

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

УДК 539.1, 539.12, 539.123
Рег. № АААА-А16-116022510114-8
Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

Л.В. Кравчук

«31» января 2019 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 2018 год)

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

М.В. Либанов

«31» января 2019 г.

Москва 2019 г.

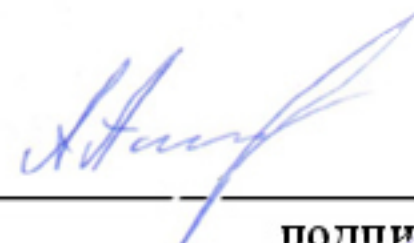
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
зам.директора по научной
работе, д.ф.-м.н., профессор
РАН


31.01.2019
подпись, дата

М.В. Либанов
(введение, заключение)

Зав. отделом, д.ф.-м.н.


31.01.2019
подпись, дата

Н.В. Красников
(разделы 1,2)

Зав. отделом, академик РАН,
д.ф.-м.н.


31.01.2019
подпись, дата

И.И. Ткачев
(разделы 7, 8, 9, 10, 11, 12,)

Зав. отделом, д.ф.-м.н.


31.01.2019
подпись, дата

Ю.Г. Куденко
(раздел 3)

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


31.01.2019
подпись, дата

О.Г. Ряжская
(раздел 4)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 131 с., 75 рис., 6 табл.

Ключевые слова: БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР (БАК, LHC), СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ (СМ), ПРАВЫЙ W-БОЗОН, АДРОННЫЕ КАЛОРИМЕТРЫ, ЯДЕРНАЯ МАТЕРИЯ, КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, ФИЗИКА КАОНОВ, ФИЗИКА В-МЕЗОНОВ, РЕДКИЕ ПРОЦЕССЫ, С,Р,Т-СИММЕТРИИ И ИХ НАРУШЕНИЕ, ФИЗИКА ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА, СТЕРИЛЬНОЕ НЕЙТРИНО, БЕТА-РАСПАД, КОСМОЛОГИЯ, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2018 год.

Выполнялись работы по программе 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 пертурбативной КХД. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели».

Объектом исследования являются Стандартная модель модели физики элементарных частиц, а также модели физики частиц за ее пределами. В частности рассматриваются суперсимметричные теории и теории с дополнительными пространственными измерениями, расширения Стандартной модели, содержащие стерильные нейтрино, в рамках которых можно интерпретировать экспериментальные данные об осцилляциях нейтрино и темной материи, модифицированные теории гравитации, в том числе теории с нарушенной Лоренц-инвариантностью, процессы, происходившие в ранней Вселенной, такие как процессы фазового перехода, генерации барионной асимметрии, образования структур, процессы, происходившие на инфляционной стадии.

Цель работы — построение новых теорий и моделей физики высоких энергий,

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

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

2. Задача «Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРН, в том числе CMS, NA61, NA62, NA64 и др. Подготовка эксперимента SHiP: уточнение чувствительности эксперимента SHiP к тяжёлым нейтральным лептонам (стерильные нейтрино)».

Объектом исследования являются процесс рождения и возможность экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

Целью работы является анализ данных эксперимента CMS, полученных в 2018 г. при энергии сталкивающихся пучков протонов до 13 ТэВ, с целью выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, проверки предсказаний Стандартной модели и поиска возможных отклонений. Моделирование сигнальных событий от распадов W и Z с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. Моделирование фоновых событий с сигнатурой «два лептона и две струи».

Методы выполнения работы: Разработка методов выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов в эксперименте CMS. Продолжение анализа данных эксперимента CMS, собранных в 2016-2018 гг. Создание и поддержка необходимого программного обеспечения.

В результате анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2010-12 гг. и при полной светимости БАК в 2014-18 гг. были получены предварительные ограничения на массу правого бозона W_R около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 1800 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W -бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, в 3,7 раза.

Разработана основа ПО для контроля измерительной аппаратуры, реконструкции и анализа физических объектов высокого уровня, доступных наблюдению в эксперименте CMS. Выполнены работы по созданию программного обеспечения для стенда по изучению характеристик кремниевых фотоумножителей для адронного калориметра детектора CMS.

Результаты, полученные в эксперименте CMS в физических сеансах измерений по поиску тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, уникальны и обозначают передовой рубеж современной науки на мировом уровне.

В задаче «Эксперимент NA64» показано, что в зависимости от массы темного фотона и энергии сталкивающихся электронов возникают существенные отличия от дифференциального сечения, вычисленного в приближении эквивалентных фотонов.

В 2018 г проводился набор статистического материала в сеансе на установке NA64. По решению комитета Research Board CERN рекомендовано продолжение набора статистики, позволяющее обнаружить массивные бозоны с массами вплоть до 1 ГэВ. Последние предварительные результаты, полученные в сеансе 2018 г., позволили сделать вывод о возможности расширения чувствительности 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 типичного верхнего предела на бозон-фотонную константу связи $< 6,7 \times 10^{-6}$ на 95%-ном доверительном уровне. Точное значение предела зависит от значения интенсивности пучка в 2018 г.

Полученные коллаборацией NA64 предварительные результаты дают основание получить 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.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, в 2018 году были проведены длительные сеансы по набору статистики, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Продолжается анализ полученных данных как по основной искомой моде распада каонов, так и по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, а также по поиску различных редких мод каонного распада.

В 2018г. на установке NA61/SHINE в ЦЕРНе завершена программа экспериментов по поиску и исследованию начала деконфайнмента и поиску критической точки фазового перехода в сильно взаимодействующей ядерной материи. Начиная с 2011г., на этой установке был выполнен ряд экспериментов по измерению выходов заряженных частиц в столкновениях легких и тяжелых ядер при энергиях налетающих частиц в диапазоне энергий от 13 до 150 ГэВ.

В апреле – мае 2018г. силами ИЯИ проведена калибровка переднего адронного калориметра на пучке мюонов и адронов перед началом физических сеансов 2018г.

Адронный калориметр использовался во всех физических сеансах 2018г., как на пучках протонов, так и на пучках ядер свинца. Группа ИЯИ, кроме подготовки и калибровки калориметра в тестовом сеансе перед началом физических экспериментов, осуществляла постоянную экспертную поддержку функционирования калориметра во время сеансов, вела постоянный мониторинг процесса набора и качества получаемых данных с калориметра, дежурила в регулярных сменах во время экспериментов. Всего группа ИЯИ в течение 2018г. отдежурила около 60 смен, включая смены во время тестового сеанса.

Группой ИЯИ в 2018г. разработан проект и начаты работы по модернизации переднего адронного калориметра PSD (ProjectileSpectatorDetector) установки NA61/SHINE, которые предусматривает реконструкцию действующего калориметра и создание дополнительного нового переднего калориметра. Планируется, что все работы по модернизации адронного калориметра установки NA61, включая их монтаж, установку фотодетекторов, аналоговой и цифровой электроники, будут проведены в течение 2019-2020гг силами ИЯИ РАН в ЦЕРНе. В течение 2019 – 2020гг будет проведена также модернизация системы считывания модулей калориметра и ее интеграция с общей системой считывания DAQ эксперимента NA61. Также будут проведены тесты на космических мюонах и тестовых пучках ускорителя SPS в ЦЕРНе.

В мае 2018г. был уже собран новый передний адронный калориметр из модулей калориметра CBM, которые были изготовлены в ИЯИ РАН, и проведено исследование его отклика на пучках установки NA61. После проведения модернизации также и основного калориметра NA61, новую систему калориметров можно будет использовать в экспериментах на пучке ионов свинца с интенсивностью в 10 раз превышающую интенсивность пучка в текущих экспериментах. В 2018г. по данной теме опубликовано 4 статьи в реферируемых журналах, представлены 2 доклада на международных конференциях и представлены 10 докладов на различных совещаниях коллаборации NA61/SHINE.

В рамках подготовки к эксперименту SHIPпроделано теоретическое исследование по уточнению чувствительности этого эксперимента к стерильным нейтрино.

В рамках проекта эксперимента MATHUSLA исследована возможность наблюдения с помощью этого планируемого в ЦЕРН эксперимента стерильных нейтрино и легких сголдстино.

3. Задача «Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb. Набор статистики и обработка физических данных».

