году были продолжены измерения со смещённой анализирующей плоскостью. Для использования такой конфигурации полей для измерения массы нейтрино (для сканирования спектра трития) необходимо продемонстрировать, что

электромагнитные поля в новой конфигурации, определяющие функцию пропускания спектрометра могут быть рассчитаны или измерены с достаточной точностью.

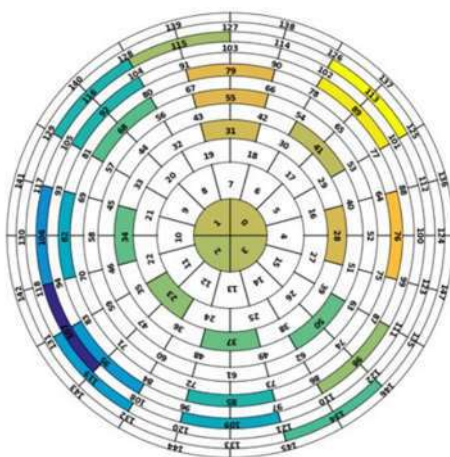


Рисунок 44 – Набор пикселей детектора КАТРИН, использованных для измерений полей с электронной пушкой

Одной из особенностей конфигурации SAP является изменение магнитного поля и электрического потенциала в анализирующей плоскости. Для симметричных конфигураций вариация электрического потенциала составляет 0,2-0,6 В от центра спектрометра до внешней части магнитного потока, в то время как для конфигурации SAP вариация достигает 3 В.

Для измерения электромагнитных полей в спектрометре были использованы два калибровочных источника электронов:

- Криптон-83м в газовом состоянии, генерирующий электроны с характерными энергиями 17,8 кэВ (линия K-32), 30,4 кэВ (линия L3-32) и дублет линий N2,3 с энергией около 32 кэВ. Такой источник электронов является изотропным и полностью аналогичен тритиевому источнику по функции пропускания спектрометра.
- Электронная пушка, генерирующая узконаправленный поток электронов с очень узким распределением по энергиям (характерная ширина $\sim 0,1$ эВ). Пушка позволяет устанавливать определенный угол между импульсом электронов и магнитным полем, что может быть использовано для измерения магнитного поля в спектрометре.

Измерения спектра K-32 линии ^{83m}Kr (средняя энергия электронов 17,8 кэВ) дают информацию о функции пропускания спектрометра, которая характеризуется тремя параметрами: магнитное поле в анализирующей плоскости B_{ana} , уширение (размазка) электрического потенциала (σ_{qU}) и среднее значение потенциала (U). На рисунке 42 показана функция пропускания спектрометра с типичными параметрами. На рисунке 43 представлен интегральный спектр K-32 линии, описываемый свёрткой функции

пропускания и дифференциального спектра линии криптона (распределение Лоренца с шириной $\Gamma = 2.7$ эВ). Схематически стрелками указаны части спектра, форма которых зависит от электромагнитных полей в анализирующей плоскости.

Измерения с электронной пушкой позволяют с большой точностью (~ 10 мэВ) определять эффективный потенциал для различных пикселей детектора КАТРИН. Задавая угол между импульсом электронов пушки и магнитным полем источника, можно также измерять величину магнитного поля в анализирующей плоскости. Однако, в отличие от измерений с криптоном-83м, характеристики функции пропускания могут быть определены только для отдельных пикселей детектора, в то время как газовый криптоновый источник даёт изотропное и равномерное распределение электронов. На рисунке 44. приведен пример пикселей детектора, для которых были проведены измерения с электронной пушкой. Набор пикселей был выбран достаточно равномерно по всей поверхности детектора (на которую проецируется анализирующая плоскость). Тем самым измеренные величины для магнитного поля и электрического потенциала могут быть экстраполированы на всю поверхность детектора и всю анализирующую плоскость.

Предварительные результаты калибровочных измерений полей в смещённой анализирующей плоскости показали, что точность в определении полей достаточна для использования этой конфигурации для измерения спектра бета-распада трития, с лучшей чувствительностью к массе нейтрино благодаря уменьшению числа фоновых электронов из объёма спектрометра в два раза.

Результаты представлены в докладах [72 - 74].

8.4. 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 [75].

Частично задача решается за счет секционирования детектора и организации независимой регистрации сигналов от каждой секции. Тем не менее, состоит задача обеспечить скорость счета $10^6 \dots 10^7$ в секунду для каждого единичного сектора.

Для установки «Троицк ню-масс» был выбран подходящий для работы в условиях сильного магнитного поля и высокого вакуума полупроводниковый детектор, на котором были набраны все экспериментальные данные [76].

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 как квадрат, а в случае интегрального спектрометра, как куб расстояния до граничной точки. Соответственно, использовавшийся детектор не соответствует требованиям к поиску стерильных нейтрино.

В настоящее время ведется поиск детекторов, позволяющих работать с существенно более высокими скоростями счета. Состояние разработок в Техническом университете Мюнхена можно найти в публикации [77].

Нами в качестве возможных кандидатов на роль нового детектора рассматривались отечественные разработки. На первом этапе исследовались экспериментальные образцы микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) без защитного покрытия, с очень тонким входным окном [78], разрабатываемые в ОИЯИ, Дубна. На втором – детекторы отраженных электронов (ДОЭ) разработки ФТИ им.Иоффе, С.-Петербург, которые представляют собой кремниевые фотодиоды с мелкозалегающим p-n-переходом [79, 80].

В обоих случаях была продемонстрирована возможность регистрировать одиночные электроны при длительности сигнала порядка 10 нс. Следует отметить, что новые детекторы работают при комнатной температуре. Более подробное описание выполненных работ содержится в статье [81].

Результаты первых измерений показали возможность использования рассматриваемых детекторов, но для того чтобы предложить их в качестве рабочего детектора, необходимы более детальные исследования:

- стабильность амплитуды сигнала при изменении загрузки,
- влияние поглощенной дозы на параметры сигнала,
- влияние нагрева/охлаждения детектора, в том числе необходимость температурной стабилизации,
- долговременная стабильность параметров детекторов и т.д.

Работа в КИТ в 2020 г. оказалась невозможной из-за карантинных ограничений. В целом, работа в режиме ограниченных по времени командировок, является малопродуктивной для исследования свойств новых детекторов. Поэтому, была поставлена задача создать в ИЯИ РАН копию стенда, установленного в КИТ.

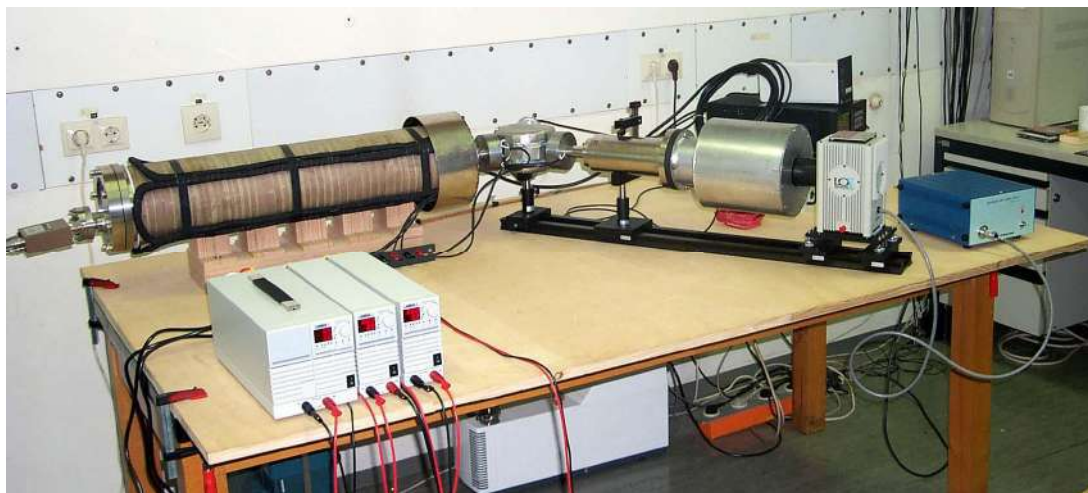


Рисунок 45 – «Russian electron gun», установленная в Технологическом институте Карлсруэ

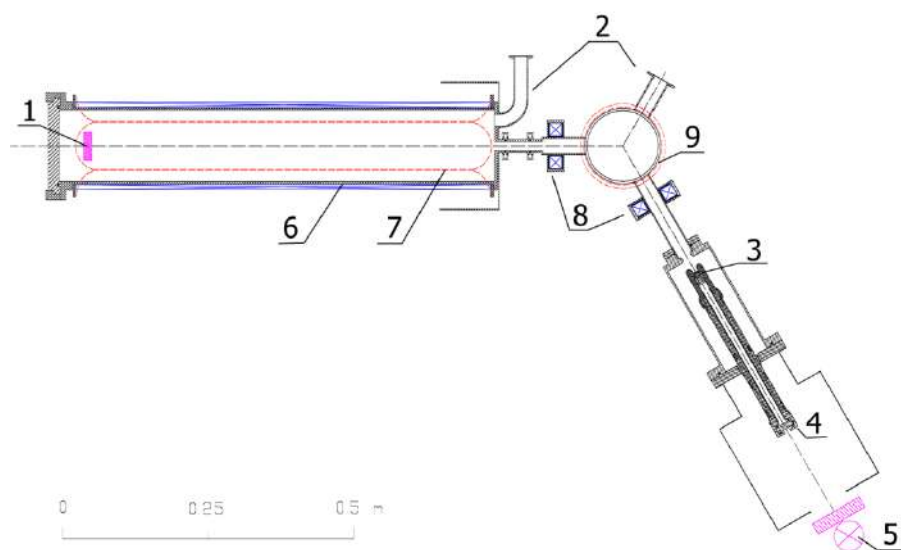


Рисунок 46 – Схема стенда для исследования детекторов.

1 – место расположения детектора, 2 – патрубки для откачки, 3 – наконечник фотопушки, 4 – кварцевое окно, 5 – УФ-лампа с фильтром в защитном кожухе (схематично), 6 – транспортный соленоид, 7 – отклоняющие магниты для сканирования площади детектора, 8 – фокусирующие магниты, 9 – поворотный магнит

Список докладов

1. А.В.Лохов Семинар «Прямые измерения массы нейтрино», Тренто, Италия – устный доклад на тему: «Backgrounds at KATRIN experiment» Февраль 2020
2. А.В.Лохов Международная конференция по физике высоких энергий (ICHEP 2020), Прага, Чехия (онлайн) – устный доклад на тему: «KATRIN experiment: first results and future prospects» – круглый стол: «Свойства нейтрино» Июль 2020
3. А.В.Лохов Совещание по стратегии немецкого астрофизического общества (онлайн) – пленарный доклад на тему: «Highlights: KATRIN experiment» Декабрь 2020
4. К.В.Зубрилин Конференция «Физика элементарных частиц и космология», Москва, 23-24 ноября 2020 Построение доверительных интервалов применительно к анализу экспериментальных данных по поиску массы нейтрино в бета-распаде трития (постер).

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

9.1. Поиск 2К-захвата в Хе-124

В 2020 г. проводился финальный анализ экспериментальных данных набранных за период с 2014 по конец 2019 г. Для определения влияния нейтронной компоненты фона лаборатории, было произведено Монте-Карло моделирование с помощью пакета «2K-CAPTURE», основанного на Geant4. Нейтроны, которые не были остановлены низкофоновой защитой и дошли до счетчика, могут термализоваться в рабочем объеме детектора и быть захвачены ядром Хе-124, с образованием радиоактивного короткоживущего изотопа Хе-125. Распадаясь данный изотоп рождает изотоп I-125 с $T_{1/2}=59,4$ дней. Энерговыведение от распадов I-125 имеет те же величины, что и ожидаемое от 2К-захвата в Хе-124 и, соответственно, может попасть в область интересов – $63,6\pm 3,7$ кэВ. Моделирование показало, что за один год измерений в рабочей области детектора могут термализоваться $\sim 2,5$ нейтронов, что с учетом количества атомов Хе-124 и сечения захвата тепловых нейтронов этими ядрами, будет давать нам 0,02 атома I-125. Т.е. за все время измерений, в рабочем объеме, у нас будет образовано 1-2 атома I-125.

Так же были проведены долговременные измерения с калибровочным источником Cd-109. Эти измерения позволили разработать новый метод анализа формы импульса пропорционального счетчика большого объема. Оптимизированный анализ формы импульса тока от электронного облака первичной ионизации в счетчике позволил улучшить разрешение детектора и энергетическую калибровку. В результате эффективность выбора полезных событий увеличилась на 25%.

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

В 2020 г. началась первая фаза эксперимента AMoRE – AMoRE-I. Для AMoRE-I используется тоже самый криостат растворения, который использовался на отладочном этапе AMoRE-pilot. По сравнению с AMoRE-pilot, в AMoRE-I увеличена на 5 см толщина свинца в пассивной защите, так же увеличено число счетчиков в мюонном вето. Число сцинтилляционных кристаллов, по сравнению с AMoRE-pilot, доведено до 18 штук: 13 кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и 5 кристаллов $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Общая масса кристаллов составляет более 6 кг. Экспериментальная установка расположена в подземной лаборатории Янг-Янг. Глубина лаборатории составляет 250 м.в.э., поток мюонов в подземной камере равен $\sim 4 \cdot 10^{-3}/\text{м}^2/\text{с}$.

До конца 2020 г. измерения проводятся в тестовом режиме, для отладки программного обеспечения и проверки работы электроники. Разрабатывается алгоритм программного триггера сигналов на основе фильтров Баттерворта. Данный триггер нужен для уменьшения количества сохраняемых данных. Т.к. изначально, на стадии АМоRE-pilot,- сигналы с кристаллов записывались в виде непрерывного буфера по 30 минут. Это было сделано для уменьшения вероятности потери полезных сигналов, особенно с малыми амплитудами, из-за сильных вибрационных шумов от крионасоса, которые накладываются на рабочие сигналы, тем самым ухудшая возможность их выделения. Но, такой способ записи данных требует наличие большого количества дискового пространства, например, для АМоRE-I потребуется 170 ТБ в год. Использование же программного триггера позволит снизить требуемое дисковое пространство до 17 ТБ в год.

Планируется, что набор данных в фазе АМоRE-I продлится не менее трех. В дальнейшем кристаллы, используемые на этапе АМоRE-I, будут установлены в новом криостате второй фазе эксперимента – АМоRE – II, где общая масса кристаллов будет доведена до 200 кг.

Во время длительного режима набора данных АМоRE-I будет обеспечен непрерывный мониторинг работы установки. Будут проводиться онлайн и офлайн дежурства. В группу онлайн дежурных включено 6 сотрудников (членов коллаборации АМоRE) лаборатории низкофоновых исследований БНО.

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

10.1. Эксперименты GERDA и LEGEND

В рамках эксперимента GERDA была произведена обработка данных, получен результат, подготовлена и послана в печать статья об окончательном результате GERDA. Статья была опубликована в журнале Physical Review Letters [82]. Подготовлен пресс-релиз по этой публикации. Ниже приведён текст этого прес-релиза. В рамках этой работы учёные из ИЯИ РАН и КИ дистанционно участвовали в рабочих совещаниях эксперимента GERDA.

Пресс-релиз

Окончательные результаты эксперимента GERDA

Еще одна веха в поисках безнейтринного двойного бета-распада

Эксперимент GERDA (Germanium Detector Array) в лаборатории Nazionali del Gran Sasso (LNGS) INFN, Италия, сообщил о своих окончательных результатах поиска безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) ^{76}Ge в недавнем выпуске журнала Physical Review Letters [82]. Распад не был обнаружен, но все цели заключительной фазы эксперимента были достигнуты.

Сообщенный нижний предел для периода полураспада $0\nu\beta\beta$ составил 1.8×10^{26} лет и совпадает с ожидаемым значением чувствительности эксперимента. Более строгое ограничение для $0\nu\beta\beta$ любого изотопа никогда ранее не было получено. Также, сообщенная скорость счёта фоновых событий 5.2×10^{-4} отсчета/(кг·год·кэВ) в области сигнала не имеют себе равных в низкофоновой физике. Это демонстрирует не только возможность проведения эксперимента без фона при длительной экспозиции, но и обеспечивает основу для эксперимента следующего поколения со значительно более высокой чувствительностью.