Объектом исследования работы являются редкие распады В-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. В 2018 г. продолжен набор данных на энергии пучков 6.5 ТэВ, было набрано 2.18/fb интегральной светимости. Также продолжается обработка набранных ранее данных, получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе измерение вероятности редкого распада $B_s \rightarrow \mu\mu$, наиболее точное измерение угла γ унитарного треугольника матрицы смешивания из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов, проверка «лептонной универсальности», первое наблюдение двух новых массовых структур, согласующихся с резонансами с конечными состояниями $\Lambda_0 b\pi^-$ и $\Lambda_0 b\pi^+$, поиски двумюнных резонансов в области масс Υ -резонанса, первое наблюдение распада $B_s^0 \rightarrow K^*0 \mu^+ \mu^-$ и ряд других. В эксперименте LHCb Институт ядерных исследований РАН участвует в разработке и создании калориметрической системы, ранее в ИЯИ был изготовлен предливневый детектор. За время эксплуатации предливневого детектора не было выявлено существенных изменений параметров элементов детектора. В 2018 г. сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных фотоумножителей калориметрической системы. Кроме обеспечения текущей работы калориметра группа ИЯИ РАН также проводит работы по подготовке эксперимента к

работе на повышенной светимости. Так, проведена разработка и изготовлены платы управления высоким напряжением, мониторинг системой и калибровкой калориметров. Также проведена подготовка к демонтажу предливневого детектора.

4. Задача «Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов».

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, в 2018 году были проведены длительные сеансы по набору статистики, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Продолжается анализ полученных данных как по основной искомой моде распада каонов, так и по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, а также по поиску различных редких мод каонного распада.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов продолжился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редких распадов положительно заряженных каонов, запрещенных в первом порядке в Стандартной Модели и возможных только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949. Эта методика выделения редких каонных распадов использовались при анализе данных эксперимента NA62 (ЦЕРН).

Кроме того, разрабатывалась новая теоретическая модель регенерации каонов.

5. Задача «Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонном ускорительном комплексе J-PARC».

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы в нейтринной и антинейтринной модах (февраль – май 2018 года), в которых сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие. Проводится дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2018гг., по измерению как осцилляционных параметров нейтрино и антинейтрино, так и сечений взаимодействий нейтрино с веществом. Эксперимент T2K вышел на изучение нарушения CP симметрии в нейтринных взаимодействиях (в лептонном секторе), которое до сих пор было обнаружено только в кварковом секторе, и получил результат, исключающий сохранение CP симметрии в нейтринных осцилляциях с уровнем достоверности 95%.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой завершено создание магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, состоящего из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми

располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами (сцинтилляционные детекторы разработаны и собраны в ИЯИ РАН). В феврале 2018 г. детектор Baby-MIND был полностью смонтирован на нейтринном канале J-PARC, где он является одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K(J-PARC). Была проведена настройка и запуск всего детектора Baby-MIND как от космических лучей, так и в ходе набора нейтринных данных эксперимента T2K.

В рамках Нейтринной платформы ЦЕРН проводятся НИОКР работы по созданию вето- и триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, кроме того, группа ИЯИ разработала и создала прототип 3D сегментированного сцинтилляционного детектора (SuperFGD), который будет установлен в качестве нейтринной мишени в обновленном ближнем детекторе ND280. Прототип детектора, состоящий из 10 тысяч сцинтилляционных кубиков объемом 1 см^3 каждый, дважды был протестирован на канале T9 в ЦЕРНе: в июне-июле и августе-сентябре 2018 г., проводится анализ данных для получения основных параметров детектора. В ходе НИОКР был разработан метод изготовления сцинтилляционных кубиков методом литья под давлением с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон.

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). В 2018 г. получены 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 «Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс в бета-распаде газообразного трития в области масс 0,1–8 кэВ, как кандидатов на роль частиц тёплой тёмной материи».

Основным результатом проведенной в 2018 году работы является проведение двух сеансов измерений. Продолжен набор статистики прецизионного измерения бета спектра

третия с целью поиска сигналов стерильного нейтрино в диапазоне энергии электронов 12-18.5 кэВ. Данные находятся в стадии обработки. Параллельно с основной системой регистрации использовался вариант с полной оцифровкой сигналов с детектора. Это позволило полностью устранить проблему учета мертвого времени электроники и сузить временной интервал сигналов с наложениями. Выполнен ряд запланированных расчетных работ по исследованию отклика детектора, особенно в около-пороговой области. В апрельском сеансе проведены полноценные измерения тритиевого спектра с использованием пиксельного детектора нового типа на основе кремниевого дрейфового детектора (SDD). SDD были изготовлены в Мюнхене, Германия, в рамках коллаборации TRISTAN – «Троицк ню-масс». Пиксели имели размер 2 мм. Измерения продемонстрировали, что такой тип детектора существенно улучшит качество данных при измерении бета спектра трития и дает возможность измерять в интервале бета спектра 12-18.5 кэВ. Данные обрабатываются. В течение 2018 года постоянно проводились работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования.

8. Задача «Участие в проведении измерений массы нейтрино на установке КАТРИН в диапазоне 1 эВ».

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета- распаде трития в эксперименте КАТРИН. Дается краткое описание состояния проекта. В 2018 году выполнены следующие работы. Рассчитаны поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике. Рассматривались систематические поправки при измерении спектра неупругих потерь электронов. Предложен эксперимент по исследованию зависимости сечения возбуждения электронных состояний молекул трития от энергии налетающих электронов. Велась подготовка программного обеспечения для проектов КАТРИН и TRISTAN (поиск стерильного нейтрино). Проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления, подбор оптимального предусилителя.

9. Задача «Исследование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Разработка методики регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с помощью низкофонового газового детектора. Поиск массивных «скрытых» фотонов с помощью мультикатодного счётчика».

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

электронов, эмитируемых из алюминиевого катода при разных температурах. Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода $(0.81 \pm 0.08) \times 10^{-4}$ Hz/cm⁻². По результатам измерений получен предел на константу смешивания для скрытых фотонов. Описание работы мультикатодного счетчика и его технические характеристики опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods A 910 (2018) 164. Полученные результаты доложены на международной конференции ICPPA-2018 в г. Москва и подготовлены к печати в сборнике трудов этой конференции.

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

Двойной безнейтринный бета распад ядер изучался в международном эксперименте GERDA(Италия) с участием ИЯИ РАН. Представлен отчёт о работе в течение 2018 года российских учёных из ИЯИ РАН в эксперименте GERDA-II, расположенного в подземной Национальной лаборатории Италии Гран-Сассо (LNGSINFN). Целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа Ge-76 ($0\nu\beta\beta$ распада).

Осцилляции реакторных нейтрино изучались в международном эксперименте Double Chooz (Франция) с участием ИЯИ РАН. Детекторы Double Chooz (дальний и ближний) закончили набор статистики. Продолжается анализ данных. Получено новое значение угла смешивания q_{13} при анализе событий реакции обратного бета распада с захватом нейтрона на водороде и гадолинии. Комбинированная величина для захватов нейтрона на водороде и гадолинии составляет $\sin^2 2q_{13} = 0.105 \pm 0.014$. Улучшена систематическая погрешность измерения. Измерены выходы космогенных изотопов ⁸He и ⁹Li при захвате мюонов ядрами углерода ¹²C и ¹³C: 7.98 ± 0.52 и 4.37 ± 0.49 соответственно для ближнего и дальнего детекторов в единицах $10^{-8} \text{ m}^{-1}\text{t}^{-1}\text{cm}^2$. Ведется анализ дополнительных источников антинейтрино в реакторных экспериментах.

Осцилляции реакторных нейтрино будут изучаться в международном эксперименте JUNO(Китай) с участием ИЯИ РАН. Представлены результаты работы по созданию детектора JUNO в 2018 году.

11. Задача «Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ¹²⁴Xe. Продолжение измерений с образцом ¹²⁴Xe. Обработка данных измерений 2014-2018гг».

В БНО ИЯИ РАН проводится эксперимент по поиску 2К-захвата ¹²⁴Xe. Методика основана на использовании большого медного пропорционального счетчика заполненного ксеноном, содержащим изотоп ¹²⁴Xe. В 2018 году продолжился набор экспериментальных данных, на данный момент полная статистика составляет более 23000 часов работы

детектора, обработаны данные за 15427 часов. На основании полученных данных установлен предел на период полураспада Xe-124 относительно 2K-захвата, на уровне $7.7 \cdot 10^{21}$ лет (90% У.Д.).

Обновлен результат эксперимента по поиску 2K-захвата ^{78}Kr , период полураспада оценен на уровне $T_{1/2} = [5.7^{+1.3}_{-0.7}(\text{stat.}) \pm 0.3(\text{syst.})] \cdot 10^{22}$ лет. Так же, измерено значение вероятности образования двойной К-вакансии в ^{81}Kr в результате К-захвата: $P_{\text{KK}} = [5.7 \pm 0.8(\text{stat.}) \pm 0.4(\text{syst.})] \cdot 10^{-5}$.

12. Задача «Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии, астрофизика космических лучей. В том числе теоретическое исследование приливного разрушения аксионных сгустков темной материи в гало Галактики и поиск возможных наблюдательных эффектов от шлейфов разрушенных аксионных сгустков наземными и орбитальными детекторами».

Была рассмотрена задача о метрике черной дыры, находящейся в расширяющейся Вселенной на стадии радиационного доминирования. В пределе малого размера черной дыры были найдены самосогласованные выражения для метрических коэффициентов и для распределения движения вещества на больших расстояниях от черной дыры. Это результат может оказаться полезным для исследования поведения темной материи на ранних этапах эволюции Вселенной.

13. Задача «Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо. Обработка новых экспериментальных данных с установок LVD.

На подземных скintiлляционных детекторах LVD и OPERA/NEWSdm (Гран Сассо, Италия) ведутся исследования в области нейтринной физики, физики космических лучей и астрофизики. Основной целью эксперимента LVD является поиск нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд в Галактике и Магеллановых облаках. Регистрация всех типов нейтрино является уникальной особенностью этих установок.

По данным работы российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 41 года (1977 - 2018) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 18.2 года на 90% уровне достоверности. Получены сезонные вариации интенсивности мюонов за 25 лет по данным детектора LVD. Найдены максимумы и минимумы интенсивности мюонов.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	13
ВВЕДЕНИЕ	16
1. Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов пертурбативной КХД. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели.....	31
2. Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРН, в том числе CMS, NA61, NA62, NA64 и др. Подготовка эксперимента SHiP: уточнение чувствительности эксперимента SHiP к тяжёлым нейтральным лептонам (стерильные нейтрино).	39
2.1. Работы по модернизации адронного калориметра	39
2.1.1. Участие в работах по фотоприемникам адронного калориметра.....	39
2.1.2. Тестирование линеек КФЭУ для модернизации адронного калориметра.....	40
2.2. Моделирование отклика детектора CMS	43
2.3. Детектирование правого W-бозона и тяжелого нейтрино.....	44
2.4. Разработка алгоритмов подавления шумов для адронного калориметра детектора CMS	45
2.4.1. Основные фильтры подавления шумов адронного калориметра	46
2.4.2. Использование асимметрии сигнала для подавления шумов	48
2.5. Результаты работы и достижения по эксперименту NA64.....	50
2.5.1. Статус эксперимента NA64 в 2018 г.....	50
2.5.2. Измерения примеси адронов на установке NA64	51
2.5.3. Результаты по поиску сигнала в эксперименте в 2018 г.....	52
2.5.4. Повышение чувствительности установки для дальнейшего поиска A'	53
2.5.5. ^8Be аномалия: Продолжение эксперимента по поиску распада $X \rightarrow e^+e^-$	54
2.6. Эксперимент NA61	56
2.7. Подготовка к эксперименту SHiP	62
2.8. Участие в проекте планируемого эксперимента MATHUSLA	62
3. Изучение редких распадов B-мезонов в эксперименте LHCb. Набор статистики и обработка физических данных.....	62
3.1. Основные физические результаты, полученные LHCb в 2018 г.....	63
3.2. Поиски дву-мюонных резонансов в области масс Y -резонанса [3].....	64

3.3.	Первое наблюдение распада $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ [4].	65
3.4.	Обеспечение работоспособности сцинтилляционно-падового и предливневого детектора в процессе набора данных в 2018 г.	66
4.	Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов.	79
5.	Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонном ускорительном комплексе J-PARC.	81
5.1.	Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC	81
5.2.	Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино.	82
5.3.	Проект Нейтринная платформа NP05	82
6.	Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Проведение сеансов в экспериментах NOvA с пучком мюонных антинейтрино. Набор данных на детекторах этих экспериментов.	83
6.1.	Регистрация мюонных нейтрино.	83
6.2.	Регистрация электронных нейтрино	83
6.3.	Теоретические исследования	84
7.	Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс в бета-распаде газообразного трития в области масс 0,1–8 кэВ, как кандидатов на роль частиц тёмной материи.	84
7.1.	Моделирование отклика кремниевого детектора на электроны с энергией до 20 кэВ.	84
7.2.	Набор статистики. Проведение измерений бета спектра трития с использованием кремниевого детектора дрейфа – SDD.	85
8.	Участие в проведении измерений массы нейтрино на установке КАТРИН в диапазоне 1 эВ.	87
8.1.	Проект КАТРИН	87
8.2.	Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН	90
8.2.1.	Систематические погрешности связанные с спектром неупругих потерь электронов при рассеянии на молекуле трития.	90
8.2.2.	Разработка программного обеспечения проекта КАТРИН и обработка данных.	91
8.2.3.	Измерение спектра неупругих потерь электронов при рассеянии на молекуле трития.	92
8.2.4.	Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино.	94

9. Исследование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Разработка методики регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с помощью низкофонового газового детектора. Поиск массивных «скрытых» фотонов с помощью мультикатодного счётчика.....	95
Дополнительная литература:	99
10. Поиск двойного безнейтриного бета распада изотопа ^{76}Ge . Анализ результатов второй фазы эксперимента GERDA.....	100
10.1. Эксперимент GERDA	100
10.2. Осцилляции реакторных нейтрино	103
10.3. Эксперимент JUNO	104
11. Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ^{124}Xe . Продолжение измерений с образцом ^{124}Xe . Обработка данных измерений 2014-2018гг.....	105
12. Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии, астрофизика космических лучей. В том числе теоретическое исследование приливного разрушения аксионных сгустков темной материи в гало Галактики и поиск возможных наблюдательных эффектов от шлейфов разрушенных аксионных сгустков наземными и орбитальными детекторами.	106
13. Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо. Обработка новых экспериментальных данных с установок LVD.	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
ПУБЛИКАЦИИ	121

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов пертурбативной КХД. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели.»

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

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

Важным направлением исследований является теоретический поиск характерных процессов и явлений (сигнатур) возможных расширений Стандартной Модели физики элементарных частиц (СМ). С их помощью получены новые ограничения на параметры таких моделей из совокупности имеющихся экспериментальных данных, а также определены оптимальные пути поиска указанных сигнатур для действующих и планируемых экспериментов в этой области. Задача поиска сигнатур процессов за рамками СМ требует повышения точности теоретических расчетов таких процессов. Прецизионные расчеты необходимы также для уточнения с их помощью параметров СМ, в том числе нейтринного сектора.

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

Роль группы симметрий в теоретико-групповом подходе к квантовым интегрируемым системам играют квантовые группы. Наиболее интересными среди них являются квантовые алгебры петель. Определяющие свойства квантовой интегрируемой системы вытекают из характеристик используемых представлений квантовой группы, с которой система ассоциирована. Эти свойства обычно выражаются функциональными уравнениями для объектов интегрируемости (таких, например, как матрица монодромии и трансфер-матрица). Следовательно, в рамках алгебраического подхода исследование квантовой интегрируемой системы сводится к изучению функциональных соотношений между их объектами интегрируемости. Поэтому исследование представлений квантовых групп и соответствующих функциональных соотношений представляет собой важнейшую задачу в данной области математической физики. Более того, решение этой задачи закладывает математическую основу для последующего вычисления корреляционных функций в квантовых интегрируемых системах.

2. Задача «Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРН, в том числе CMS, NA61, NA62, NA64 и др. Подготовка эксперимента SHiP: уточнение чувствительности эксперимента SHiP к тяжёлым нейтральным лептонам (стерильные нейтрино)».

В 2018 г. сотрудники Лаборатории моделирования физических процессов Отдела физики высоких энергий принимали участие в исследованиях по теме «Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРНе» [721/652 Ч 2015-2017 Головной МФП Научный руководитель Николай Валерьевич Красников] и по теме «Экспериментальные исследования на детекторе Компактный мюонный соленоид (CMS)» [772/780 2016-2020 Головной МФП Координатор Виктор Анатольевич Матвеев; Научный руководитель Николай Валерьевич Красников]. В соответствии с планом работ проводились работы по модернизации адронного калориметра детектора «Компактный мюонный соленоид» (CMS), выполнялось моделирование отклика детектора CMS на процессы новой физики, принималось активное участие в эксперименте NA64 на ускорителе SPS по поиску лёгкой тёмной материи.