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

Чуть более 50 лет назад нарушение лептонного числа уже было проблемой первого поиска распада $0\nu\beta\beta$ с помощью германиевого детектора весом 0,1 кг, выбранного группой

Милана из-за его выдающегося внутреннего энергетического разрешения [83]. С тех пор чувствительность увеличилась в миллион раз. Существенным для этого было непрерывное увеличение массы детектора, который одновременно является источником распада, сопровождающееся непрерывным уменьшением фона в области сигнала: в частности, путем проведения экспериментов глубоко под землей, что уменьшает фон от космических лучей, и путем увеличения доли изотопа ^{76}Ge с 7,8% в детекторах из природного Ge путем обогащения Ge почти до 90%. Эксперимент GERDA проводится с 2011 года в Национальной лаборатории дель Гран Сассо Национального Института Ядерной Физики Италии на глубине в 3500 м водного эквивалента. На заключительном этапе GERDA развернула 41 германиевый детектор общей массой 44,2 кг и обогащением ^{76}Ge 86-88%. Новаторские особенности являются ключом к прогрессу: в отличие от предыдущих германиевых экспериментов, детекторы Ge работают без капсулы в криостате сверхчистого жидкого аргона (LAr), погруженном в резервуар для воды в качестве защиты от фотонов, нейтронов и мюонов. LAr обеспечивает как охлаждение, так и экранирование. Кроме того, он помогает уменьшить количество монтажных материалов, которые, несмотря на тщательную экранировку, всегда обнаруживают крошечный остаток радиоактивных загрязнений. Для активного экранирования LAr оснащен световыми детекторами, которые могут указывать, возникает ли сигнал в германиевых детекторах из-за радиоактивного фона. Аналогичную информацию можно получить из временного профиля сигналов германиевых детектора. Содружество GERDA развернуло детекторы нового дизайна и разработало новые инструменты анализа, чтобы в полной мере использовать эту технику подавления фона.

Опыт эксперимента GERDA привел к ожиданию того, что дальнейшее снижение фона может быть достигнуто, так что станет возможным эксперимент без фона с еще большей силой источника и экспозиции. Содружество LEGEND [84] направлено на повышение чувствительности к периоду полураспада $0\nu\beta\beta$ -распада до 10^{28} лет. На первом этапе оно развернет обогащенные германиевые детекторы общей массы 200 кг в слегка модифицированной инфраструктуре GERDA с началом сбора данных в 2021 году.

Международный эксперимент GERDA выполнял большой коллектив учёных из институтов стран Европейского Сотрудничества, России и Объединённого института ядерных исследований. От России участвовали учёные из Института ядерных исследований РАН и Курчатовского Института. Для выполнения эксперимента по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада следующего поколения LEGEND сотрудничество расширилось, в частности с его состав вошли учёные из США.

10.2. Эксперимент Double Chooz

10.2.1. Измерение угла смешивания нейтрино методом RRM

Атомная электростанция Chooz B во Франции, где выполняется эксперимент Double Chooz состоит из двух ядерных реакторов. За время топливной кампании реакторы атомной станции никогда не работают на одной мощности. Время от времени они работают на пониженной мощности или один из реакторов останавливается. На рисунке 47. показана скорость счета каждого из детекторов Double Chooz в зависимости от времени, видны моменты работы реакторов на пониженной мощности или остановки одного из реакторов.

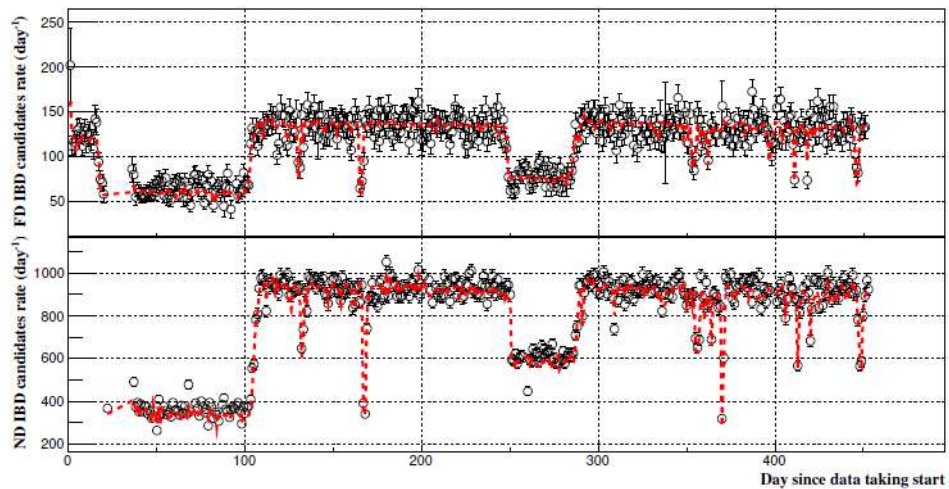


Рисунок 47 – Скорость счета дальнего детектора (верхняя панель) и ближнего детектора (нижняя панель) за время совместной работы. При одном отключенном реакторе суммарная скорость счета около 400 событий в сутки, а при другом отключенном реакторе около 600 событий в сутки для ближнего детектора. Для дальнего детектора эта разность менее выражена

На рисунке 48 показаны результаты анализа методом RRM. В результате анализа получено новое значение амплитуды осцилляций, совпадающее в пределах ошибок с результатом стандартного анализа: $\sin^2 2\theta_{13} = 0,095$.

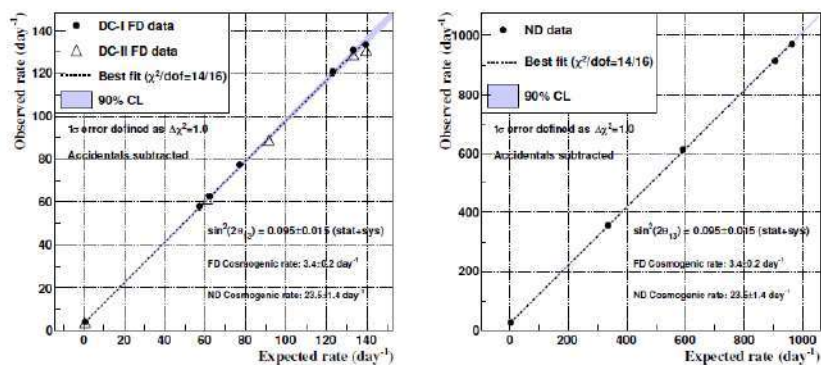


Рисунок 48 – Результаты подгонки данных, полученных на разной мощности реакторов с учетом осцилляций. Слева данные дальнего детектора, справа – ближнего

10.2.2. Поиск стерильных нейтрино

По возможному искажению спектра в пределах статистики был сделан анализ на существование стерильных нейтрино. На рисунке 49 приведены ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние. Значение параметров при минимальном значении χ^2 $\sin^2 2\theta_{14} = 0,043 \pm 0,015$ и $\Delta m^2_{14} = 0,028 \text{ эВ}^2$.

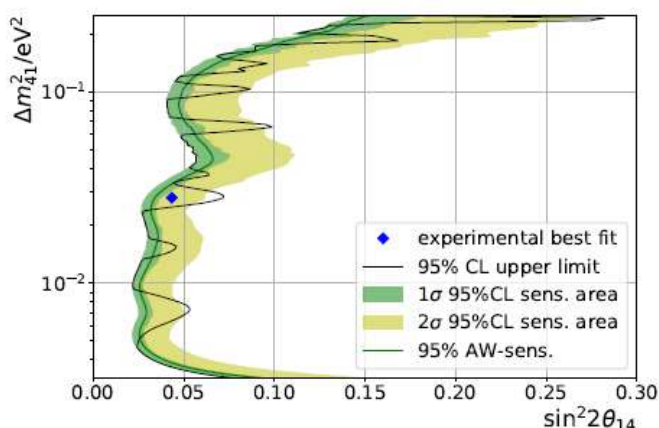


Рисунок 49 – Верхний предел на параметры осцилляций при 95% доверительной вероятности (черная линия). Цветные области соответствуют 1 σ (зеленая область) и 2 σ (болотная область) параметров относительно медианного значения

10.2.3. Измерение спектра долгоживущих осколков во время остановки реактора

Во время остановки обоих реакторов атомной станции измеряется не только фон коррелированных событий, но и остаточное антинейтринное излучение из реакторов, исходящее от долгоживущих осколков с периодами полураспада более одного дня. До сих пор не удавалось зарегистрировать это излучение из-за достаточно большого фона в предыдущих экспериментах. В Double Chooz фон коррелированных событий, связанный с

быстрыми нейтронами, космогенными изотопами (${}^9\text{Li}$) и случайными совпадениями оказался очень низок, менее 3% от полного эффекта от реакторов. Это позволило увидеть запаздывающее антинейтринное излучение от долгоживущих осколков (${}^{90}\text{Sr}$ - ${}^{90}\text{Y}$, ${}^{106}\text{Ru}$ - ${}^{106}\text{Rh}$, ${}^{144}\text{Ce}$ - ${}^{144}\text{Pr}$).

На рисунке 50 показаны спектры нейтринных событий в ближнем и дальнем детекторах после вычитания всех фонов за время остановки двух реакторов на 20 дней. Для обоих детекторов наблюдается избыточная скорость счета в диапазоне от 1 до 3 МэВ наблюдаемой энергии, что соответствует спектрам от изотопов ${}^{90}\text{Y}$, ${}^{106}\text{Rh}$ и ${}^{144}\text{Pr}$, которые являются дочерними для долгоживущих ${}^{90}\text{Sr}$, ${}^{106}\text{Ru}$ и ${}^{144}\text{Pr}$ соответственно.

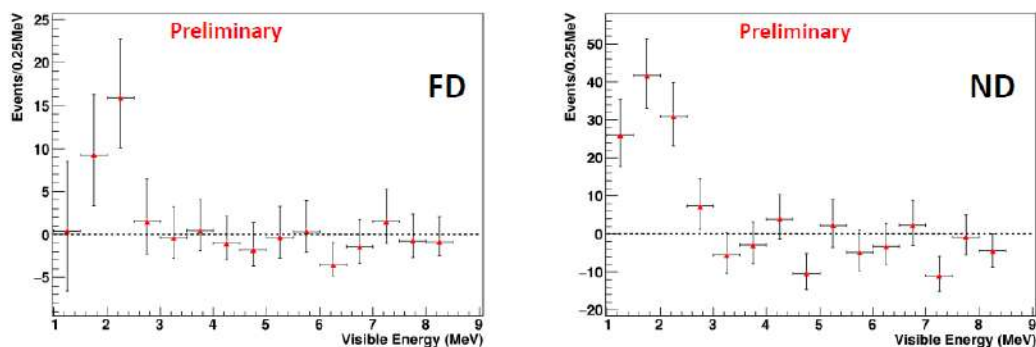


Рисунок 50 – Спектры событий в дальнем (левая панель) и ближнем (правая панель) детекторах Double Chooz после вычитания всех фонов

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

11.1. Измерение сезонных вариаций нейтронов от мюонов, измеренных на LVD

11.1.1. Описание эксперимента и метод регистрации мюонов разных направлений

Детектор LVD в полной своей конфигурации (3 башни размером $10 \times 6 \times 12 \text{ м}^3$ каждая) работает с 2001 года в подземной Лаборатории Гран-Сассо, Италия [85]. Средняя толщина грунта над установкой 3650 м в.э., интенсивность регистрируемых мюонов $3,35 \pm 0,0005(\text{стат}) \pm 0,03(\text{сис}) \times 10^{-4} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ [86], средняя энергия $\langle E \rangle^t \sim 280 \text{ ГэВ}$. Основной элемент детектора – $1,5 \text{ м}^3$ сцинтилляционный счетчик. Счетчики сгруппированы в башни по 280 штук: 5 колонн, 7 уровней.

Сезонные вариации потока мюонов со средней энергией 280 ГэВ были изучены в период с 1992 по 2018 гг., определены амплитуда и фаза вариаций интенсивности мюонов и установлена их связь с изменением эффективной температуры в верхних слоях атмосферы.

Модульная структура детектора позволяет выделять мюоны вертикального и горизонтального направлений, используя расположение счетчиков. При установлении характеристик потока горизонтальных и вертикальных мюонов использовался мюонный годоскоп из двух счетчиков или метод “равного аксептанса”, который заключается в отборе мюонов парами счетчиков. Для мюонов околоразнонального направления ($65\text{--}90^\circ$) средняя глубина грунта составляла $\langle N \rangle^h \sim 5 \text{ км в.э.}$, средняя энергия мюонов $\langle E \rangle^h \sim 340 \text{ ГэВ}$. Для околоразнональных мюонов ($0\text{--}30^\circ$) – $\langle N \rangle^v \sim 3,3 \text{ км в.э.}$, $\langle E \rangle^v \sim 260 \text{ ГэВ}$.

Характеристики сезонных вариаций потоков мюонов разных направлений получены по данным установки LVD в период с 2004 по 2018 гг. Методом независимых элементарных годоскопов выделены $1,9 \times 10^6$ околоразнональных и 8×10^6 околоразнональных мюонов и установлены амплитуда и фаза их сезонных вариаций. Измерено, что вариация потоков горизонтальных и вертикальных мюонов составляет $1,7 \pm 0,3\%$ и $1,0 \pm 0,2\%$, соответственно [87]. Проведенные исследования относятся к мюонам высокой энергии: пороговая энергия (50% вероятности выживания) мюонов на уровне моря для вертикальных мюонов $E_\mu^{\text{th}} \approx 1,8 \text{ ТэВ}$, для горизонтальных $E_\mu^{\text{th}} \approx 4,7 \text{ ТэВ}$.

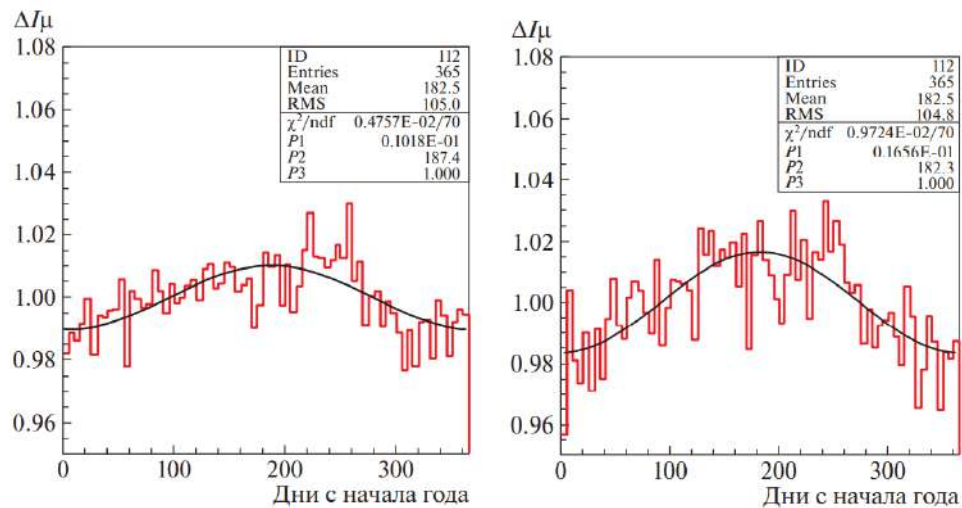


Рисунок 51 – Слева - Вариации темпа счета вертикальных мюонов, метод наложения эпох. Справа - Вариации темпа счета горизонтальных мюонов, метод наложения эпох. Бин — 5 сут. Кривые — аппроксимация $f(t)=1+ P1 \cos(2\pi(t - P2)/365)$

11.1.2. Определение временных характеристик нейтронов

Процессы, приводящие к образованию нейтронов мюонами, достаточно хорошо исследованы. В основном, это развитие в веществе адронных и электромагнитных ливней, инициируемых мюонами высокой энергии. Вследствие высокой энергии (до ~ 1 ГэВ) нейтроны обладают большими пробегами, а соответственное увеличение толщины защиты экспериментов приводит к возрастанию вероятности образования в ней нейтронов.

Для учета фона в подземных экспериментах по поиску редких событий и его минимизации необходимо знать характеристики потока нейтронов: величину удельного числа нейтронов от мюонов (выхода) в зависимости от вещества и энергии мюонов, энергетический спектр, пространственное распределение нейтронов и временную зависимость их потока.