Планируемый результат выполнения работ по темам в 2018 г. достигнут, начата замена гибридных фотодиодов модулей HB, HE, HO адронного калориметра детектора CMS на кремниевые фотоумножители, представлен отчёт. Проведены работы по изучению возможности детектирования (определение потенциала открытия) правого W -бозона и тяжёлого нейтрино, начаты набор статистики и обработка экспериментальных данных 2016 и 2017 гг. с энергией 13 ТэВ для сигнатуры с двумя изолированными лептонами и двумя адронными ливнями, используемой для поиска правого W_R -бозона и

стерильного нейтрино, представлен отчёт. Проведены работы по разработке усовершенствованной программы реконструкции событий с детектора NA64, по разработке алгоритмов для прецизионного анализа времени срабатывания счётчиков синхротронного излучения, по разработке алгоритмов разделения сигналов с наложением и определения их характеристик. Проведен анализ данных, полученных в сеансе октября-ноября 2017 г. на ускорителе SPS CERN, представлен отчёт. По результатам работ сделано 6 публикаций, в том числе 3 – в реферируемых журналах, входящих в базу WoS.

NA61/SHINE - эксперимент на фиксированной мишени на пучках частиц ускорителя SPS в ЦЕРН, предназначенный для изучения рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях.

Основной целью эксперимента является изучение деконфайнмента и поиск критической точки сильно взаимодействующей материи путем изучения процессов протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений при различных энергиях пучка от 13 до 158 ГэВ.

Программа научно-исследовательских работ эксперимента NA61/SHINE включает три основных направления:

- поиск в релятивистских ядро-ядерных столкновениях и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи [N. Antoniou et al. [NA61/SHINE Collaboration], CERN-SPSC-2006-034]; поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфайнмента,

- измерения сечений выхода заряженных адронов для нейтринной физики;

- измерения сечений в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей.

В 2018г. на установке NA61/SHINE в ЦЕРНе завершена программа экспериментов по поиску и исследованию начала деконфайнмента и поиску критической точки фазового перехода в сильно взаимодействующей ядерной материи. Начиная с 2011г., на этой установке был выполнен ряд экспериментов по измерению выходов заряженных частиц в столкновениях легких и тяжелых ядер при энергиях налетающих частиц в диапазоне энергий от 13 до 150 ГэВ.

3. Задача «Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb. Набор статистики и обработка физических данных».

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 БАК-би, в том числе в изучении и операционном контроле характеристик предливневого и сцинтилляционно-падового детекторов. 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 $2 \cdot 10^{33}/\text{см}^2/\text{сек}$. 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 радиационной стойкости элементов детекторов.

4. Задача «Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов».

Исследование редких распадов элементарных частиц является важной задачей как для расширения наших знаний о природе и свойствах элементарных частиц и их взаимодействий, так и для поиска новых физических явлений.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, в 2018 году были проведены длительные сеансы по набору статистики, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Продолжается анализ полученных данных как по основной искомой моде распада каонов, так и по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, а также по поиску различных редких мод каонного распада.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов продолжился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редких распадов положительно заряженных каонов, запрещенных в первом порядке в Стандартной Модели и возможных только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949. Эта методика выделения редких каонных распадов использовались при анализе данных эксперимента NA62 (ЦЕРН).

5. Задача «Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонном ускорительном комплексе J-PARC».

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы в нейтринной и антинейтринной модах (февраль– май 2018 года), в которых сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие. Проводится дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2018 гг., по измерению как осцилляционных параметров нейтрино и антинейтрино, так и сечений взаимодействий нейтрино с веществом. Эксперимент T2K вышел на изучение нарушения CP симметрии в нейтринных взаимодействиях (в лептонном секторе), которое до сих пор было обнаружено только в кварковом секторе, и получил интересные результаты.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой завершено создание магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, состоящего из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами (сцинтилляционные детекторы разработаны и собраны в ИЯИ РАН). В феврале 2018 г. детектор Baby-MIND был полностью смонтирован на нейтринном канале J-PARC, где он является одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC). Была проведена настройка и запуск всего детектора Baby-MIND как от космических лучей, так и в ходе набора нейтринных данных эксперимента T2K.

В рамках Нейтринной платформы ЦЕРН проводятся НИОКР работы по созданию вето- и триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, кроме того, группа ИЯИ разработала и создала прототип 3D сегментированного сцинтилляционного детектора (SuperFGD), который будет установлен в качестве нейтринной мишени в обновленном ближнем детекторе ND280. Прототип детектора,

состоящий из 10 тысяч сцинтилляционных кубиков объемом 1 см^3 каждый, дважды был протестирован на канале T9 в ЦЕРНе: в июне-июле и августе-сентябре 2018 г., проводится анализ данных для получения основных параметров детектора. В ходе НИОКР был разработан метод изготовления сцинтилляционных кубиков методом литья под давлением с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон.

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

Программа эксперимента NOvA 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 «Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс в бета-распаде газообразного трития в области масс 0,1–8 кэВ, как кандидатов на роль частиц тёплой тёмной материи».

Постановка задачи

Определение числа и абсолютной массовой шкалы нейтрино является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизике. Ненулевая масса для левых активных нейтрино, которая косвенно наблюдалась в экспериментах по осцилляции нейтрино, предполагает существование правых стерильных нейтрино. В настоящее время диапазон возможных значений массы нейтрино для правых нейтрино ничем не ограничен. Предположение о существовании еще одного очень легкого состояния нейтрино в дополнение к трем активным состояниям кажется спорным в стандартной космологии. Поэтому стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько кэВ могут являться естественными кандидатами 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 $S(E) = \sum U_{ei}^2 * S(E, m_i^2)$, 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

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

Существующие лучшие ограничения на U_{e4}^2 , полученные в прямых экспериментах, показаны на рис. 1. В диапазоне масс $m_N 0.1 - 2$ кэВ лучшие пределы были получены нашей группой в Троицке [1,2].

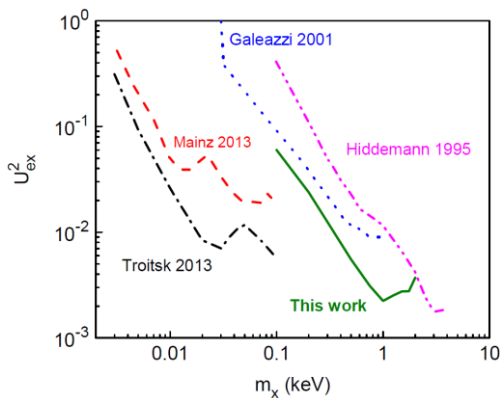


Рис.1. Существующие экспериментальные ограничения (95% CL) на примесь тяжелого нейтрино в электронном нейтрино в зависимости от массы. Сплошная кривая взята из публикации полученных ранее наших данных [2].

В представленном эксперименте, мы расширяем энергетический диапазон измерения бета спектра эти поиски и исследовать стерильными массы нейтрино в диапазоне до 6 кэВ. В 2018 году было проведено два сеанса измерений бета спектра трития (мае-июне и в ноябре) с целью увеличения набранной статистики. В сеансах были задействованы: безоконный тритиевый источник, электростатический спектрометр с магнито-адиабатической коллимацией и криогенный центр по ожижению гелия. Все элементы источника и спектрометра содержат сверхпроводящие магниты, которые заполняются жидким гелием в замкнутом цикле.

Экспериментальная установка

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

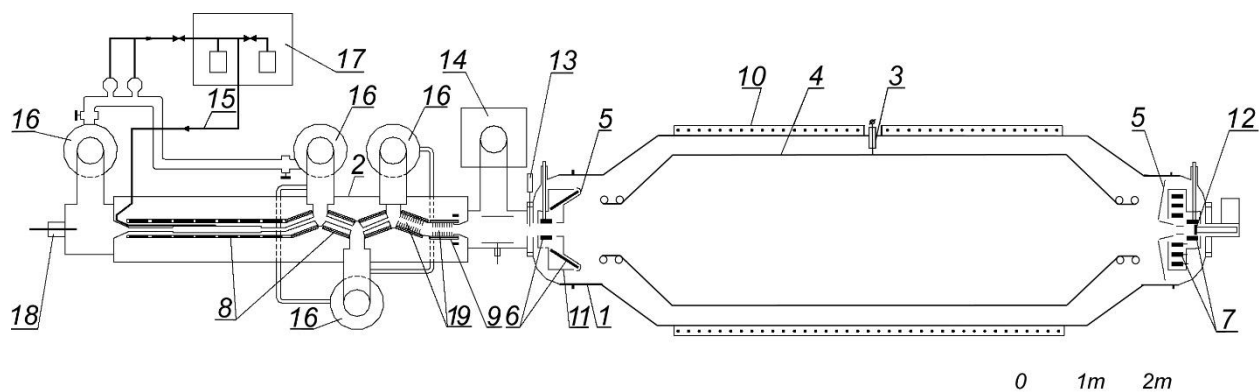


Рис.2. Основные элементы установки, тритиевый источник расположен слева, спектрометр - справа: 8 – безоконный тритиевый источник, 15 – система замкнутой циркуляции трития, 10 – электростатический спектрометр, 12 – регистрирующий детектор.

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

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

Дополнительная литература:

1. A.I. Belevsev et al. / An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from "Troitsk nu-mass" data // JETPLett. 97 (2013) 67, [arXiv:1211.7193].
2. D.A. Abdurashitov et al. /First measurements in search for keV sterile neutrino in tritium beta-decay in the Troitsk nu-mass experiment // JETP Letter105(2017), 753, [arXiv:1703.10779].
3. D.A. Abdurashitov et al. /The current status of "Troitsk nu-mass" experiment in search for sterile neutrino // JINST 10 (2015) T1005, [arXiv:1504.00544].

8. Задача «Участие в проведении измерений массы нейтрино на установке КАТРИН в диапазоне 1 эВ».

Эксперименты по поиску эффективной массы электронного нейтрино.

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития. Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий

сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку позволяет сделать выбор между различными моделями генерации массы, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино определяет динамику эволюции Вселенной.

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

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада (имеет место только для Майорановских нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (не зависят от природы нейтрино, имеют место как для Майорановских, так и Дираковских 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 массы на уровне примерно 2 эВ.

Альтернативный подход к измерению массы электронного нейтрино основан на применении болометрических детекторов для регистрации полного энергосброса 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 [1-3] Этот же процесс исследуется в эксперименте ECHO Collaboration [4].

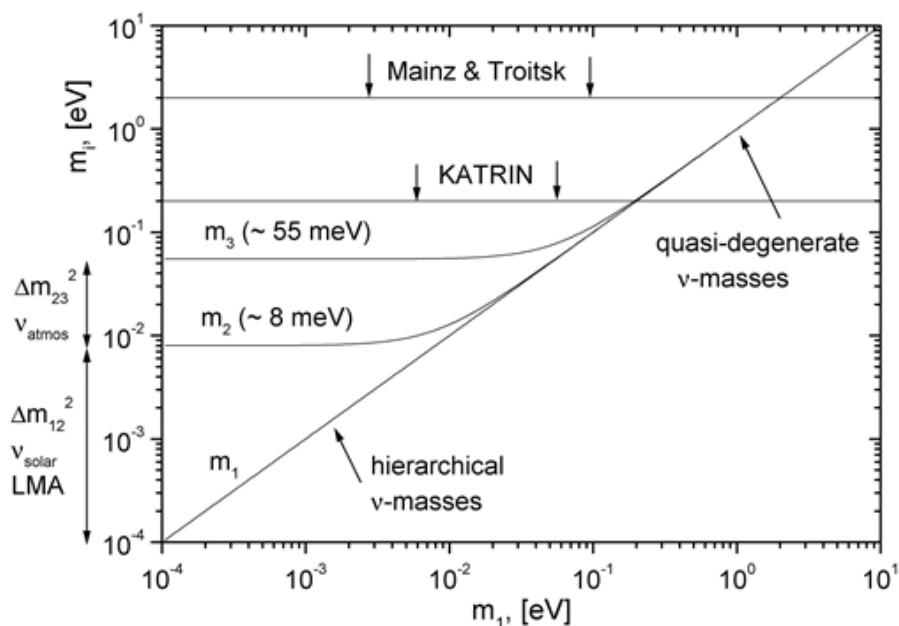


Рис.3. Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия)

Новый подход предложен в Project8 [5]. Предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. Возможность регистрации отдельных электронов была продемонстрирована в эксперименте с электронами конверсии из распада криптона-83м [6].

В 2018 году участники проекта приступили к регистрации электронов бета-распада трития [7]. Планируется получить ограничение на массу нейтрино на уровне $2 \text{ эВ}/c^2$ в 2022 году.

Некоторое время назад обсуждался проект PTOLEMY и даже анонсировалось проведение измерений в 2017 году [8]. Новой информации по проекту не поступало. По-видимому, было признано противоречие предложенного подхода закону сохранения фазового объема. Поэтому по состоянию на конец 2018г., в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино, по-прежнему только проект КАТРИН близок к возможности улучшить ограничение на массу электронного антинейтрино.

Эксперимент по поиску стерильного нейтрино с массой несколько кэВ.

Следует упомянуть новую большую программу, предложенную для установки КАТРИН. Она состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно $1 \text{ эВ}/c^2$ до нескольких кэВ/ c^2 [9].

В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трех состояний с определенной массой. Кроме того, есть основания предполагать существование дополнительных состояний, не участвующих в взаимодействиях в рамках Стандартной модели и называемых поэтому «стерильными». Эти состояния являются смесью массовых состояний отличных от входящих в состав активных нейтрино. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси стерильных состояний в активных нейтрино. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния, спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из этих 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 [10]. 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 исключенным существующими астрофизическим наблюдениями.

Дополнительная литература:

1. E. Ferri et al. / The status of the MARE experiment with ^{187}Re and ^{163}Ho isotopes // Physics Procedia 61 (2015) 227 – 231.
2. Nucciotti, A., Alpert, B., Balata, M. et al. // J Low Temp Phys (2018)
3. Nucciotti, A. e.a. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1056 (2018) 012039
4. <https://www.kip.uni-heidelberg.de/echo/>
5. <http://www.project8.org/>
6. D.M. Asner e.a., // PRL, 114, 162501.
7. http://if-docdb.fnal.gov/cgi-bin/RetrieveFile?docid=272&filename=FermilabSeminar_20180215_Oblath.pdf&version=1
8. <https://www.princeton.edu/main/news/archive/S45/75/52Q77/index.xml?section=science> .9. <http://arxiv.org/abs/1409.0920>
10. <http://arxiv.org/abs/1204.5379>

9. Задача «Исследование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Разработка методики регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с помощью низкофонового газового детектора. Поиск массивных «скрытых» фотонов с помощью мультикатодного счётчика».

Поиск темной материи, имеющей примерно в 5 раз большую массу, чем видимая (барионная) материя, является важной задачей современности. В период с 90-х годов прошлого столетия по настоящее время создан ряд экспериментальных установок, на которых предприняты попытки обнаружения частиц – кандидатов на темную материю. Наибольшие надежды до сих пор возлагались на слабовзаимодействующие частицы (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 [Gianfranco Bertone and Tim M.P.Tait “A new Era in the Quest for Dark Matter” arXiv:1810.01668].

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 2016-2017 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 катодом.
5. Обработаны данные и получены результаты.
6. Результаты опубликованы в печати [1, 2].

В 2018 году нами был достигнут существенный прогресс в разработке мультикатодного счетчика. Разработана усовершенствованная конструкция мультикатодного счетчика с алюминиевым катодом и фокусирующими электродами.

Алюминий был выбран в качестве материала катода, потому что квантовая эффективность для алюминия примерно в полтора раза выше, чем для меди в ультрафиолетовом диапазоне. В результате измерений получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов $(0.81 \pm 0.08) \times 10^{-4}$ Hz/cm⁻². Были получены новые, более сильные ограничения на величину смешивания. Результаты были доложены на международной конференции ICPPA-2018 и подготовлены к печати в сборнике трудов этой конференции. Работа мультикатодного счетчика и его технические характеристики опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods.

Дополнительная литература.

1. А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов / Метод регистрации скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика // Письма в Журнал Технической Физики, 2016, т.42, вып.16, с.102
2. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. / On a Search for Hidden Photon CDM by a Multicathode Counter // Adv.High Energy Phys. 2016 (2016), 2058372

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

Российские учёные участвовали в эксплуатации действующей установки GERDA-II. Смонтирована в лаборатории Гран-Сассо установка по очистке отходов обогащённого германия, образовавшихся при изготовлении германиевых детекторов, и продемонстрирована работоспособность установки. Технология очистки была разработана в России. Начата разработка первой очереди эксперимента LEGEND-200, который является продолжением эксперимента GERDA. Российские учёные принимали активное участие в работе коллаборации GERDA.

Для справки, целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа Ge-76 ($0\nu\beta\beta$ распада). GERDA оперирует с открытыми германиевыми детекторами высокой чистоты из обогащенного Ge-76 (HPGe), погруженными в жидкий аргон. С 2010 г. по 2013 г. проводилась первая фаза эксперимента (GERDA Phase I), в результате которой установлены новые пределы на время жизни безнейтринного двойного бета распада Ge-76 ($> 2.1 \times 10^{25}$ лет), а также для двухнейтринной и майоронной мод распада и переходов на возбужденные уровни.