За 18 лет работы детектора было определено число нейтронов, рожденных мюонами (удельное число нейтронов) в летние и зимние месяцы. Для измерений удельного числа нейтронов использовались временные распределения нейтроноподобных импульсов с энергосъемлением от 1 до 12 МэВ во временном интервале 50–550 мкс после мюонного триггера. «Разностный метод» анализа заключался в определении удельного числа нейтронов за $18 \times 3 = 54$ летних (июнь, июль, август) и 54 зимних (декабрь, январь, февраль) месяцев. Временные распределения аппроксимировались законом $N_n(t) = N_0 \times \exp(-t/\tau) + B$, где $\tau=170$ мкс – экспонента захвата термализованного нейтрона в сцинтилляторе, B – константа, зависящая от фоновых условий счетчика, $N_0 \times \tau$ – полное число нейтронов.

Для полного потока мюонов разностным методом (рисунок 52) получено, что удельное число нейтронов в летние месяцы составляет $N_n/N_{tr}(s)^t = 5,98 \times 10^{-3}$, зимой – $N_n/N_{tr}(w)^t = 5,12 \times 10^{-3}$. Амплитуда вариаций составила: $(\delta N_n/N_n)^t = 7,7 \pm 0,2(\text{стат}) \pm 1,6(\text{сис})$. Методом «наложения эпох» – аппроксимацией данных функцией $f(t) = 1 + (\delta N_n/N_n) \times \cos[2\pi(t-\phi)/T]$, была получена амплитуда $(\delta N_n/N_n) = 7,7 \pm 0,8 \%$ и фаза $\phi^t \sim 7,0 \pm 0,4(\text{стат}) \pm 0,5(\text{сис})$, которая соответствует июлю месяцу.

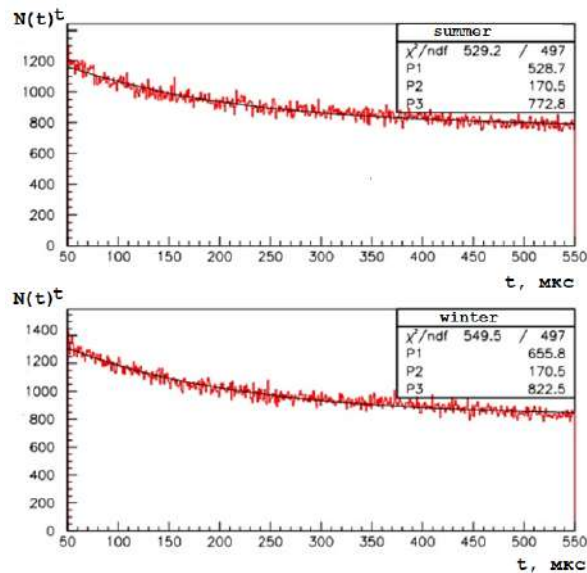


Рисунок 52 – Временные распределения гамма-квантов от захватов нейтронов в веществе детектора для полного потока мюонов в летнее (верхняя панель) и зимнее (нижняя панель)

Мы применили разностный метод для определения удельного числа нейтронов для мюонов горизонтального направления. Для отобранных около-горизонтальных мюонов за 15 лет статистики было получено, что удельное число нейтронов в расчете на счетчик составляет летом $N_n/N_{tr}(s)^h = 5780/319450 = 0,0181$, зимой - $N_n/N_{tr}(w)^h = 4080/307294 = 0,0133$. На рисунке 53 приведены временные распределения нейтронов для летних и зимних месяцев наблюдений. Для аппроксимации выбирался временной интервал 150–650 мкс, т.к. исключались импульсы, на которые действовал эффект засветки от большого триггерного импульса. Получено, что величина вариаций удельного числа нейтронов для горизонтальных мюонов составляет $(\delta N_n/N_n)^h = 15 \pm 3 \%$.

Амплитуды вариаций, определяемые разностным методом, в отличие от метода наложения эпох, являются усреднёнными по трем месяцам. Отличие получаемых амплитуд не превышает погрешностей их определения. Используемые методы исключают вариации фона, которые также имеют сезонный характер с относительной амплитудой $\sim 4 \%$ и фазой в начале августа $\phi_r = 8,1 \pm 0,4$ мес [88].

Полученная величина $(\delta N_n/N_n)^h = 15 \pm 3 \%$ примерно в 2 раза больше, чем вариация удельного числа нейтронов для полного потока мюонов. Эта величина носит оценочный характер, требует увеличения статистики и исследования систематических ошибок.

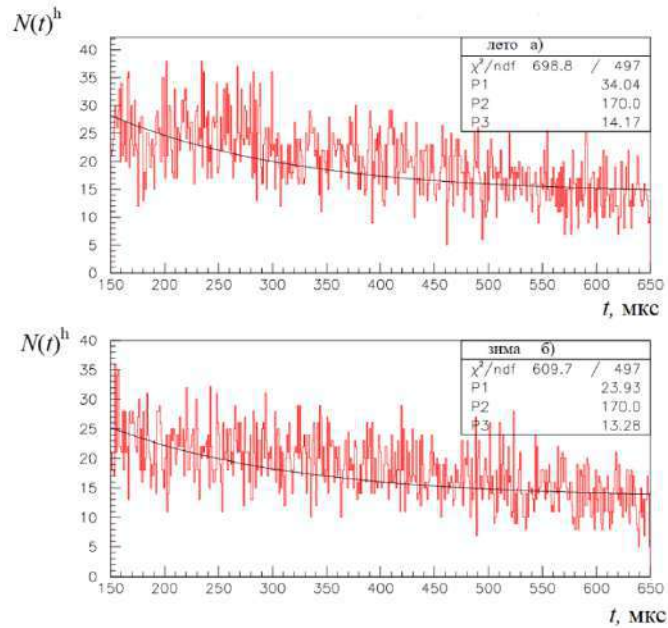


Рисунок 53 – Временные распределения гамма-квантов от захватов нейтронов в веществе детектора для горизонтального потока мюонов в летнее (верхняя панель) и зимнее (нижняя панель) время. Кривая – аппроксимация данных законом $f(t) = P1 \times \exp \exp \left(-\frac{t}{P2} \right) + P3$

Первые публикации результатов эксперимента DAMA (эксперимент в Лаборатории Гран Сассо) [89] дали начало интенсивному обсуждению связи годовых вариаций темпа счета событий, наблюдаемых в экспериментах по поиску частиц темной материи, с сезонными вариациями потока мюонов под землей. Вариации интенсивности мюонов на больших глубинах рассматриваются как возможный источник годовых модуляций числа событий в низкофоновых подземных детекторах. Предполагается, что в этих модуляциях существенную роль играют космогенные нейтроны, поток которых ставится в прямую зависимость от вариаций потока мюонов.

Вариации числа нейтронов, генерированных мюонами, превышают вариации интенсивности мюонов более чем в 5 раз. Принимая во внимание, что поперечное распределение нейтронов на расстоянии больше 2 м от мюонного трека описывается зависимостью $R^{-2,3}$ [90], количественные оценки влияния нейтронного фона на измерения редких событий необходимо уточнять в расчетах для подземных экспериментов.

11.2. Измерение низко-энергетического фона детектора LVD

11.2.1. Метод регистрации фоновых импульсов

Радиоактивный газ радон, всегда присутствующий в грунте, является одним из основных источников фона установки LVD. Фоновый темп счёта детектора LVD измеряется автоматически в течение 10 сек. через каждые 10 мин. В структуру установки помещен альфа-частичный радонометр, который проводит точечные замеры концентрации радона. Сравнение данных помогло понять, что быстро изменяющаяся компонента фона детектора LVD связана с радоном. На концентрацию радона в подземном экспериментальном зале влияют давление, влажность, температура, вибрация грунта, работа вентиляции. Детектор LVD, находящийся в подземной лаборатории под толщей грунта 3650 м в.э., состоит из 840 полуторакубовых сцинтилляционных счетчиков, сгруппированных в 3 башни. Для разных научных задач в детекторе имеется два энергетических порога: верхний $E_{\text{НЕТ}} = 4$ МэВ, и нижний $E_{\text{ЛЕТ}} = 0,5$ МэВ. Данные низкоэнергетического порога используются для исследования фона эксперимента и контроля работы счетчиков.

Основным источником фона по низкому порогу на установке LVD является радон. Радон – радиоактивный газ, который образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов. Радон выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе. Радон хорошо растворяется в воде и переносится подземными водами.

Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона, период полураспада которого 3,8 дня. Гамма-излучение создаётся, в основном, ядрами висмута, за счёт β -распада превращающимися в полоний с характерным временем 19,7 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0,6 до 2,5 МэВ.

Данные детектора, используемые для исследования фона ($E_{\text{ЛЕТ}}$), формируются следующим образом: каждые 10 минут все сцинтилляционные счётчики башни запускаются импульсом от генератора на регистрацию $E_{\text{ЛЕТ}}$ импульсов в течение 10 секунд.

При обработке данных отбираются наиболее стабильно работающие в течение длительного времени внутренние счетчики одной башни. Число включаемых в обработку счетчиков варьируется от 60 до 76. Данные суммируются за 1 час. Суммарный темп счета нормируется на один счетчик в герцах. Общее число отсчетов в одном бине ~ 184000 (~ 420 отсчетов за $10 \text{ сек} \times 73 \text{ счетчика} \times 6 \text{ запусков в час}$), что дает относительную ошибку измерений $\sim 0,2 \%$.

11.2.2. Измерения температуры, влажности и давления

Изменения температуры, влажности и давления в низкофоновых помещениях, предназначенных для поиска редких событий, являются важной частью наблюдений фоновых условий экспериментов. С помощью термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д (ТГ) были проведены две серии измерений температуры (Т), влажности (Н) и давления (Р) в Лабораторном подземном зале (рисунок 54). В измерениях I-серии с мая 2019 г по октябрь 2019 термогигрометр находился в центре детектора (счетчик номер N2456). Во время II-серии с ноября 2019 по март 2020 г. ТГ был помещен в угол детектора LVD (N3512) на 1 уровне, близко к воротам из зала.

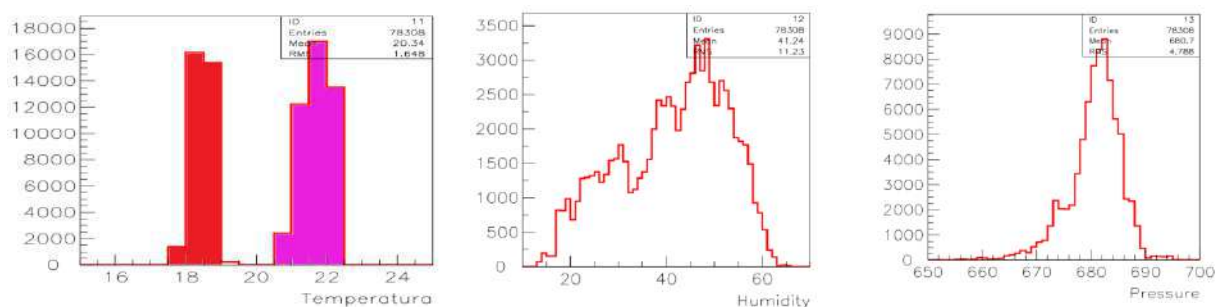


Рисунок 54 – Слева: измерение температуры в зале (I-серия -красный цвет, II-серия – розовый цвет); центр: распределение влажности в экспериментальном зале ($\langle H \rangle = 41 \pm 11$ %); справа: распределение давления в экспериментальном зале ($\langle P \rangle = 680 \pm 5$ мм рт.с.)

Измерения показали, что средняя температура в центре детектора $\langle T \rangle = 20,0 \pm 0,1$ sys °C. Систематическая ошибка – точность измерения. Суточное изменение температуры (метод наложения эпох) составляет не более 0,1%. На нижнем уровне детектора (L=1) температура, как и следовало ожидать, меньше ($18,4 \pm 0,5$ °C), чем средняя температура на верхнем уровне (L=7) – $22,3 \pm 0,3$ °C. Положение башен в зале относительно выхода вентиляции отражает разброс значений температуры на разных башнях ($\pm 0,5$ °C относительно центральной 2-ой башни).

Сезонная вариация средней температуры в установке составляет $\delta T/T = 6\%$. Эта величина получена при аппроксимации данных функцией вида $f(t) = \langle T \rangle + \delta T \times \cos(2\pi(t - t_0)/12)$, где фаза – максимум в распределении $t_0 = 6,8$ мес. Величина сезонных вариации температуры одинакова для обеих серий измерений (рисунок 55).

Влажность в помещении обратно пропорциональна температуре: $(H - \langle H \rangle) / \langle H \rangle = -0,023 - 0,96 \times (T - \langle T \rangle) / \langle T \rangle$. Измерения зависимости влажности от температуры на разных уровнях были проведены в январе 2020 года (таблица , рисунок 56).

Среднегодовая влажность в центре детектора ($41,0 \pm 0,1$ сис) %. Средняя влажность на нижнем уровне детектора $H(L=1) = 35\%$, на верхнем уровне - $H(L=7) = 44\%$. Сезонная

вариация средней влажности $\delta H/H=17\%$ ($\delta H=7,5\%$), фаза – максимум в распределении – 7,8 мес. Вариации влажности в течение дня (суточные) зависят, скорее всего, от действий персонала Лаборатории (открывание ворот в зале для прохода тяжелой техники, обслуживающей эксперименты).

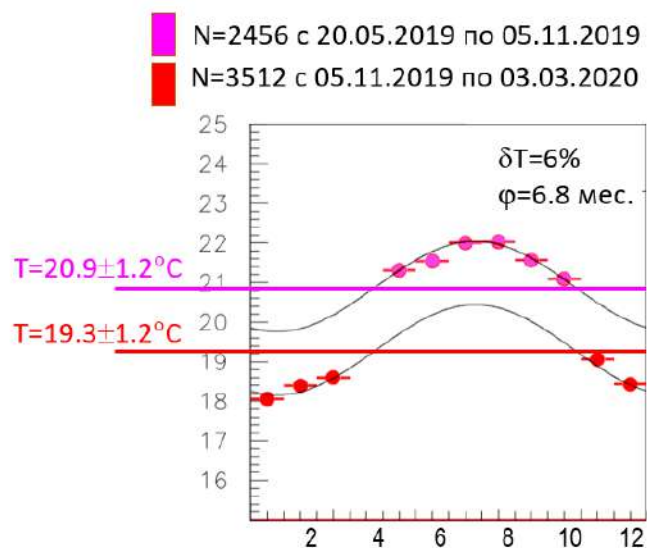


Рисунок 55 – Измерение температуры (I-серия – красный цвет, II-серия – розовый цвет)

Таблица 2 – Измерения Т и Н.

Уровень	Т, °C	Н, %
L=1	18.5	71
L=3	20.5	65
L=5	21.9	61
L=7	22.2	60

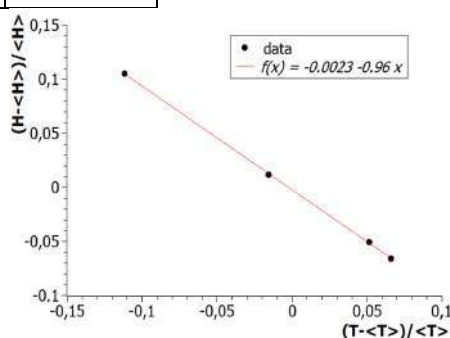


Рисунок 56 – Зависимость влажности от температуры. Точки – измерение, прямая – фит: $(H - \langle H \rangle) / \langle H \rangle = -0,023 - 0,96 \times (T - \langle T \rangle) / \langle T \rangle$

В зале детектора среднее давление за месяц постоянно и равно $(680 \pm 1 \text{ сис})$ мм рт.ст. В течении года среднее давление меняется на 5 мм рт.ст. Абсолютное давление меняется

± 10 мм рт.ст. в течении месяца (недели), и связано с внешним атмосферным давлением. В данных по температуре и давлению мы не обнаружили изменений в зависимости этих параметров от притока нового воздуха, то есть открывания ворот в экспериментальном зале.

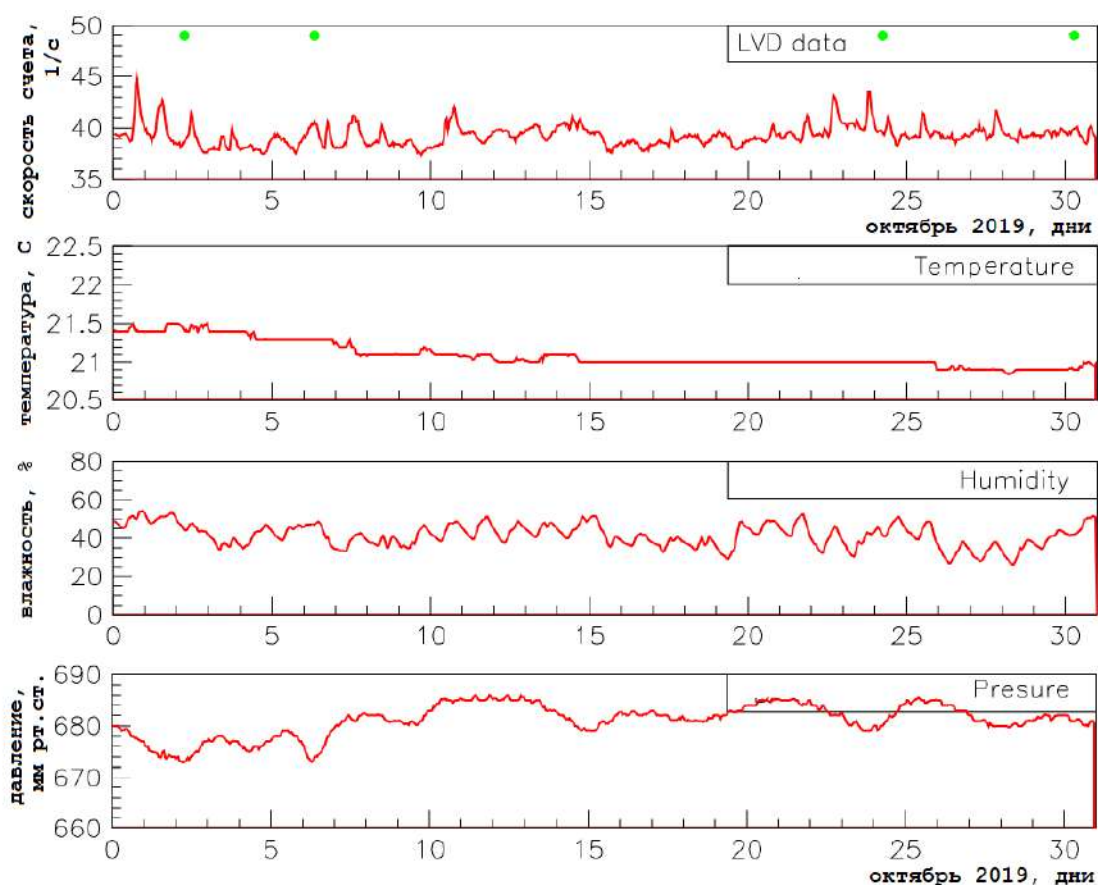


Рисунок 57 – Измерения скорости счета LVD (на счетчик в секунду), температуры, влажности, давления за октябрь 2019 г. Точками показаны толчки землетрясений

Был проведен сравнительный анализ с марта 2019 по март 2020 г скорости счета данных LVD по нижнему порогу с данными ТГ по температуре, влажности и давлению (рисунок 57). Пики в низко-энергетических данных LVD не связаны с пиками изменений в Т, Н, Р.

12. Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г.

Модернизация детектора LHCb. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

12.1. Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г.

Продолжалась работа с участием ИЯИ РАН по обработке ранее набранных данных. Коллаборацией LHCb к декабрю 2020 г. опубликованы 44 работы в высоко цитируемых журналах. Ниже приводятся наиболее интересные результаты, полученные за отчетный период.

12.1.1. Измерения отклонений от модели “лептонной универсальности” в распадах $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$ в эксперименте LHCb

LHCb коллаборация систематически проверяет принцип Стандартной Модели, известный как “лептонная универсальность”. Разные параметры, сравнивающие распады b-кварка в различные лептоны, уже измерены (R_K , R_K^{*0} , $R(D^*)$, $R(J/\psi)$ и недавно R_{PK}). Эти измерения показывают отклонения от модели “лептонной универсальности”, но по отдельности недостаточно значимые для независимого утверждения о наличии новой физики. В 2020 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$, в которых были обнаружены отклонения от стандартной модели на уровне 3,3 стандартных отклонения. Позже были представлены аналогичные результаты для распада $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$, которые показали отклонения от стандартной модели на уровне 3,1 стандартных отклонения.

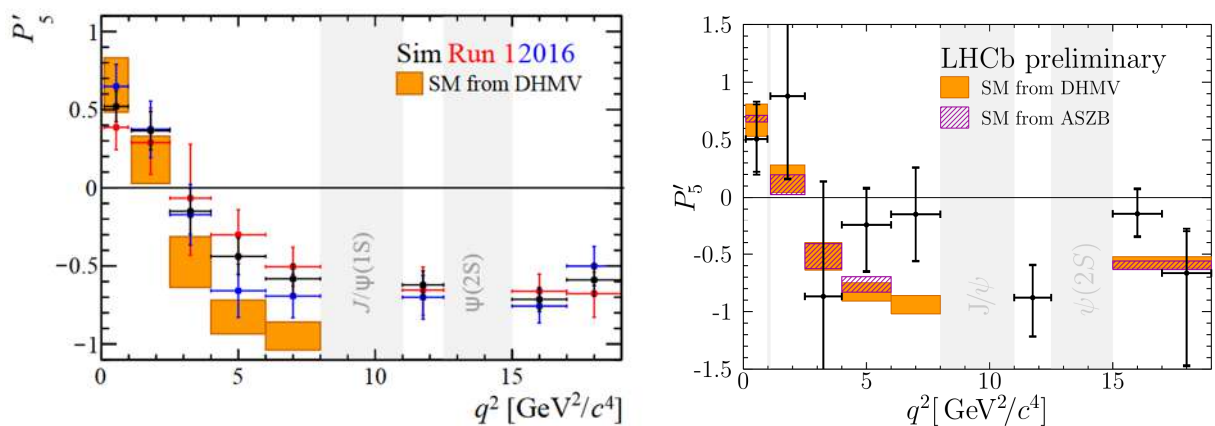


Рисунок 58 – Показаны распределения P'_5 наблюдаемой, как функции q^2 импульса пары $\mu^+ \mu^-$. Слева показано распределение данных распада $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$, справа - $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$

12.1.2. Первое наблюдение время-зависимого CP нарушения в распадах B_s мезонов в эксперименте LHCb

Время-зависимое CP нарушение в распадах $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ и $B^0_s \rightarrow K^+ K^-$ измерено, используя данные pp столкновений интегральной светимости $1,9 \text{ fb}^{-1}$, набранных LHCb детектором при энергии 13 TeV. Комбинация LHCb измерений дает первое измерение время-зависимого CP нарушения в распадах B_s мезонов. Это открытие является важной вехой в истории физики частиц, как отмечено на рисунке 59.

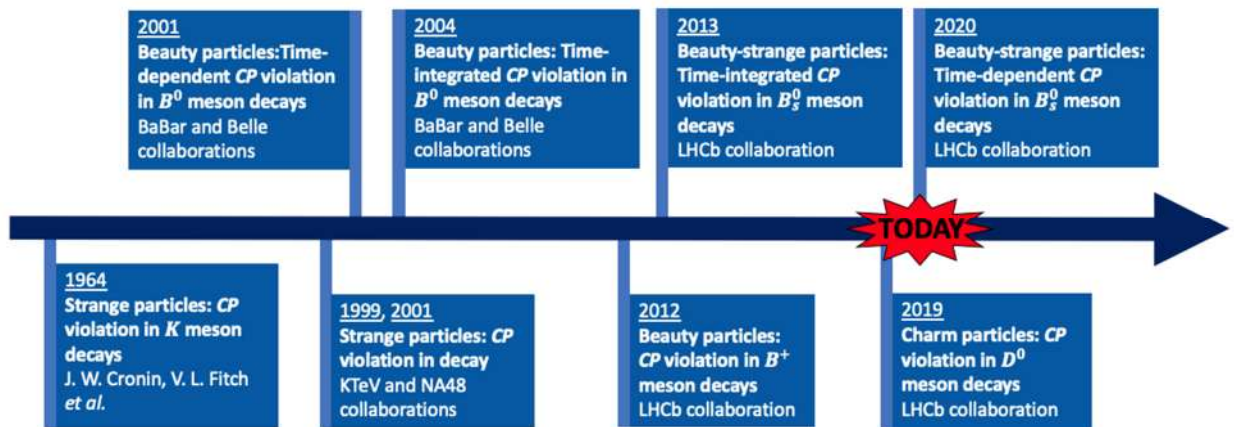


Рисунок 59 – История физики частиц

B^0_s мезоны осциллируют с чрезвычайно высокой частотой 3×10^{12} /сек, примерно 9 раз за время жизни. Проведенный анализ позволил измерить время-зависимое CP нарушение в распадах $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ и $B^0_s \rightarrow K^+ K^-$, используя данные pp столкновений интегральной светимости 1.9 fb^{-1} . При той же статистике было измерено интегральное CP нарушение в $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ и $B^0_s \rightarrow \pi^+ K^-$ распадах. Результаты согласуются с предыдущими измерениями, и комбинация с предыдущими данными позволила установить первое (на уровне больше 5 стандартных отклонений) наблюдение время-зависимого CP нарушения в распадах B_s мезонов.

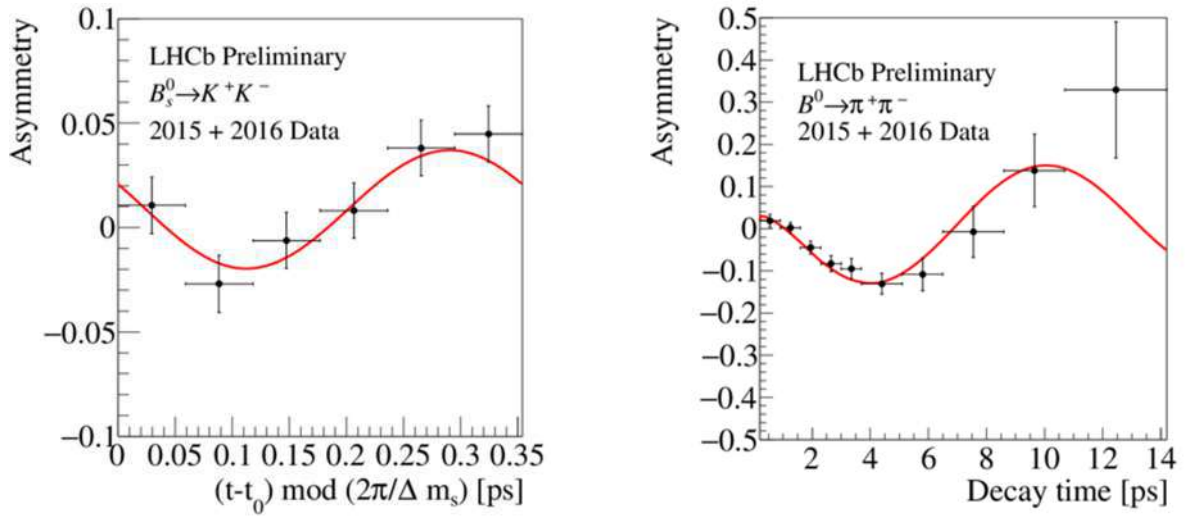


Рисунок 60 – Показаны измерения CP асимметрии как функции от времени жизни В мезонов. На левом графике ненулевая осциллирующая асимметрия отчетлива видна. На правом графике показаны аналогичные данные для B^0 мезона

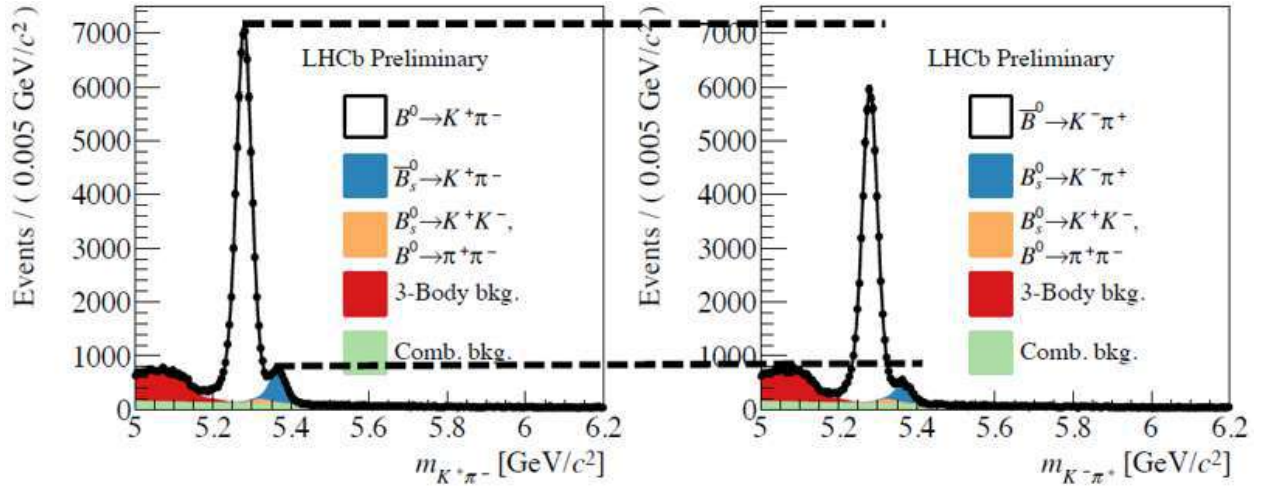


Рисунок 61– Представлены распределения инвариантной массы $K^+ \pi^-$ и $K^- \pi^+$ мезонов. Линии показывают разницу уровней распадов, соответствующую время-интегрированной CP асимметрии

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

Проверка лептонной универсальности – это один из способов поиска новой физики. В распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ измеряется отношение R_K , описывающее, как часто происходят распады в пары $e^+ e^-$ и $\mu^+ \mu^-$. Коллаборация LHCb опубликовала (данные Run1+2015+2016), наиболее точное на сегодняшний день измерение $R_K = 0,846 (+0,060 -0,054) (+0,016 -0,014)$, где первая неопределённость – статистическая, вторая – систематическая. Полученный результат согласуется с предсказанием Стандартной Модели на уровне $2,5 \sigma$ (стандартных отклонений). Дальнейшее улучшение точности измерения можно ожидать после обработки данных 2017 и 2018 г.г.