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 6 апреля 2017 года (doi:10.138/nature21717).

Одновременно проводится разработка нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND, в котором также, как и в GERDA, предусмотрено две фазы. Первая из них (LEGEND-200) с 200 кг детекторов из обогащенного Ge-76 будет проводиться на базе модифицированной установки GERDA.

В 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 активно участвуют в подготовке и проведении эксперимента GERDA.

Ведущийся во Франции эксперимент с реакторными антинейтрино Double Chooz вступил в завершающуюся фазу. За семь лет измерений накоплена большая статистика зарегистрированных событий реакции обратного бета распада (ОБР) на двух детекторах. Преимущество расположения эксперимента на АЭС с только двумя реакторами позволило тщательно измерить фон детекторов во время остановки обоих реакторов. Измерен спектр от распада радиогенного изотопа ^9Li . Измерены выходы космогенных изотопов ^8He и ^9Li при захвате мюонов ядрами углерода ^{12}C и ^{13}C . Выход ^9Li : 7.98 ± 0.52 и 4.37 ± 0.49 соответственно для ближнего и дальнего детекторов в единицах $10^{-8} \text{ г}^{-1} \text{ см}^2$. Выход ^8He оказался близок к нулю. За время работы детекторов получен огромный опыт эксплуатации сцинтилляционных детекторов и изучены их характеристики. Измеренное значение угла смешивания немного превышает величину, полученную в других аналогичных экспериментах Daya Bay и RENO. Отличие находится в пределах двух стандартных отклонений. В ИЯИ РАН предложено объяснение немного большей величины угла смешивания нейтрино, по сравнению с Daya Bay и RENO.

11. Задача «Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ^{124}Xe . Продолжение измерений с образцом ^{124}Xe . Обработка данных измерений 2014-2018гг».

В БНО ИЯИ РАН проводится эксперимент по поиску 2К-захвата ^{124}Xe . Методика основана на использовании большого медного пропорционального счетчика заполненного ксеноном, содержащим изотоп ^{124}Xe . Экспериментальная установка состоит из большого медного пропорционального счетчика окруженного составной пассивной защитой, состоящей из 20см меди, 15см свинца и 5см борированного полиэтилена. Рабочий объем счетчика составляет 8.77 л. Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей снижен более чем в 10^7 раз по сравнению с поверхностью.

12. Задача «Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии, астрофизика космических лучей. В том числе теоретическое исследование приливного разрушения аксионных сгустков темной материи в гало Галактики и поиск возможных наблюдательных эффектов от шлейфов разрушенных аксионных сгустков наземными и орбитальными детекторами».

В современной космологии вопрос о составе темной материи остается не решенным. Среди множества моделей темной материи наиболее популярной является модель в которой ее составляют частицы слабо взаимодействующие с барионной материей. Также не противоречит наблюдательным данным модель где часть темной материи состоит из частиц и часть из первичных черных дыр. В такой модели первичные черные дыры могут выступать центрами сгущения темной материи. В этой связи представляется интересным теоретически рассмотреть вопрос о динамике черных дыр в ранней, радиационно-доминированной, Вселенной.

13. Задача «Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо. Обработка новых экспериментальных данных с установок LVD.

Эксперименты, осуществляемые в подземных лабораториях, органично дополняют фундаментальные исследования элементарных частиц и их взаимодействий, проводимые на ускорителях. Поиск редких явлений в природе является единственным способом достичь, пусть даже косвенным образом, энергий, где начинают проявляться теория объединения сил и квантовые аспекты гравитации. Такие энергии нельзя получить на ускорителях. Подземные лаборатории обеспечивают очень низкий радиоактивный фон, необходимый для поиска этих редких ядерных и субъядерных явлений.

Космические лучи – галактические и внегалактические частицы – постоянно проникают в атмосферу Земли. Взаимодействие этих частиц с атмосферой приводит к возникновению ливней вторичных частиц, что является значительной помехой для экспериментальных установок, предназначенных для изучения чрезвычайно редких явлений и труднодоступных наблюдений частиц, таких как нейтрино или частиц темной материи.

1. Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов пертурбативной КХД. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели.

В настоящее время одной из приоритетных задач современной физики является поиск проявлений существования новой физики вне рамок Стандартной модели. Экспериментально доказанное существование темной материи в нашей Вселенной ставит вопрос о поиске частиц темной материи на ускорителях и теоретическое исследование различных моделей темной материи. Среди множества различных моделей темной материи в последнее время стали популярны модели с легкой темной материей с массами частиц темной материи меньше 1 ГэВ. Эксперимент NA64 в ЦЕРНе, предложенный в 2013 году сотрудниками ИЯИ РАН, является в настоящее время наиболее перспективным экспериментом по поиску легкой темной материи. На нем уже получены рекордные ограничения на параметры модели темного фотона, взаимодействующего с частицами темной материи, и ожидается в ближайшие годы существенное увеличение статистики. Поэтому теоретические исследования, связанные с проблематикой эксперимента NA64, очень важны. Важнейшие результаты, полученные в 2018 году: Проведена обработка экспериментальных данных 2017 года эксперимента NA64 с полной статистикой в $4.3 \cdot 10^{10}$ падающих электронов на мишень. Получены рекордные ограничения на модель темного фотона в роли легкой темной материей. Также проанализированы данные в сигнатуре с распадом темного фотона на электрон позитронную пару и получены новые ограничения на константу связи темного фотона с электроном. Показано, что в $L_{\mu} - L_{\tau}$ модели, объясняющей мюонную $g-2$ аномалию, на однопетлевом уровне возникает ненулевая константа связи электрона с легким Z' бозоном, что позволяет проверить эту модель в эксперименте NA64 в ЦЕРНе. Оценен потенциал открытия мили-заряженных частиц в NA64 эксперименте. Показано, что NA64 эксперимент с мюонным пучком способен получить рекордные ограничения на мили заряженные частицы (см. Рис. 4). Подготовлено предложение для дирекции ЦЕРНа об использовании мюонного пучка в сеансе 2021-2023 годов и оценен потенциал открытия новой физики в этом эксперименте.

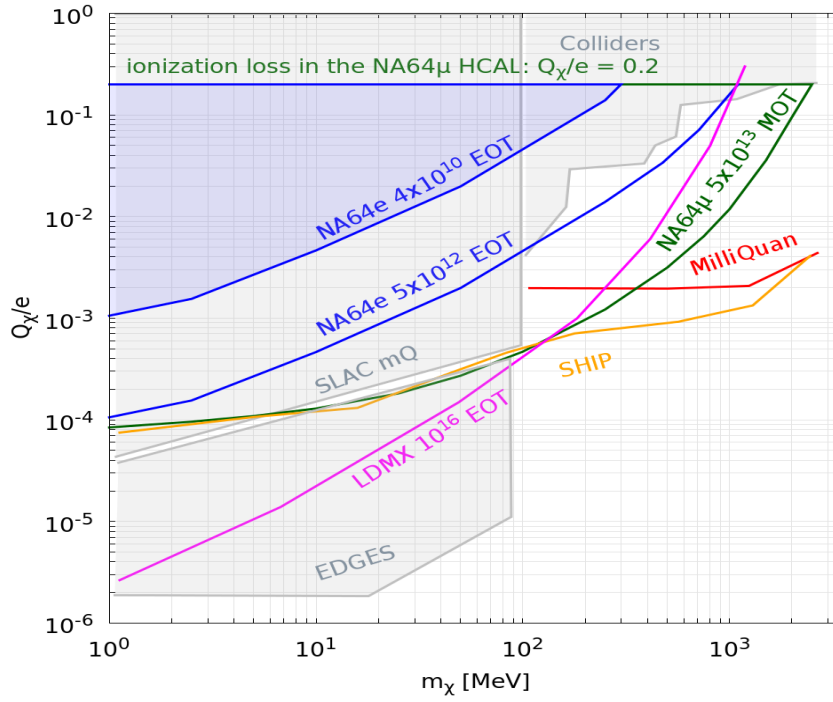


Рис. 4. Верхний предел на долю электрического заряда $Q\chi/e$ гипотетического миллизаряженного фермиона χ в зависимости от его массы m_χ . Регионы, окрашенные в серый цвет, это уже закрытые области параметров модели из экспериментальных данных SLACmQ, EDGES и коллайдерных экспериментов. На рисунке также показаны ожидаемые чувствительности экспериментов MilliQuan и SHIP к миллизаряженным фермионам.