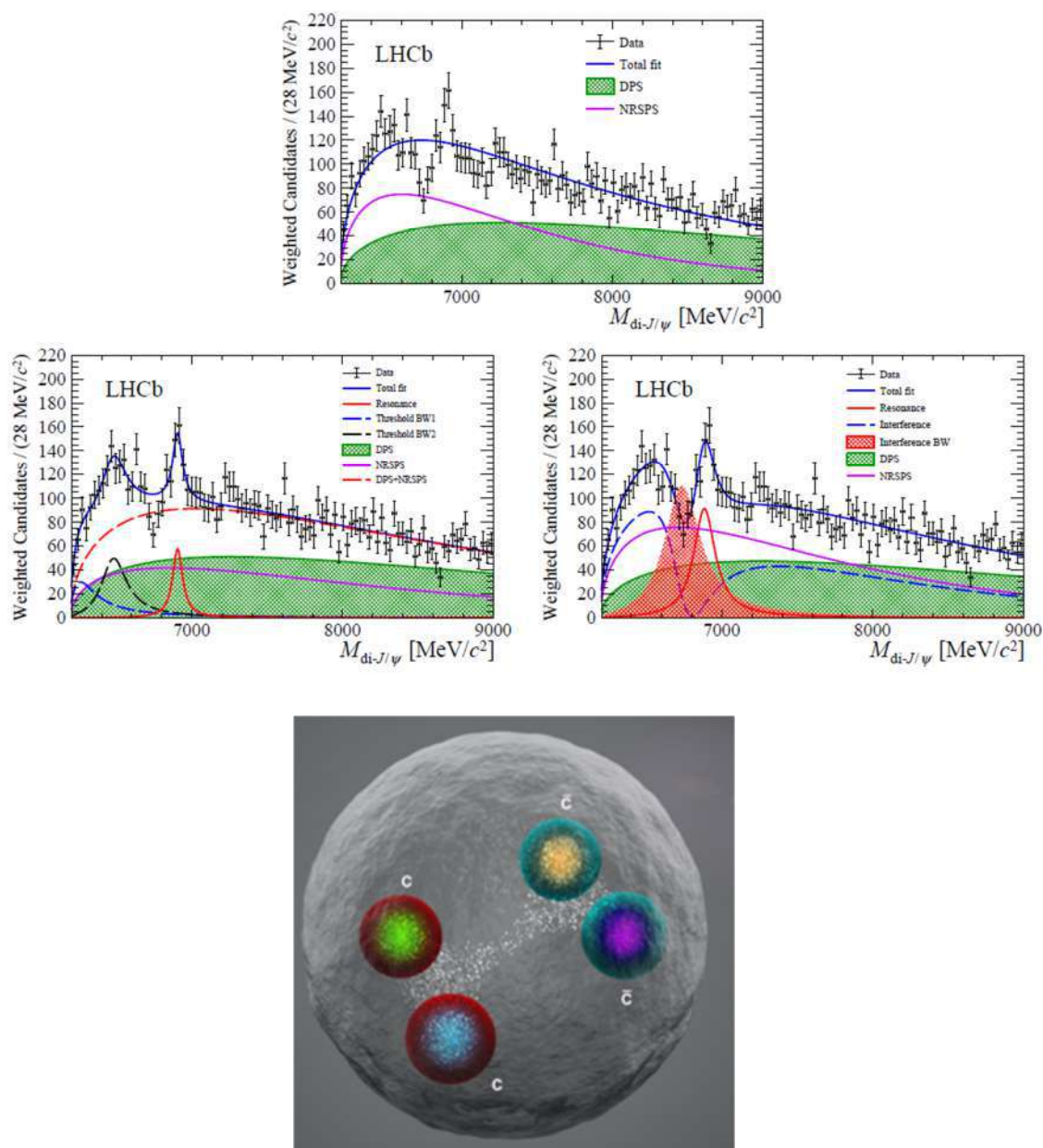


Рисунок 62 – Верхние графики – распределение масс пар J/ψ . Пик около 6900 MeV отходит от “нуль-гипотезы” - спектра непрерывного рождения пар J/ψ на более чем 5σ . Нижний график – схематическое изображение состояния с четырьмя c кварками

Распад в две пары J/ψ предполагает минимальный набор из 4 c -кварков. До сих пор наблюдаемые экзотические адроны состояли максимум из двух тяжелых кварков. При этом ни один из них не состоял более, чем из двух одинаковых кварков. Новый тетракварк $T_{cccc}(6900)$ является в высшей степени не обычной комбинацией кварков и, возможно, даст ценные данные для теоретических моделей.

12.2. Модернизация детектора LHCb

В декабре 2018 г. ускорители протонный суперциклотрон (SPS) и адронный коллайдер (LHC) в ЦЕРНе были остановлены на два года на модернизацию. За это время

уже 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 $2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, 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 в 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 убраны – первая мюонная станция и предливневый детектор. Последний разрабатывался и создавался в ИЯИ РАН, поэтому сотрудники ИЯИ участвовали в его демонтаже.

Работы по полному демонтажу предливневого и сцинтилляционно-падового детектора были выполнены. 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.

12.3. Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

В 2029 году Большой адронный коллайдер будет остановлен на три года на реконструкцию. В результате модернизации ускорителя его светимость вырастет в 10-12 раз, после 2030 года до $2 \times 10^{34} / \text{см}^2 / \text{сек}$. Чтобы справиться с возросшей интенсивностью взаимодействий пучков сталкивающихся частиц, все эксперименты должны будут

использовать это время на модернизацию своих детекторов и электроники. Для калориметрической системы LHCb это означает, в первую очередь, модернизацию электромагнитного калориметра. 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». 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.

Из-за возросшей интенсивности количество взаимодействий за время банча возрастет в несколько раз. Чтобы выделить одно событие на фоне других, потребуется уменьшить размер ячейки электромагнитного калориметра в центральной части, где плотность продуктов взаимодействия наиболее высокая. Выбор размеров ячейки и радиационно-стойкого материала с высоким световыходом представляет собой нетривиальную задачу, которая может быть решена испытаниями прототипов модулей электромагнитного калориметра на тестовом пучке и моделированием методом Монте-Карло. Поскольку модернизация калориметра является дорогой и трудозатратной, работы по проектированию нового калориметра начались уже сейчас.

Сотрудники ИЯИ РАН подключились к работам по моделированию электромагнитного калориметра в 2020 г.

На кластере ИЯИ РАН была подключена черновская виртуальная файловая система (CERN VFS) и подключены все приложения, которые позволили воспроизвести условия работы, как на кластере lxplus в ЦЕРНе. Были установлены пакеты программ Gauss и Boole, необходимые для моделирования pp- взаимодействий, распада частиц, рожденных в этих взаимодействиях, и отклика LHCb детектора на такие события. Проведены необходимые тестовые расчеты для проверки всей цепочки подключаемых программ. В настоящее время продолжается настройка программного обеспечения для детектора LHCb.

В настоящее время проведены подготовительные работы: на локальном сервере ИЯИ РАН установлены все необходимые пакеты программ, используемые на эксперименте LHCb для моделирования и реконструкции событий взаимодействия частиц.

Сотрудники ИЯИ РАН занимаются освоением программного обеспечения.

Method Fast simulation

Процесс моделирования прохождения частиц через детектор включает в себя транспортировку частиц через части детектора перед калориметром, которые считаются неизменными. Моделирование методом Монте-Карло требует больших затрат машинного времени. Для ускорения процесса моделирования и получения предварительной оценки прохождения частиц через такие части установки может быть представлено в аналитическом виде или сгенерировано заранее. На эксперименте LHCb разработана и используется программа быстрой симуляции, использующая эти принципы. В настоящее время программа установлена на сервере ИЯИ РАН, проведены предварительные расчеты отклика электромагнитного калориметра на тестовых данных.

Оптимизация под конкретные процессы

Оптимизация электромагнитного калориметра под регистрацию определенных физических процессов, которые могут быть проявлением “новой физики”. В связи с увеличением количества взаимодействий изменяется “среда”, в которой находится детектор. Поэтому, необходимо определить поток частиц и его состав перед калориметром, а затем смоделировать прохождение частиц в новом калориметре. Для определения потока частиц используется пакет LHCb *Gauss v52r2*. Для отладки в качестве сигнальных событий были выбраны распады $B \rightarrow \gamma \gamma$. Вопрос, на который мы хотим ответить, – чем сигнальные события отличаются от фоновых с точки зрения временного и пространственного распределения в детекторе. Что нужно изучать, что бы ответить на этот вопрос, пока четко не ясно. Для этого необходимо определить – всегда ли имеется фон к сигнальным событиям, и как это зависит от пространственного положения каскадов в электромагнитном калориметре. Также необходимо определить, насколько малым должен быть размер ячейки калориметра при наличии фоновых фотонов и т.д.

В настоящее время этот комплекс программ работает в тестовом режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Сформулируем кратко полученные за отчетный период результаты теоретических исследований:

1. Исследованы теоретические неопределённости различных подходов позволяющих получать оценки пяти и шести-петлевых вкладов теории возмущений к соотношению между полюсными и бегущими массами тяжёлых кварков в КХД.

2. Предложен метод детектирования аксионоподобных частиц в сверхпроводящей электромагнитной полости.

3. Оценена чувствительность эксперимента NA64 в ЦЕРНе к поиску аксионоподобных частицы в диапазоне масс $10 \text{ МэВ} \lesssim m_a \lesssim 100 \text{ МэВ}$.

4. Разработана гибридная модель неупругих структурных функций протона включающая в себя как процессы возбуждения нуклонных резонансов так и КХД-механизм глубоконеупругого рассеяния и обеспечивающая гладкий переход между разными физическими областями.

5. Рассмотрены альтернативные инфляции теории эволюции ранней Вселенной типа отскок и генезис.

7. Исследовано образование первичных черных дыр (ПЧД) в ранней вселенной в скалярно-тензорной теории Бранса-Дике.

9. Были изучены сценарии физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели.

10. В расширенной теории Хорндески была изучена проблема потенциального сверхсветового распространения гравитационных волн.

11. Подготовлен обзор «Нетопологические солитоноподобные решения и $U(1)$ -инвариантность»

Участие в международном эксперименте CMS

Работы, предусмотренные очередным этапом участия ИЯИ РАН в эксперименте CMS, выполнены в максимальном объеме, который был возможен в условиях пандемии.

Этот этап в основном был связан с участием в анализе набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, дальнейшим участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий, а также с работами по модернизации адронного калориметра установки CMS, в частности, с деятельностью по модернизации фотоприемников.

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

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

Продemonстрирован существенный прогресс в разработке метода регистрации скрытых фотонов по одиночным электронам, эмитируемым с поверхности металлического катода мультикатодного счетчика. Разработан и изготовлен мультикатодный счетчик усовершенствованной конструкции с алюминиевым катодом и фокусирующими электродами. Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода $(0,81 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$ Hz/cm². По результатам измерений получен верхний предел на параметр кинетического смешивания: $< 1 \times 10^{-11}$ в диапазоне масс скрытого фотона от 9 до 40 эВ. Следует отметить, что в наших измерениях мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла, в то время как в других экспериментах мишенью являются валентные электроны. Результат включен в компиляцию данных по свойствам элементарных частиц в Review of Particle Physics в журнале Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020). Важным в этой работе является также то, что здесь результаты получены в прямом измерении. Продолжается набор статистики со счетчиком усовершенствованной конструкции при температуре, близкой к нулю по Цельсию, полученной путем охлаждения детектора с помощью элементов Пельтье. Чувствительность метода критически зависит от темнового тока детектора. При низких температурах ожидается снижение темнового тока детектора. В настоящее время результаты измерений обрабатываются.

Предложен новый эксперимент со сборкой мультикатодных счетчиков в подземной лаборатории Баксанского нейтринной обсерватории (эксперимент PHELEX), где планируется провести измерения со счетчиками различно ориентированными относительно земных координат с целью обнаружения возможных суточных вариаций при вращении Земли. В случае обнаружения таких вариаций их временной ход позволит определить

положение вектора поля скрытых фотонов относительно плоскости Галактики.

Участие в международном эксперименте NA64

Сотрудниками российских институтов – членами Сотрудничества NA64 разработана и предложена концепция эксперимента по поиску легкой темной материи на новой установке NA64 на ускорителе SPS с уровнем чувствительности, который превосходит уровень, достигнутый на сегодняшний день в экспериментах, проводимых и планируемых в США, Японии и Италии. Проект эксперимента был подан в 2014 г. на рассмотрение в комитет SPSC CERN и получил рекомендацию по проведению в 2016-18 гг. первых измерений. Результаты этих сеансов, представленные в данном отчете и опубликованные в виде статей в журналах Physical Review Letters, Physical Review D и Physics Letters B, получили высокую оценку членов комитета SPSC в 2020 г. Комитет SPSC рекомендовал проведение следующих сеансов по набору данных в течение 2021 г. На заседании комитета Research Board CERN эта рекомендация была одобрена, также было принято решение о создании в течение 2019-2021 гг. постоянной площадки на канале H4 для эксперимента NA64.

В 2020 году был осуществлен поиск нового бозона X17, который мог бы служить объяснением наблюдаемого аномального избытка событий пар e^+e^- с массами около 17 МэВ, испускаемых в переходах возбужденных ядер ^8Be и ^4He в основное состояние. Поиск проводился на основе анализа данных, полученных в сеансах 2016-2018 гг. В результате анализа сигнальных и контрольных областей существенных превышений над уровнем фона от оценок вкладов процессов СМ не обнаружено. В результате получены уникальные, лучшие в мире ограничения на существование бозона X17 и на параметр смешивания векторного бозона A' с фотоном в диапазоне масс меньше 25 МэВ.

Также в 2020 году сотрудничество NA64 провело анализ по модельно-независимому поиску легких скалярных (s) и псевдоскалярных аксионоподобных (a) частиц, которые связаны с двумя фотонами, с использованием данных, полученных от 100-гэВного электронного пучка H4 CERN SPS. В результате были получены уникальные, наиболее строгие на данный момент, ограничения на константу связи частиц a/s с фотоном $g_{a\gamma\gamma}$ для масс a/s меньше 55 МэВ. Полученные результаты опубликованы в журналах Physical Review D и Physical Review Letters за 2020 г.

Программа исследований расширенного эксперимента NA64++, предложенная на электронном, мюонном и адронном пучках ЦЕРН на период 2020-2024 гг., получила высокую оценку комитета Physics Beyond Collider и рассматривается как одно из приоритетных направлений исследований ЦЕРН.

3. Задача «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP»

План работ на 2020 год выполнен почти полностью, за исключением пучковых тестов сцинтилляционных счетчиков в Италии и в ЦЕРН, которые были отменены из-за пандемии.

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 объеме 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 сеанса №10 (с ноября 2019 г. по февраль 2020 г.) была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени около 5×10^{20} POT. Детектор Baby-MIND продемонстрировал высокую эффективность работы во время набора статистики нейтринных событий при включенном пучке. В настоящее время ведётся работа по анализу данных, полученных детектором Baby-MIND.

В рамках модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также для ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK (с дальним детектором ГиперКамиоканде), группой ИЯИ РАН разработан 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 184 см, ширина 192 см, высота 56 см. Несмотря на проблемы, связанные с пандемией Covid-19 и «удаленной работой» к концу 2020 года был полностью выполнен план по производству сцинтилляционных кубиков размером $10 \times 10 \times 10$ мм³ с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон в ООО Унипласт (г. Владимир): свыше 2-х миллионов кубиков доставлено в ИЯИ, где собраны все 56 плоскостей кубиков каждая размером 192×184 кубика. В 2019-2020 гг. два прототипа детектора были протестированы на пучке нейтронов в лаборатории Лос-Аламос (США). Работа по анализу данных, полученных при тестах прототипов, продолжается.

В 2020 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 РАН была проведена 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. В 2020 г. закончено создание прототипа временного детектора SHiP, который 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. были протестированы в Италии – но, к сожалению, из-за пандемии тесты были проведены не на ускорителе во Фраскати, как планировалось, а с помощью космических лучей.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задаче 4.2 вошли в число важнейших достижений Института в 2020 году.

В эксперименте T2K был выполнен осцилляционный анализ данных, накопленных в 2010–2020 гг. с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино (сеансы №№1-10). Анализ данных базировался на интегральном потоке $1,97 \times 10^{21}$ протонов на мишени (POT) для нейтринной моды и $1,63 \times 10^{21}$ POT для антинейтринной моды. В результате существенно понижены систематические погрешности (с 13-19% до 4-6%) и улучшена чувствительность к осцилляционным параметрам. При поиске «появления» событий в дальнем детекторе Супер-Камиоканде было зарегистрировано 94 электронных нейтрино с одним кольцом и 14 событий с рождением электрона и одного пиона от взаимодействия электронного нейтрино. Кроме того, было зарегистрировано 16 событий, соответствующих появлению электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.

Было получено, что наиболее вероятными значениями CP нечетной фазы являются (предварительно) $\delta = (-1,97^{+0,93}_{-0,58})$ 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 CP нарушению. Полученный результат подтверждает первоначальное указание T2K на максимальное CP нарушение в лептонном секторе Стандартной Модели.

Помимо изучения свойств *стандартных* нейтринных семейств в эксперименте T2K продолжаются работы по поиску *стерильных* нейтрино и/или частиц темной материи (DM), не участвующих в слабых взаимодействиях. Главная проблема при поиске стерильных нейтрино и частиц темной материи в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K – подавление фона нейтринных взаимодействий. В настоящий момент ведется работа по изучению всех возможных фоновых процессов и методов их подавления, моделируются отклики детекторов на сигнальные и фоновые события, а также разрабатывается программное обеспечение для реконструкции событий.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Были продолжены работы по анализу данных (2018 г.) каонного эксперимента NA62 с целью поиска редкого распада каона на пион и два нейтрино ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$). В сигнальных областях данных 2018 г. наблюдается 17 событий. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 7,6, а фон – на уровне $5,28 \pm 0,99$. Суммарный анализ данных 2016-2018 гг. приводит к следующему результату: $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (11,0 + 4,0 - 3,5 \text{ (stat.)} \pm 0,3 \text{ (syst.)}) \times 10^{-11}$.

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 CP и T нечётным эффектам. Кроме того, в рамках каонного эксперимента NA62 был продолжен поиск невидимых «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также аксионо-подобных частиц. Эти исследования привели к получению верхних границ констант взаимодействия, значения которых не хуже полученных в других экспериментах.

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

Представлены результаты анализа спектров событий, обусловленных взаимодействием мюонных нейтрино и антинейтрино. Определены наиболее вероятные значения параметров осцилляций нейтрино и получены ограничения на значения фазы нарушения CP-инвариантности.

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

Наиболее важные достижения в 2020 году:

- Была проведена завершающая очистка от трития спектрометра установки. В течение нескольких месяцев была проведена очистка объема спектрометра с прогревом его корпуса и непрерывной откачкой. Был достигнут уровень фона, полностью удовлетворяющий проведению эксперимента по поиску стерильных нейтрино в бета-распаде трития.
- Установлены и опробованы новые элементы спектрометра – магниторазрядный насос, масс-анализатор остаточных газов и другие элементы.
- Проведен один физический сеанс с полным включением всех элементов установки.
- Разработан алгоритм эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в условиях больших нагрузок.
- Проведены работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования.
- Проведен комплекс технических и закупочных мероприятий для подготовки системы ожижения гелия для комплексного технического обслуживания с заменой всех элементов, выработавших ресурс.
- Начаты работы над новыми проектами поиска стерильных нейтрино в распаде бериллия-7 и в спектрах распада трития насажденного на графен.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

1. Проведено 3 сеанса на установке КАТРИН. Результаты обрабатываются и в начале 2021г. будут представлены обработки первого из них (второго в общем списке).
2. Опубликованы результаты исследований быстрых детекторов электронов. Разработаны планы продолжения работ на стенде в ИЯИ РАН.

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

Поиск 2К-захвата в Хе-124

В 2020г. проводился финальный анализ экспериментальных данных набранных за период с 2014 по конец 2019 г. Проведено моделирование нейтронной компоненты фона экспериментальной установки, и его вклад в образования потенциально «опасного» радиоактивного изотопа I-125. Из результатов моделирования определено, что за один год измерений в рабочей области детектора могут термализоваться $\sim 2,5$ нейтронов, что с учетом количества атомов Хе-124 и сечения захвата тепловых нейтронов этими ядрами, будет давать нам 0,02 атома I-125. Т.е. за все время измерений в рабочем объеме у нас будет образовано 1-2 атома I-125.

Разработан новый метод анализа формы импульса пропорционального счетчика большого объема. Оптимизированный анализ формы импульса тока от электронного облака первичной ионизации в счетчике позволил улучшить разрешение детектора и энергетическую калибровку. В результате эффективность выбора полезных событий увеличилась на 25%. Полученные результаты доложены на конференции ICPPA 2020 (МИФИ) и опубликованы в трудах конференции, журнале Journal of Physics: Conference Series.

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

В 2020 г. началась первая фаза эксперимента AMoRE – AMoRE-I. Для AMoRE-I используется тоже самый криостат растворения, который использовался на отладочном этапе AMoRE-pilot. По сравнению с AMoRE-pilot, в AMoRE-I увеличена на 5 см толщина свинца в пассивной защите, так же увеличено число счетчиков в мюонном вето. Число сцинтилляционных кристаллов, по сравнению с AMoRE-pilot, доведено до 18 штук: 13 кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и 5 кристаллов $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Общая масса кристаллов составляет более 6 кг. До конца 2020 г. измерения проводятся в тестовом режиме, для отладки программного обеспечения и проверки работы электроники. Разрабатывается алгоритм программного триггера сигналов на основе фильтров Баттерворта. Данный триггер позволит снизить общий объем первичных данных AMoRE-I, до 17 ТБ в год.

Планируется, что набор данных в фазе AMoRE-I продлится не менее трех. В дальнейшем кристаллы, используемые на этапе AMoRE-I будут установлены в новом криостате второй фазе эксперимента – AMoRE – II, где общая масса кристаллов будет доведена до 200 кг.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задачам «Эксперименты GERDA и LEGEND», «Эксперимент Double Chooz» вошли в число важнейших достижений Института в 2020 году.

Эксперименты GERDA и LEGEND

Учёные из ИЯИ РАН в 2020 году участвовали в экспериментах GERDA и LEGEND, расположенных в LNGS INFN. Набор статистики в эксперименте GERDA закончен в начале 2020 года. В рамках эксперимента GERDA была произведена обработка данных, получен результат, подготовлена и послана в журнал Physical Review Letters статья об окончательном результате эксперимента GERDA. Статья опубликована и подготовлен

пресс-релиз. В рамках эксперимента LEGEND продолжалась подготовка к началу работы эксперимента. Учёные дистанционно участвовали в рабочих совещаниях обоих экспериментов.

Эксперимент Double Chooz

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

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

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

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

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 $\delta I_v = 1,0 \pm 0,2\%$. Измерения в зале установки LVD температуры, влажности и давления показали, что условия эксплуатации детектора стабильные как в краткосрочном режиме (в течении суток), так и в долгосрочном (в течении года). Это дает хороший прогноз для выделения резкого изменения концентрации радона и, надеемся, для выделения предвестников землетрясений.

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

Физические результаты коллаборации LHCb в 2020 г

План работ на 2020 год выполнен полностью.

В 2020 г. группой ИЯИ РАН были полностью выполнены все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы LHCb. Эксперимент LHCb в 2020 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 произведено наблюдение новых пентакварков, открыто CP нарушение в распадах B_s частиц, проведены поиски нарушения лептонной универсальности в распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ и ряд других.

Модернизация детектора LHCb

План работ на 2020 год выполнен полностью.

На этапе создания установки LHCb группа ИЯИ РАН разработала и изготовила предливневый детектор, являющийся частью калориметрической системы. Работы по полному демонтажу предливневого и сцинтилляционно-падового детектора были выполнены. Все работы выполнены в полном объёме при полном соблюдении правил техники безопасности.

Участие в расчётах по оптимизации электромагнитного калориметра

План работ на 2020 год выполнен полностью.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes and a Compact Matrix on Their Basis / Z. Sadygov et al. // Phys. Part. Nuclei Lett. – 2013. – 10 – 780.
2. The NA64 Collaboration. Improved limits on a hypothetical $X(16.7)$ boson and a dark photon into e^+e^- pairs // Phys. Rev. D. – 2020. – 101. – P.071101(R).
3. An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from ‘Troitsk nu-mass’ data / A.I. Belesev et al. // JETP Lett. – 2013. – 97. – P. 67 [arXiv:1211.7193].
4. First measurements in search for keV sterile neutrino in tritium beta-decay in the Troitsk nu-mass experiment / D.A. Abdurashitov et al. // JETP Letter. – 2017. – 105. – P. 753 [arXiv:1703.10779].
5. L. Mikelyan. Neutrino Oscillations at Reactors: What Is Next? / L. Mikelyan and V. Sinev // Physics of Atomic Nuclei. – 2000. – v.63, № 6. – p. 1002. arXiv:hep-ex/9908047.
6. Indication for the disappearance of reactor electron antineutrinos in the Double Chooz experiment / Y. Abe et al. // Phys. Rev. Lett. – 2012. – 108. – 131801. arXiv:1112.6353 [hep-ex].
7. A. L. Kataev. Multiloop contributions to the on-shell-MS heavy quark mass relation in QCD and the asymptotic structure of the corresponding series: the updated consideration / A. L. Kataev, V. S. Molokoedov. // European Physical Journal C. – 2020. – 80, v. 12, – P. 1160.
8. I. O. Goriachuk. Riemann zeta(4) function contributions to $O(\alpha_s^5)$ terms of Adler D-function and Bjorken polarized sum rule in $SU(N_c)$ QCD: results and consequences / I. O. Goriachuk, A. L. Kataev // arXiv:2011.14746 [hep-ph].
9. А. А. Радионов. Опыт построения невырожденных двухпетлевых IBP тождеств / А. А. Радионов, Ф. В.Ткачев. // ЭЧАЯ – 2020. – 50, т. 4. – С. 604-608.
10. A. A.Radionov. Partial D-operators for the generalized IBP reduction / A. A.Radionov, F. V. Tkachov // arXiv: 2003.07808 [hep-th]
11. N. D. Lenshina. MS 4: альтернатива формализму БПХЦ / N. D. Lenshina, A. A. Radionov, F. V. Tkachov. // ЭЧАЯ – 2020. – 51, т. 4, – С. 567-571.
12. N. D. Lenshina. Finite Z-less integral expressions for β -functions in the MS4 scheme / N. D. Lenshina, A. A. Radionov, F. V. Tkachov // arXiv: 2005.03291 [hep-th]
13. A.D. Morozov. Error estimation in the method of quasi-optimal weights / A.D. Morozov, A.V. Lokhov, F.V. Tkachov // arXiv: 2005.12554 [physics.data-an].
14. Examining axion-like particles with superconducting radio-frequency cavity / Dmitry Salnikov et al. // arXiv:2011.12871.

15. R.R. Dusaev. Photoproduction of axionlike particles in the NA64 experiment / R.R. Dusaev, D.V. Kirpichnikov, M.M. Kirsanov // Phys.Rev. D. –2020. –V. 102. –P. 055018.
16. URL: <https://indico.frib.msu.edu/event/37/>
17. URL: <https://indico.bnl.gov/event/6567/>
18. First results on ProtoDUNE-SP liquid argon time projection chamber performance from a beam test at the CERN Neutrino Platform / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. –P12004, e-Print: 2007.06722 [physics.ins-det].
19. Neutrino interaction classification with a convolutional neural network in the DUNE far detector / B. Abi et al. // Phys. Rev. D. –2020. –V. 102. –P. 092003.
20. Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment / B. Abi et al. // Eur. Phys.J. – 2020. – C80. – №10. – 978. e-Print: 2006.16043 [hep-ex].
21. DUNE far detector technical coordination / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. – T08009. e-Print: 2002.03008 [physics.ins-det].
22. The DUNE far detector single-phase technology / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. – V. IV. – T08010. e-Print: 2002.03010 [physics.ins-det].
23. Introduction to DUNE / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. – Volume I. –T08008. e-Print: 2002.02967 [physics.ins-det].
24. Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) / B. Abi et al. // Far Detector Technical Design Report, Volume II DUNE Physics. e-Print: 2002.03005 [hep-ex]/
25. Supernova Neutrino Burst Detection with the Deep Underground Neutrino Experiment / B. Abi et al. // e-Print: 2008.06647 [hep-ex].
26. Prospects for Beyond the Standard Model Physics Searches at the Deep Underground Neutrino Experiment / B. Abi et al. // e-Print: 2008.12769 [hep-ex].
27. E. Y. Nugaev. Review of Nontopological Solitons in Theories with $U(1)$ -Symmetry / E. Y. Nugaev, A. V. Shkerin. // JETP. – 2020. –130. –№2. –p. 301.
28. Toward evading the strong coupling problem in Horndeski genesis / Y. A. Ageeva et al. // Phys. Rev. D. –2020. – 102. –023519.
29. Horndeski genesis: consistency of classical theory / Y. A. Ageeva, P.K.Petrov, V.A. Rubakov // J. High Energy Phys. –2020. –107.
30. P.K.Petrov. Power-law Genesis: strong coupling and galileon-like vector fields // Mod. Phys. Lett. A 35. –2020. –2050305.
31. S. Mironov. Subluminal cosmological bounce beyond Horndeski / S. Mironov, V. Rubakov, V. Volkova // JCAP –2020. –05. –024
32. S. Mironov. Superluminality in DHOST theory with extra scalar / S. Mironov, V. Rubakov, V. Volkova // arXiv: 2011.14912.

33. Formation and clustering of primordial black holes in Brans-Dicke theory / Victor A. Berezhin et al. // Universe. –2020. –v. 6. – №10. –P. 158.
34. Quadratic Gravity, double layers and non-conservative energy-momentum tensor / Victor A. Berezhin et al. // URL: <https://arxiv.org/abs/2009.06176>.
35. Double layer from least action principle / Victor A. Berezhin et al. // Class.Quant.Grav. – 2020. –38. –045014.
36. S. Demidov. Lunar neutrinos / S. Demidov, D. Gorbunov // arXiv:2012.12870 [hep-ph].
37. Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles By SHiP Collaboration / C. Ahdida et al. // arXiv:2011.05115 [hep-ex].
38. Anton Chudaykin. Exploring Early Dark Energy solution to the Hubble tension with Planck and SPTPol data / Anton Chudaykin, Dmitry Gorbunov, Nikita Nedelko // arXiv:2011.04682 [astro-ph.CO].
39. Sensitivity of the SHiP experiment to light dark matter By SHiP Collaboration / C. Ahdida et al. // arXiv:2010.11057 [hep-ex].
40. Sergei Gninenko. Refining constraints from Borexino measurements on a light Z' -boson coupled to L_{μ} - L_{τ} current / Sergei Gninenko, Dmitry Gorbunov // arXiv:2007.16098 [hep-ph].
41. Towards Testing Sterile Neutrino Dark Matter with SRG Mission / V.V. Barinov et al. // arXiv:2007.07969 [astro-ph.CO].
42. Fedor Bezrukov. No Miracle in Gravity Portals / Fedor Bezrukov, Sergey Demidov, Dmitry Gorbunov // arXiv:2006.03431 [hep-ph].
43. Gravitational reheating and superheavy Dark Matter creation after inflation with non-minimal coupling/ E. Babichev et al. // JCAP –2020. –2009. –059. arXiv:2006.02225 [hep-ph].
44. Search for the rare decays $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu} \underline{\nu} \nu$ and $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \underline{\nu} \nu$ By PIENU Collaboration / A. Aguilar-Arevalo et al. // Phys. Rev. D102. –2020. –no.1. –P. 012001.
45. Anton Chudaykin. Combined analysis of Planck and SPTPol data favors the early dark energy models / Anton Chudaykin, Dmitry Gorbunov, Nikita Nedelko // JCAP 2008. –2020. –013. arXiv:2004.13046 [astro-ph.CO].
46. Heavy Neutral Leptons from kaon decays in the SHiP experiment / Dmitry Gorbunov et al. // Phys.Lett. B. –2020. – 810. –P. 135817. arXiv:2004.07974 [hep-ph].
47. Eugeny Babichev. Gravitational misalignment mechanism of Dark Matter production / Eugeny Babichev, Dmitry Gorbunov, Sabir Ramazanov // JCAP2008. –2020. –047. arXiv:2004.03410 [hep-ph].