Темный фотон (A'), который взаимодействует с заряженными частицами стандартной модели, может быть рожден в процессе облучения ядер тяжелой мишени высокоэнергетическим электронным пучком: $e-Z \rightarrow e-Z A'$. В нашем исследовании мы вычислили сечение рождения темного фотона на древесном уровне без применения приближения Вайцзеккера-Вильямса (ВВ). Кроме того, мы использовали этот расчет в Монте-Карло моделировании событий рождения A' на экспериментальной установке с фиксированной мишенью NA64. А именно, были смоделированы процессы с потерей энергии электронного пучка в NA64, обусловленные невидимым распадом A' на частицы скрытого сектора. Нами впервые были поставлены ограничения на массу темного фотона в диапазоне от 10 кэВ до 1 ГэВ из экспериментальных данных NA64. Поправки к сечению рождения A' с применением приближения ВВ оказались достаточно существенными для масс ~ 100 МэВ, что согласуется с результатом, описанным в литературе. Результаты опубликованы в 4-ех работах, а также доложены на международных конференциях.

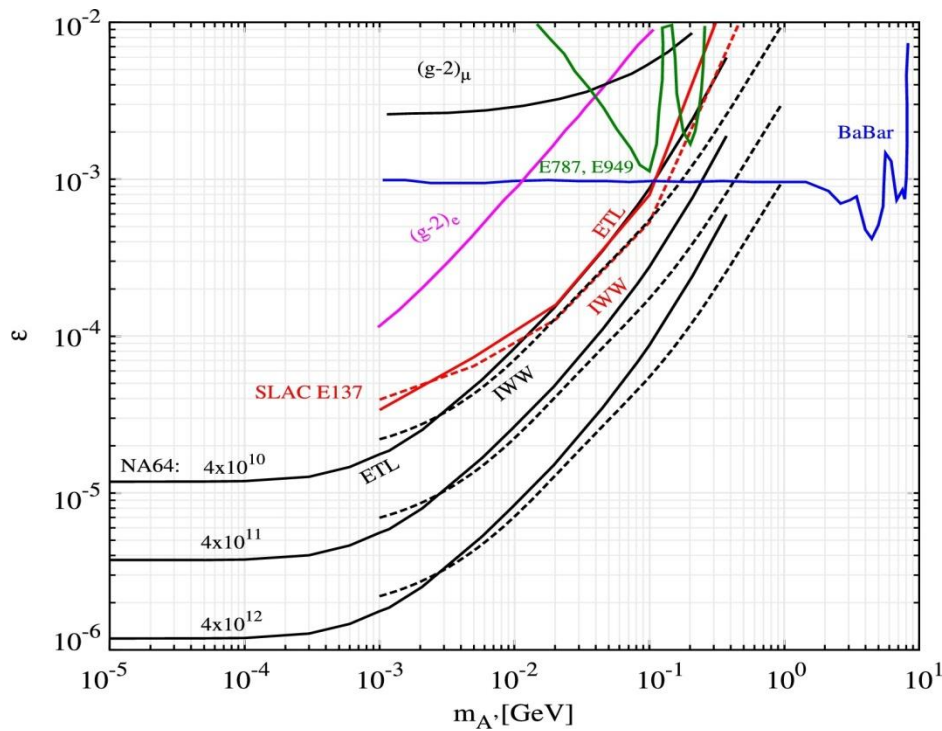


Рис.5.

Ожидаемые ограничения на константу связи темного фотона ϵ и его массу $M_{A'}$ для распада A' в невидимое состояние, посчитанные для свинцовой мишени и энергии электронного пучка $E_0=100$ ГэВ и для различного числа накопленных электронов на мишени. Черные непрерывные линии являются ограничениями NA64 для темного фотона, посчитанными в точном древесном приближении для реакции $e^- Z \rightarrow e^- Z A'$. А черные пунктирные линии это ожидаемые ограничения NA64, вычисленные в приближении Вайцзеккера-Вильямса. На рисунке также показаны ограничения на параметры модели темного фотона из экспериментов BaBar, E787, E949 и SLAC E137.

Квантование гравитации, то есть построение фундаментальной квантовой теории гравитации, является, без преувеличения, центральной задачей современной теоретической физики. Для трех других известных видов фундаментальных взаимодействий (электромагнитных, ядерных слабых и ядерных сильных) квантовые теории успешно построены и дают блестящее согласие с экспериментом. А для гравитации твердо установлена только классическая теория - Общая теория относительности (ОТО). До недавнего времени считалось, что попытки квантования гравитации приводят, по крайней мере, к одной из двух проблем. Либо теория получается неперенормируемой, то есть с неустранимыми сингулярностями, либо теория неунитарна, то есть в ней присутствуют нефизические состояния. В выполненных работах рассмотрена так называемая квадратичная квантовая гравитация, получаемая добавлением к лагранжиану ОТО членов квадратичных по тензору кривизны. Показано, что данная

теория является одновременно и перенормируемой, и унитарной. Таким образом, в работах показано, что квадратичная гравитация является подходящим кандидатом на роль фундаментальной квантовой теории гравитации. Результаты опубликованы в двух работах, а также доложены на международной конференции.

Завершено изучение альтернативного метода вычисления квадратичного действия для возмущений в расширенной теории Хорндески. Суть метода заключается в реконструкции квадратичного действия для возмущений из линеаризованных уравнений в противовес стандартному возмущению действия до второго порядка. Результат исследования в случае расширенной теории заключается в том, что для получения корректных результатов альтернативный метод требует ряда дополнительных вычислений, используемых в стандартном подходе. Таким образом, в расширенной теории Хорндески альтернативный метод становится более трудоемким и существенно использует результаты, получаемые стандартным методом, и поэтому теряет свою привлекательность. Результаты исследования опубликованы в двух работах. Опубликован обзор космологических решений в виде отскока в теории Хорндески и ее расширении. Кроме того, была построена линеаризованная теория в расширенной теории Хорндески, что является обобщением известных результатов для наиболее общей теории Хорндески. Полученные новые условия устойчивости качественно отличаются от известных в общей теории Хорндески, и позволяют обойти теорему, которая в случае общей теории Хорндески запрещает существование несингулярных всюду устойчивых решений (т.е. таких, в которых ни в одной точке пространства не возникает дисперсионных и градиентных неустойчивостей). В рамках расширенной теории Хорндески построено устойчивое решение в виде кротовой норы. Результаты опубликованы в виде статьи.

В 2018 году была проведена работа по получению ограничений на модель легкой темной материи, взаимодействующей с веществом. Эта модель интересна тем, что она может быть проверена в будущих экспериментах и в наблюдениях систем двойных пульсаров. В ходе работы было показано, что, тем не менее, первичный нуклеосинтез в ранней Вселенной дает более сильные ограничения на эту модель, чем астрофизические наблюдения. Были проведены аккуратные численные расчеты динамики образования гелия в ранней Вселенной при наличии такой темной материи, приводящей к вариациям фундаментальных констант. По результатам работы опубликован препринт.

Также проводилась работа по построению модели, являющейся ультрафиолетовым дополнением для модели инфляции на поле Хиггса. В этой модели существует проблема возникновения сильной связи при энергиях, значительно меньших массы Планка.

Последнее не позволяет адекватно описать процесс разогрева после инфляции в этой модели. Была предложена модель, в которой удастся решить эту проблему за счет добавления дополнительной степени свободы в гравитационном секторе и повышения масштаба сильной связи до массы Планка. По результатам этой работы опубликована статья. В дальнейшем планируется изучение процесса разогрева Вселенной в этой модели.

Исследованы нетопологические солитоны, которые появляются в теориях калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий. Нашей целью было исследование возмущений классически устойчивых Q-шаров в теориях комплексного скалярного поля. Мотивацией для выбора конкретных моделей для изучения являлась возможность аналитического анализа фоновых решений и малых возмущений над ними. Мы обсудили теорию с кусочно-параболическим потенциалом, содержащим плоское направление, интересное с точки зрения феноменологии. Дополнением к этому случаю являются модели, потенциал которых имеет полиномиальное поведение. Мы рассмотрели простейший потенциал 6-й степени, допускающий наличие Q-шаров, и проанализировали возмущения в приближении тонкой стенки для фоновых решений. Мы обнаружили, что спектры малых осцилляций Q-шаров в наших примерах имеют общие свойства. Это позволяет предположить, что эти свойства не зависят от выбора скалярного потенциала. Что касается полиномиального потенциала, то в нем Q-шары с большим зарядом не имеют мягких мод. Далее, мы продемонстрировали, что Q-шары с частотами, близкими к критической, содержат сферически-симметричную вибрационную моду, которая связана с распадной модой Q-клаудов. Также важно отметить, что в этом режиме возмущения над (в общем случае, релятивистскими) солитонами анализируются с помощью теории возмущений по относительной частоте возмущения. Это может представлять интерес для изучения бозонных звезд, для которых возможность аналитического исследования ограничена. Результаты опубликованы в трех работах.