48. Measurement of the muon flux from 400 GeV/c protons interacting in a thick molybdenum/tungsten target By SHiP Collaboration / C. Ahdida et al. // Eur.Phys.J. C80 –2020. –№3. –284.
49. Snd@lhc / C. Ahdida et al. // arXiv:2002.08722 [physics.ins-det].
50. Measurement of the muon flux for the SHiP experiment By SHiP Collaboration / C. Ahdida et al. // arXiv:2001.04784 [physics.ins-det].
51. F. Bezrukov. Scalar induced resonant sterile neutrino production in the early Universe / F. Bezrukov, A. Chudaykin, D. Gorbunov // Phys.Rev. D101. –2020. –№10. –P. 103516. arXiv:1911.08502 [hep-ph].
52. S.V. Demidov. Bounds on non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data // JHEP –2020. –03. –105.
53. S. Demidov. Sgoldstino signature in hh, W+W- and ZZ spectra at the LHC / S. Demidov, D. Gorbunov, E. Kriukova // JHEP, –2020. –05. –092.
54. Kopylov. A.V. A multi-cathode counter in a single-electron counting mode / Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. // NIM A – 2018 – 910 – 164.
55. Kopylov A.V. Method of Search for Hidden Photons of Cold Dark Matter Using a Multi-Cathode Counter / Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – V.82, №.9. – pp.1-8.
56. The NA64 Collaboration. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon into e^+e^- pairs // Phys. Rev. D. – 2020. – 101. – P.071101(R).
57. The NA64 Collaboration. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment // Phys. Rev. Lett. – 2020. – 125. – P.081801.
58. The current status of “Troitsk nu-mass” experiment in search for sterile neutrino / D.A. Abdurashitov et al. // JINST 10. – 2015. – T1005. [arXiv:1504.00544].
59. Vasily Chernov. Shape-based event pileup separation in Troitsk nu-mass experiment / Vasily Chernov, Alexander Nozik // JINST 14. – 2019. – 08. – T08001. DOI: 10.1088/1748-0221/14/08/T08001.
60. The status of the MARE experiment with ^{187}Re and ^{163}Ho isotopes / E. Ferri et. al. // Physics Procedia. – 2015. – 61. – 227 – 231.
61. <https://www.kip.uni-heidelberg.de/echo/>
62. <http://www.project8.org/>
63. Improved Upper Limit on the Neutrino Mass from a Direct Kinematic Method by KATRIN. / M. Aker et. al. // Phys. Rev. Lett. – 2019. – 123. – 221802.
64. <http://arxiv.org/abs/1409.0920>
65. <http://arxiv.org/abs/1204.5379>

66. V.M. Lobasev, P.E, Spivak Nucl. Instr. Meth. A240 (1885) 305.
67. 4. V.M. Lobasev. Nuclear Physics A. – 2003. – V. 719. – P. 153-160.
68. <http://www.katrin.kit.edu/>
69. [arXiv:hep-ex/0109033v1](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0109033v1)
70. Bound on 3+1 active-sterile neutrino mixing from the first four-week science run of KATRIN / M. Aker et al. // [arXiv:2011.05087](https://arxiv.org/abs/2011.05087) [hep-ex].
71. Серебров А.П. Анализ результатов эксперимента нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино и сравнение с результатами других экспериментов / Серебров А.П., Самойлов Р.М. // Письма ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112, № 3-4 – С. 211-225
72. А.В.Лохов. Семинар «Прямые измерения массы нейтрино», Тренто, Италия – устный доклад на тему: «Backgrounds at KATRIN experiment» Февраль 2020.
73. А.В.Лохов. Международная конференция по физике высоких энергий (ICHEP 2020), Прага, Чехия (онлайн) – устный доклад на тему: «KATRIN experiment: first results and future prospects» – круглый стол: «Свойства нейтрино» Июль 2020.
74. А.В.Лохов. Совещание по стратегии немецкого астрофизического общества (онлайн) – пленарный доклад на тему: «Highlights: KATRIN experiment» Декабрь 2020.
75. High-resolution spectroscopy of gaseous $^{83\text{m}}\text{Kr}$ conversion electrons with the KATRIN experiment. / Altenmüller K. et al. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – 2020. – v.47, №6. [doi: 10.1088/1361-6471/ab8480](https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab8480)
76. 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. – P-1103/2003.
77. Hunting keV sterile neutrinos with KATRIN: Building the first TRISTAN module. / Houdy T. et al. // Journal of physics. Conference series. – 2020. – 1468, №012177. [doi:10.1088/1742-6596/1468/1/012177](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012177).
78. Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes and a Compact Matrix on Their Basis. / Z. Sadygov et al. // Phys. Part. Nuclei Lett. – 2013. –10. – 780.
79. Yu.A. Goldberg et al., Semiconductors. – 1999. – 33. – 343.
80. Характеризация полупроводниковых детекторов монокинетических и отражённых электронов с энергией 1-30 кэВ. / А. В. Гостев [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72, № 11. – С. 1539-1544.
81. 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.] // Журнал технической физики. – 2020. – 4. – 693.
82. Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- β Decay [GERDA](https://arxiv.org/abs/1908.07427)

- collaboration / M. Agostini et al. // Phys. Rev. Lett. – 2020– 125. – 252502. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.252502>. [arXiv:2009.06079v1](https://arxiv.org/abs/2009.06079v1) [nucl-ex]
83. A Search for Lepton Nonconservation in Double Beta Decay With a Germanium Detector / E. Fiorini et al. // Phys. Lett. – 1967. – 25B – pp.602-603.
84. LEGEND collaboration, AIP Proc. 1894 020027 (2017) - [arXiv:1709.01980](https://arxiv.org/abs/1709.01980).
85. On-line recognition of supernova neutrino bursts in the LVD detector / N. Yu. Agafonova et al. // Astropart. Phys. – 2008. – 28. – P. 516–522.
86. 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](https://arxiv.org/abs/1909.04579) [astro-ph.HE].
87. Измерение сезонных вариаций горизонтальных мюонов на подземном детекторе LVD / Н.Ю. Агафонова и др. // Ядерная Физика. – 2020. – Т. 83. – № 1. – С. 70 – 75.
88. Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной Лаборатории Гран Сассо / Н.Ю. Агафонова и др. // Известия РАН. Серия физическая. – 2017. – Т. 81. – № 4. – С. 551 – 554.
89. No role for neutrons, muons and solar neutrinos in the DAMA annual modulation results / R. Bernabei et al. // Eur. Phys. J. C. – 2014. – 74. – P. 3196.
90. Об энергетическом спектре космогенных нейтронов / А.С. Мальгин // ЖЭТФ – 2017. – Т. 152. – в. 5 (11). – С. 863–876.

ПУБЛИКАЦИИ

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

1. A. L. Kataev. Multiloop contributions to the on-shell-MS heavy quark mass relation in QCD and the asymptotic structure of the corresponding series: the updated consideration / A. L. Kataev, V. S. Molokoedov // European Physical Journal C. –2020. –80, v. 12, – P.1160.
2. А. А. Радионов. Опыт построения невырожденных двухпетлевых IBP тождеств / А. А. Радионов, Ф. В.Ткачев. // ЭЧАЯ –2020. –50, т. 4, – С.604-608.
3. N. D. Lenshina. MS 4: альтернатива формализму БПХЦ / N. D. Lenshina, A. A. Radionov, F. V. Tkachov // ЭЧАЯ –2020. – 51, т. 4, –С.567-571.
4. R.R. Dusaev. Photoproduction of axionlike particles in the NA64 experiment / R.R. Dusaev, D.V. Kirpichnikov, M.M. Kirsanov // Phys.Rev. D. –2020. –V. 102. –P.055018.
5. First results on ProtoDUNE-SP liquid argon time projection chamber performance from a beam test at the CERN Neutrino Platform / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. –P12004, e-Print: 2007.06722 [physics.ins-det].
6. Neutrino interaction classification with a convolutional neural network in the DUNE far detector / B. Abi et al. // Phys. Rev. D. –2020. –V. 102. –P.092003.
7. Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment / B. Abi et al. // Eur. Phys.J. – 2020. –C80. – №10. – 978. e-Print: 2006.16043 [hep-ex].
8. DUNE far detector technical coordination / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. – T08009. e-Print: 2002.03008 [physics.ins-det]
9. Volume IV. The DUNE far detector single-phase technology / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. – T08010. e-Print: 2002.03010 [physics.ins-det].
10. Volume I. Introduction to DUNE / B. Abi et al. // JINST 15. –2020. –T08008. e-Print: 2002.02967 [physics.ins-det].
11. Toward evading the strong coupling problem in Horndeski genesis / Y. A. Ageeva et al. // Phys. Rev. D102. –2020. –023519.
12. Y. A. Ageeva. Horndeski genesis: consistency of classical theory / Y. A. Ageeva, P.K.Petrov, V.A. Rubakov // J. High Energy Phys. –2020. –107.
13. P.K.Petrov. Power-law Genesis: strong coupling and galileon-like vector fields // Mod. Phys. Lett. A 35. –2020. –2050305.

14. Using deep learning to enhance event geometry reconstruction for the telescope array surface detector / D Ivanov et al. // *Mach. Learn.: Sci. Technol.* –2021. –2. –015006.
15. Oleg Kalashev. Identifying nearby sources of ultra-high-energy cosmic rays with deep learning / Oleg Kalashev, Maxim Pshirkov, Mikhail Zotov // *JCAP*. –2020. –V 11. –P. 005.
16. Formation and clustering of primordial black holes in Brans-Dicke theory / Victor A. Berezin et al. // *Universe*. –2020. –v. 6. – №10. –P. 158.
17. Double layer from least action principle / Victor A. Berezin et al. // *Class.Quant.Grav.* – 2020. –38. –045014.
18. Gravitational reheating and superheavy Dark Matter creation after inflation with non-minimal coupling / E. Babichev et al. // *JCAP* –2020. –2009. –059. arXiv:2006.02225 [hep-ph].
19. Search for the rare decays $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}$ and $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}$ By PIENU Collaboration / A. Aguilar-Arevalo et al. // *Phys. Rev. D* 102. –2020. –no.1. –P. 012001.
20. Anton Chudaykin. Combined analysis of Planck and SPTPol data favors the early dark energy models / Anton Chudaykin, Dmitry Gorbunov, Nikita Nedelko // *JCAP* 2008. –2020. –013. arXiv:2004.13046 [astro-ph.CO].
21. Heavy Neutral Leptons from kaon decays in the SHiP experiment / Dmitry Gorbunov et al. // *Phys.Lett. B* 810. –2020. –P. 135817. arXiv:2004.07974 [hep-ph].
22. Eugeny Babichev. Gravitational misalignment mechanism of Dark Matter production / Eugeny Babichev, Dmitry Gorbunov, Sabir Ramazanov // *JCAP* 2008. –2020. –047. arXiv:2004.03410 [hep-ph].
23. Measurement of the muon flux from 400 GeV/c protons interacting in a thick molybdenum/tungsten target By SHiP Collaboration / C. Ahdida et al. // *Eur.Phys.J. C* 80 –2020. –no.3. –284.
24. F. Bezrukov. Scalar induced resonant sterile neutrino production in the early Universe / F. Bezrukov, A. Chudaykin, D. Gorbunov // *Phys.Rev. D* 101. –2020. –no.10. –P. 103516. arXiv:1911.08502 [hep-ph].
25. S.V. Demidov. Bounds on non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data // *JHEP* –2020. –03. –105.
26. S. Demidov. Sgoldstino signature in hh, W+W- and ZZ spectra at the LHC / S. Demidov, D. Gorbunov, E. Kriukova // *JHEP*, –2020. –05. –092.
27. S. Mironov. Subluminal cosmological bounce beyond Horndeski / S. Mironov, V. Rubakov, V. Volkova // *JCAP* –2020. –05. –024
28. E. Y. Nugaev. Review of Nontopological Solitons in Theories with U(1)-Symmetry / E. Y. Nugaev, A. V. Shkerin // *JETP* –2020. –130. –no.2. –p. 301.

29. Sirunyan A. M. et al. Measurements of production cross sections of polarized same-sign W boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. — 2021. — Vol. 812. — P. 136018. — 2009.09429.
30. Sirunyan A. M. et al. Measurement of the top quark Yukawa coupling from $t\bar{t}$ kinematic distributions in the dilepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 9. — P. 092013. — 2009.07123.
31. Lucchini M. Experimental method to monitor temperature stability of SiPMs operating in conditions of extremely high dark count rate / Lucchini M., Musienko Yu., Heering A. // Nucl.Instrum.Meth.A – 2020. – 977. – P.164300.
32. Change of SiPM parameters after very high neutron irradiation / Musienko Yu. et al. // JINST. – 2020. – 15. – V.09. – P.C09036.
33. Sirunyan A. M. et al. Studies of charm and beauty hadron long-range correlations in pp and pPb collisions at LHC energies // Phys. Lett. B. — 2021. — Vol. 813. — P. 136036. — 2009.07065.
34. Sirunyan A. M. et al. W W boson pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 9. — P. 092001. — 2009.00119.
35. Sirunyan A. M. et al. Observation of electroweak production of $W\gamma$ with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. — 2020. — Vol. 811. — P. 135988. — 2008.10521.
36. Sirunyan A. M. et al. A search for bottom-type, vector-like quark pair production in a fully hadronic final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102. — P. 112004. — 2008.09835
37. Sirunyan A. M. et al. Evidence for electroweak production of four charged leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. — 2021. — Vol. 812. — P. 135992. — 2008.07013.
38. Sirunyan A. M. et al. Search for top squark pair production using dilepton final states in pp collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 1. — P. 3. — 2008.05936.
39. Sirunyan A. M. et al. Search for dark matter produced in association with a leptonically decaying Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 1. — P. 13. — 2008.04735.
40. Sirunyan A. M. et al. Search for supersymmetry in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in events with high-momentum Z bosons and missing transverse momentum // JHEP. — 2020. — Vol. 09. — P. 149. — 2008.04422.

41. Sirunyan A. M. et al. Measurements of the W boson rapidity, helicity, double-differential cross sections, and charge asymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 9. — P. 092012. — 2008.04174.
42. Sirunyan A. M. et al. Search for decays of the 125 GeV Higgs boson into a Z boson and a ρ or ϕ meson // JHEP. — 2020. — Vol. 11. — P. 039. — 2007.05122.
43. Sirunyan A. M. et al. Investigation into the event-activity dependence of Y(nS) relative production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 11. — P. 001. — 2007.04277.
44. Sirunyan A. M. et al. Reconstruction of signal amplitudes in the CMS electromagnetic calorimeter in the presence of overlapping proton-proton interactions // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 10. — P. P10002. — 2006.14359.
45. Sirunyan A. M. et al. Inclusive search for highly boosted Higgs bosons decaying to bottom quark-antiquark pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 12. — P. 085. — 2006.13251.
46. Sirunyan A. M. et al. Evidence for Top Quark Production in Nucleus-Nucleus Collisions // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 22. — P. 222001. — 2006.11110.
47. Sirunyan A. M. et al. Observation of the Production of Three Massive Gauge Bosons at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 15. — P. 151802. — 2006.11191.
48. Sirunyan A. M. et al. Performance of the CMS Level-1 trigger in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 10. — P. P10017. — 2006.10165.
49. Sirunyan A. M. et al. Search for resonant pair production of Higgs bosons in the $bbZZ$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 3. — P. 032003. — 2006.06391.
50. Sirunyan A. M. et al. Search for a light charged Higgs boson in the $\pm H \rightarrow cs$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 7. — P. 072001. — 2005.08900.
51. Sirunyan A. M. et al. Search for a light pseudoscalar Higgs boson in the boosted $\mu\mu\tau\tau$ final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 08. — P. 139. — 2005.08694.
52. Sirunyan A. M. et al. Dependence of inclusive jet production on the anti-k_T distance parameter in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 12. — P. 082. — 2005.05159.
53. Sirunyan A. M. et al. Observation of the $B^0_s \rightarrow X(3872)\phi$ decay // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 15. — P. 152001. — 2005.04764.

54. Aad G. et al. Combination of the W boson polarization measurements in top quark decays using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 08, no. 08. — P. 051. — 2005.03799.
55. Sirunyan A. M. et al. Measurements of production cross sections of WZ and same-sign WW boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. — 2020. — Vol. 809. — P. 135710. — 2005.01173.
56. Sirunyan A. M. et al. Measurement of CKM matrix elements in single top quark t-channel production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. — 2020. — Vol. 808. — P. 135609. — 2004.12181.
57. Sirunyan A. M. et al. Identification of heavy, energetic, hadronically decaying particles using machine-learning techniques // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 06. — P. P06005. — 2004.08262.
58. Sirunyan A. M. et al. Pileup mitigation at CMS in 13 TeV data // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 09. — P. P09018. — 2003.00503.
59. Sirunyan A. M. et al. A measurement of the Higgs boson mass in the diphoton decay channel // Phys. Lett. B. — 2020. — Vol. 805. — P. 135425. — 2002.06398.
60. Sirunyan A. M. et al. Search for an excited lepton that decays via a contact interaction to a lepton and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 05. — P. 052. — 2001.04521.
61. Sirunyan A. M. et al. Measurement of the top quark forward-backward production asymmetry and the anomalous $\sqrt{}$ chromoelectric and chromomagnetic moments in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 06. — P. 146. — 1912.09540.
62. Sirunyan A. M. et al. Search for direct top squark pair production in events with one lepton, jets, and missing transverse momentum at 13 TeV with the CMS experiment // JHEP. — 2020. — Vol. 05. — P. 032. — 1912.08887.
63. Sirunyan A. M. et al. Constraints on the χ c1 versus χ c2 Polarizations in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 124, no. 16. — P. 162002. — 1912.07706.
64. Sirunyan A. M. et al. A Deep Neural Network for Simultaneous Estimation of b Jet Energy and Resolution // Comput. Softw. Big Sci. — 2020. — Vol. 4, no. 1. — P. 10. — 1912.06046.
65. Sirunyan A. M. et al. Search for a Narrow Resonance Lighter than 200 GeV Decaying to a Pair of Muons in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = \text{TeV}$ // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 124, no. 13. — P. 131802. — 1912.04776.

66. Sirunyan A. M. et al. Determination of the strong coupling constant $\alpha_S(m_Z)$ from measurements of inclusive $W^\pm$ and Z boson production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 06. — P. 018. — 1912.04387.

67. Sirunyan A. M. et al. Performance of the reconstruction and identification of high-momentum muons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 02. — P. P02027. — 1912.03516.

68. Sirunyan A. M. et al. Search for a heavy Higgs boson decaying to a pair of W bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 03. — P. 034. — 1912.01594.

69. Sirunyan A. M. et al. A search for the standard model Higgs boson decaying to charm quarks // JHEP. — 2020. — Vol. 03. — P. 131. — 1912.01662.

70. Sirunyan A. M. et al. Measurement of the top quark pair production cross section in dilepton final states containing one τ lepton in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. — 2020. — Vol. 02. — P. 191. — 1911.13204.

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

1. Anatoly Kopylov. On the possibility to observe diurnal variations of the count rate of dark photons using multicathode counters / Anatoly Kopylov, Igor Orekhov, Valery Petukhov // ЭЧАЯ – 2021. – V. 52, № 1. – стр. 31 – 38.

2. The NA64 Collaboration. Improved limits on a hypothetical $X(16.7)$ boson and a dark photon into e^+e^- pairs // Phys. Rev. D – 2020. – 101. – P.071101(R)

3. The NA64 Collaboration. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment // Phys. Rev. Lett. – 2020. – 125. – P.081801

4. Dusaev R., Kirsanov M., Kirpichnikov D. Photoproduction of axionlike particles in the NA64 experiment // Phys. Rev. D. – 2020. – 102. – P.055018

5. Kirpichnikov D., Liubovitsky V., Zelvakov A. Implication of hidden sub-GeV bosons for the $(g - 2)_\mu$, $8\text{Be} - 4\text{He}$ anomaly, proton charge radius, EDM of fermions, and dark axion portal // Phys. Rev. D. – 2020. – 102. – P.055018

6. Physics Beyond Colliders at CERN: beyond the Standard Model Working Group Report // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2020. – 47. – P.010501

7. Gninenko S.N. Search for Dark Sector Physics with NA64 / Gninenko S.N., Krasnikov N.V., Matveev V.A. // Phys. Part. Nucl. – 2020. – V.51. – P.829.

3. Публикации по задаче «Разработка и создание новых нейтринных и мюонных детекторов, которые будут использованы в экспериментах следующего поколения: ГиперКамиоканде и T2HK, SHiP»

1. Measurement of the muon flux from 400 GeV/c protons interacting in a thick molybdenum/tungsten target / C. Ahlida [et al.]. // Eur.Phys.J. – 2020. – C80 – №3 – P.284.
2. The SuperFGD charged particle beam tests / A. Blondel [et al.]. // JINST. – 2020. – 15 – №12 – P.12003.

Эксперимент JUNO

1. Combined sensitivity of neutrino mass ordering with JUNO, the IceCUBE upgrade and PINGU / M.G. Aartsen et al. // Phys. Rev. D. – 2020. – 101. – 032006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.032006>.
2. Feasibility and physics potential of detecting 8B solar neutrinos at JUNO / Angel Abusleme et al. // Chinese Physics C. – 2020. – 45, №1. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/abd92a>/ arXiv:2006.11760.
3. Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector / A. Abusleme et al. // Nuclear Instruments and Methods A. – 2020. available on-line 6 November 2020 / arXiv: 2007.00023.

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

1. Хабибуллин М. М. Эксперимент T2K: последние результаты и перспективы // Докл. Сессии-конф. Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук (Новосибирск, 10–12 марта 2020 г.). – 2020. – <https://indico.inp.nsk.su/event/26/session/4/contribution/19/>.
2. Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K / K. Abe [et al.] // Phys.Rev. – 2020. – D101 – №11 – P.112004.
3. Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280 / K. Abe [et al.] // JHEP. – 2020. – №10 – P.114.
4. First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K / K. Abe [et al.] // Phys.Rev. – 2020. – D101 – №11 – P.112001.
5. Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations / K. Abe [et al.] // Nature . – 2020. – 580 – №7803 – P.339-344.
6. Search for electron antineutrino appearance in a long-baseline muon antineutrino beam / K. Abe [et al.] // Phys.Rev.Lett. – 2020. – 124 – №16 – P.161802.

7. First measurement of the charged current $\bar{\nu}_\mu$ double differential cross section on a water target without pions in the final state / K. Abe [et al.] // Phys. Rev. – 2020. – D102 – №1 – P.12007.

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

1. Search for heavy neutral lepton production in K^+ decays to positrons / E. Cortina Gil [et al.] // Phys.Lett. – 2020. – B807 – P.135599.

2. An investigation of the very rare $K^+ \rightarrow \pi^+ \chi \chi$ decay / E. Cortina Gil [et al.] // JHEP. – 2020. – 11 – P.042.

3. Когерентное образование $K^+\pi^0$ -системы на ядрах меди в пучке заряженных каонов на установке ОКА / В.С. Буртовой [и др.] // ЖЭТФ. – 2020. – 158 – вып. 6 (12) – С.1070.

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

1. NOvA Collaboration: M.A. Acero et al. Eur. Phys. J. – 2020. – C80. – 119.

2. A.V. Butkevich. Inclusive electron scattering off ^{12}C , ^{40}Ca , and ^{40}Ar : Effects of the meson exchange currents / A.V. Butkevich, S.V. Luchuk // Phys.Rev. C. – 2020. – 102. – 024602.

3. Search for multimessenger signals in NOvA coincident with LIGO/Virgo detections / M.A. Acero et al. // Phys. Rev. D. – 2020. – 101. – 112006.

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

1. Alexander Nozik. Declarative analysis in “Troitsk nu-mass” experiment // J.Phys.Conf.Ser. – 2020. – 1525. – №1. – 012024.

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

1. Suppression of Penning discharges between the KATRIN spectrometers / M. Aker et. al. // The European physical journal C. – 2020. – 80, №9. – 821. [doi:10.1140/epjc/s10052-020-8278-y](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8278-y)

2. First operation of the KATRIN experiment with tritium / M. Aker et. al. // Eur. Phys. Journal C. – 2020. – 80, № 3. – 264, [doi:10.1140/epjc/s10052-020-7718-z](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7718-z)

3. Quantitative Long-Term Monitoring of the Circulating Gases in the KATRIN Experiment Using Raman Spectroscopy. /M. Aker et. al. // Sensors. – 2020. – 20, №17. – 4827. doi:10.3390/s20174827

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

5. Исследование свойств детектора отраженных электронов (ASPD) как перспективного детектора для установки «Троицк нью-масс» в диапазоне энергий 5-30 кэВ / П. Н. Аруев [и др.] // Журнал технической физики. – 2020. – 4. – 693.

9. Публикации по задаче «Поиск 2К-захвата в Xe-124. Поиск безнейтринного двойного бета распада Mo-100 в составе международной коллаборации AMoRE

1. Improving the Precision of Calibrating a Large Low-background Proportional Counter / V. V. Kazalov et al. // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. – 2020 – 1690 012037. doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012037, arXiv:2010.08106v1.

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

Эксперименты GERDA и LEGEND

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

2. The first search for bosonic super-WIMPs with masses up to 1 MeV/c² with GERDA. GERDA collaboration / M. Agostini et al. // Phys. Rev. Lett. – 2020 – 125. –011801. doi 10.1103/PhysRevLett.125.011801. arXiv:2005.14184 [hep-ex nucl-ex].

3. Modeling of GERDA Phase II data / Agostini et al. // J. High Energ. Phys. – 2020. – 139. [https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2020\)139](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2020)139). e-Print: [arXiv:1909.02522](https://arxiv.org/abs/1909.02522) [nucl-ex].

Эксперимент Double Chooz

4. First Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron capture detection / H de Kerret et al. // Nature Physics. – 2020. – 16. – 558. arXiv:1901.09445 [hep-ex]. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0831-y>.

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

1. Измерение сезонных вариаций горизонтальных мюонов на подземном детекторе LVD / Н.Ю. Агафонова [и др.] // ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. – 2020. – Т. 83, № 1. – С.70–75. DOI: 10.31857/S0044400272001002X.

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

1. Observation of a new Ξ_b^0 state. / Roel Aaij et al. // PhysRevD. – 2021. – 103. – 012004. DOI: 10.1103/PhysRevD.103.012004.

2. Measurement of the relative branching fractions of $B^+ \rightarrow h^+ h'^+ h'^-$ decays. / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 112010.

3. Strong constraints on the $b \rightarrow s \gamma$ photon polarisation from $B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-$ decays. / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 12. – 081. DOI: 10.1007/JHEP12(2020)081

4. Search for the doubly heavy Ξ_{bc}^0 baryon via decays to $D^0 p K^-$. / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 11. – 095. DOI: 10.1007/JHEP11(2020)095.

5. Amplitude analysis of the $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$ decay / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 112003. DOI: 10.1103/PhysRevD.102.112003

6. A model-independent study of resonant structure in $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$ Decays / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 125. – 242001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.242001.

7. First branching fraction measurement of the suppressed decay $\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+$ / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 7. – 071101. DOI: 10.1103/PhysRevD.102.071101.

8. First observation of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \eta_c(1S) p K^-$ / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 11. – 112012. DOI: 10.1103/PhysRevD.102.112012.

9. Observation of Enhanced Double Parton Scattering in Proton-Lead Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8,16$ TeV / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 125. – 21. – 212001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.212001

10. Searches for low-mass dimuon resonances / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 10. – 156. DOI: 10.1007/JHEP10(2020)156.

11. First observation of the decay $B^0 \rightarrow D^0 B^0 \rightarrow D^0 \underline{D}^0 K^+ \pi^-$ / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 5. – 051102. <https://arxiv.org/abs/2007.04280>.

12. Search for CP violation in $\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ decays using model-independent techniques / Roel Aaij et al. // Eur.Phys.J.C. – 2020. – 80. – 10. DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-8365-0.

13. Study of the lineshape of the $\chi_{c1}(3872)$ state / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 9. – 092005. DOI: 10.1103/PhysRevD.102.092005.

14. Study of the $\psi_2(3823)$ and $\chi_{c1}(3872)$ states in $B^+ \rightarrow (J/\psi \pi^+ \pi^-) K^+$ decays / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 08. – 123. DOI: 10.1007/JHEP08(2020)123.

15. Measurement of branching fraction ratios for $B^+ \rightarrow D^{*+} D^- K^+$, $B^+ \rightarrow D^{*+} D^+ K^+$ and $B^0 \rightarrow D^{*-} D^+ K^0$ decays / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 12. – 139. DOI: 10.1007/JHEP12(2020)139.
16. Measurement of the $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda$ angular distribution and the Λ_b^0 polarisation in pp collisions / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 06. – 110. DOI: 10.1007/JHEP06(2020)110.
17. Precision measurement B_c^+ meson mass / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 07. – 123. DOI: 10.1007/JHEP07(2020)123.
18. Observation of New Ξ_c^0 Baryons Decaying to $\Lambda_c^+ K^-$ / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 22. – 222001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.222001.
19. Measurement of the shape of the $B_s^0 \rightarrow D_s^{*-} \mu^+ \nu_\mu$ differential decay rate / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 12. – 144. DOI: 10.1007/JHEP12(2020)144.
20. Measurement of CP-Averaged Observables in the $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ Decay / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 125. – 1. – 011802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.011802.
21. Search for the Rare Decays $B_s^0 \rightarrow e^+ e^-$ and $B^0 \rightarrow e^+ e^-$ / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 21. – 211802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.211802.
22. Search for the lepton flavour violating decay $B^+ \rightarrow K^+ \mu^- \tau^+$ using B_{s2}^{*0} decays / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 06. – 129. DOI: 10.1007/JHEP06(2020)129.
23. Measurement of CP observables in $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ and $B^\pm \rightarrow D\pi^\pm$ with $D \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ decays / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 06. – 058. arxiv.org/abs/2002.08858.
24. Measurement of the branching fraction of the decay $B_s^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 1. – 012011. <https://arxiv.org/abs/2002.08229>.
25. Observation of a new baryon state in the $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ mass spectrum / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 06. – 136. <https://arxiv.org/abs/2002.05112>.
26. Strong constraints on the $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ branching fraction / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 125. – 23. – 231801. <https://arxiv.org/abs/2001.10354>.
27. Measurement of $|V_{cb}|$ with $B_s^0 \rightarrow D_s^{*-} \mu^+ \nu_\mu$ Decays / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 101. – 7. – 072004. <https://arxiv.org/abs/2001.03225>.
28. First observation of excited Ω_b^- states / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 8. – 082002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.082002>.
29. Search for CP violation and observation of P violation in $\Lambda_b^0 \rightarrow p \pi^- \pi^+ \pi^-$ decays / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 102. – 5. – 051101. <https://arxiv.org/abs/1912.10741>.
30. Test of lepton universality with $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- l^+ l^-$ decays / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 05. – 040. <https://arxiv.org/abs/1912.08139>.

31. Measurement of CP violation in $B^0 \rightarrow D^{*\pm}D^\mp$ decays / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 03. – 147. <https://arxiv.org/abs/1912.03723>.
32. Isospin amplitudes in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda(\Sigma^0)$ and $\chi_b^0 \rightarrow J/\psi \chi^0(\Lambda)$ decays / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 11. – 111802. <https://arxiv.org/abs/1912.02110>.
33. Observation of the semileptonic decay $B^+ \rightarrow p\bar{p}\mu^+\nu_\mu$ / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 03. – 146. <https://arxiv.org/abs/1911.08187>.
34. Precision measurement of the χ_{cc}^{++} mass / Roel Aaij et al. // JHEP. – 2020. – 02. – 049. <https://arxiv.org/abs/1911.08594>.
35. Determination of quantum numbers for several excited charmed mesons observed in $B^- \rightarrow D^{*+}\pi^-\pi^-$ decays / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 101. – 3. – 032005. <https://arxiv.org/abs/1911.05957>.
36. . Measurement of the $\eta_c(1S)$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / Roel Aaij et al. // Eur.Phys.J.C. – 2020. – 80. – 3. – 191. <https://arxiv.org/abs/1911.03326>.
37. Updated measurement of decay-time-dependent CP asymmetries in $D^0 \rightarrow K^+K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ decays / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 101. – 1. – 012005. <https://arxiv.org/abs/1911.01114>.
38. Measurement of Ξ_{cc}^{++} production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / Roel Aaij et al. // Chin.Phys.C. – 2020. – 44. – 2. – 022001. <https://arxiv.org/abs/1910.11316>.
39. Measurement of $f_s f_u$ Variation with Proton-Proton Collision Energy and B-Meson Kinematics / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 12. – 122002. <https://arxiv.org/abs/1910.09934>.
40. Search for $A' \rightarrow \mu^+\mu^-$ Decays / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 4. – 041801. <https://arxiv.org/abs/1910.06926>.
41. Search for the doubly charmed baryon χ_{cc}^+ / Roel Aaij et al. // Sci.China Phys.Mech.Astron. – 2020. – 63. – 2. – 221062. <https://arxiv.org/abs/1909.12273>.
42. Observation of Several Sources of CP Violation in $B^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$ Decays / Roel Aaij et al. // PhysRevLett. – 2020. – 124. – 3. – 031801. <https://arxiv.org/abs/1909.05211>.
43. Amplitude analysis of the $B^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$ decay / Roel Aaij et al. // Phys.Rev.D. – 2020. – 101. – 1. – 012006. <https://arxiv.org/abs/1909.05212>.
44. Measurement of $\psi 2S$ production cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 13 TeV / Roel Aaij et al. // Eur.Phys.J.C. – 2020. – 80. – 3. – 185. <https://arxiv.org/abs/1908.03099>.