Выяснение природы существования ненулевой массы нейтрино является актуальной задачей современной физики частиц. Многие модели, объясняющие возникновение массы нейтрино, предсказывают существование новых взаимодействий нейтрино с остальными частицами Стандартной модели. Изучение возможных экспериментальных проявлений таких взаимодействий позволит получать ограничения на подобные модели новой физики.

В нашей работе был проведен анализ влияния нестандартных нейтринных взаимодействий с фермионами Стандартной модели на распространение нейтрино с энергией 1-1000 ГэВ, возникающих от аннигиляции частиц темной материи в Солнце. В частности, такие взаимодействия приводят к модификации осцилляций нейтрино в

веществе. Их влияние на нейтринные осцилляции может быть запараметризовано дополнительным вкладом в гамильтониан, описывающий нейтринные осцилляции. В нашей работе проведено моделирование распространения нейтрино в случае монохроматических нейтрино без учета влияния рассеяния и поглощения нейтрино в веществе Солнца, а также полное моделирование каналов аннигиляции W^+W^- , $\tau^+\tau^-$ и $b\bar{b}$. Данное моделирование выполнено для нескольких значений констант связи нестандартных взаимодействий, причем эти значения были выбраны феноменологически приемлемыми. Кроме того, для случая монохроматических нейтрино расчет распространения нейтрино был проведен аналитически при некоторых упрощающих предположениях. Результаты работы показали, что потоки мюонных нейтрино на уровне Земли могут значительно отличаться от полученных в случае без нестандартных взаимодействий. В частности, отклонение мюонного сигнала от аннигиляции частиц темной материи в Солнце, который регистрируется в нейтринных телескопах, может достигать до 30% при определенных величинах констант связи нестандартных нейтринных взаимодействий. При этом поток электронных нейтрино может изменяться в 5-10 раз. Результаты работы опубликованы в виде статьи и был сделан доклад на конференции.

Многие модели новой физики предсказывают существование фазовых переходов, которые наша Вселенная возможно испытывала на ранних этапах своей эволюции. Достаточно общим феноменологическим проявлением таких фазовых переходов, при условии, что они достаточно сильные, является генерация гравитационных волн. Интересно, что время электрослабого фазового перехода может оказаться временем генерации барионной асимметрии Вселенной. Регистрация гравитационных волн с соответствующим спектром может служить указанием на то, что барионная асимметрия возникала именно в результате электрослабого бариогенезиса.

В нашей работе была рассмотрена неминимальная суперсимметричная модель с расщепленным спектром. В наших предыдущих работах было показано, что в такой модели при определенных значениях параметров возможна генерация наблюдаемого количества барионной асимметрии Вселенной во время электрослабого фазового перехода первого рода, который, как предсказывается в рамках этой модели, происходил при температурах порядка 100 ГэВ. В настоящей работе был вычислен спектр гравитационных волн от фазового перехода для феноменологически интересных точек в пространстве параметров. Показано, что предсказываемый сигнал может быть доступен для обнаружения в следующем поколении экспериментов по поиску гравитационных волн, таких как LISA, BBO и Ultimate DECIGO. Результаты работы опубликованы в виде статьи.

Процессы с образованием большого количества частиц в бозонных теориях поля

давно привлекали значительный интерес. Расчеты, выполненные по теории возмущений и в квазиклассическом приближении показывают, что вероятности таких процессов начинают возрастать при достаточно большом конечном числе частиц, что приводит к нарушению унитарности. Окончательного теоретического ответа для вероятности таких процессов в настоящее время нет. Однако, данный вопрос достаточно интересен в связи с процессами множественного образования бозонов Хиггса на суперколлайдерах будущего.

Были рассмотрены классические аналоги процессов многочастичного рассеяния – рассеяние волновых пакетов. Мы изучали сферически симметричные решения уравнений движения в классической теории скалярного поля со взаимодействием $\lambda\phi^4$ с ненарушенной симметрией, которые соответствуют процессам рассеяния в квантовой теории при больших числах заполнения. Рассматривались решения, которые выходят на линейный режим при больших отрицательных и положительных временах. Начальные и конечные волновые пакеты параметризовались энергией и числом частиц и был разработан численный алгоритм поиска решений, которые приводят к максимальному различию в числе частиц начального и конечного волновых пакетов при фиксированной энергии. В результаты численных расчетов были получены классически разрешенные области в пространстве следующих параметров: энергия, начальное и конечное числа частиц. Были найдены границы классически разрешенной области и изучены свойства классических решений вблизи этой границы. Было показано, что начальное число частиц изменяется не более чем на 22% при классической эволюции по крайней мере при числах частиц $N < 30/\lambda$ и энергии до $10Nm$, где m – массовый параметр. Также численные результаты указывают на существование предельной формы границы классически разрешенной области в пределе больших начальных чисел частиц. Полученные результаты показывают, что процессы двухчастичного рассеяния с образованием большого числа частиц в рассмотренной модели находятся глубоко в классически запрещенной области, по крайней мере, при рассмотренных значениях параметров, что указывает на экспоненциальное подавление их вероятности в квантовой теории. По результатам работы была опубликована статья и сделан доклад на конференции.

Показано, что существует целый класс схем перенормировок, в которых выполняется точное соотношение между ренорм-групповой бета-функцией $N=1$ суперсимметричной КЭД и аномальной размерностью материи этой теории, предложенное без конкретизации схемы перенормировок в 90-х годах группой ученых из ИТЭФ (Москва). Конкретные схемы перенормировок из этого класса связаны между собой конечными перенормировочными предписаниями, образующими подгруппу ренорм-групповых преобразований. Найден конкретный вид связи между различными элементами

это подгруппы, который параметризуется одной конечной функцией и одной константой, соответствующей конкретному выбору масштаба перенормировок. Показано, что используя данное предписание можно связать трех-петлевые приближения точной бета-функцией данной теории, найденные ранее с участием двух соавторов данной работы (А.Л. Катаева (ИЯИ РАН) и К.В. Степаньянца (МГУ)) в двух сохраняющих суперсимметрию схемах перенормировки, а именно в основанной на применении регуляризации с высшими ковариантными производными минимальную схему вычитаний логарифмических расходимостей и суперсимметричный вариант схемы минимальных вычитаний, соответствующий использованию сохраняющей суперсимметрию на трех-петлевом уровне и выше суперсимметричного варианта размерной регуляризации, называемой регуляризацией посредством размерной редукции.

Изучен процесс квантовомеханического испарения черных дыр в простых моделях гравитации с позиции многочастичного рассеяния в квантовой теории поля. Для этого была выбрана модель КГХС дополненная динамической границей. Решение данной задачи поможет понять, что именно стоит за (не)унитарностью квантовой гравитации. Интересно отметить, что данный подход не имеет прямой связи со способами решения проблемы в рамках теории струн (АдС/КТП-соответствие) или петлевой квантовой гравитации и основан исключительно на квазиклассических методах КТП. В случае успеха, мы будем иметь в распоряжении совершенно новый метод решения задач подобного рода. В 2018 году нами была изучена модель дилатонной гравитации в режиме слабой связи, описывающая испарение черных дыр. Нами были подтверждены старые наблюдения, что в таких моделях существует проблема потери информации. Новым результатом можно считать явное указание на соответствие между нашей моделью дилатонной гравитации с границей и моделью Джакива-Тейтельбойма на квантовом уровне и аргумент в пользу отсутствия ремнантов в конце испарения черных дыр в модели. Можно сделать вывод, что либо приближение среднего поля неверно в таких моделях, либо ввод квантовой отражающей границы является некорректным шагом. В первом случае квантовые флуктуации начинают доминировать в конце испарения, искажая квазиклассическую картину. Более того, есть все основания считать такие решения некорректными, так как они не являются гладкими и однозначными. Очевидно, решения граничной задачи многочастичного рассеяния должны быть аналитическими. Мы вычислили экспоненту подавления в упрощенной модели, описывающей рассеяние точечной частицы, и результат не сходится с тем, что следует ожидать, исходя из энтропийного характера подавления. В настоящий момент мы проводим похожее вычисление уже в рамках теории поля.

С целью определения теоретических неопределённостей в соотношении между полюсной и масштабно-зависимой бегущей массами t -кварка, извлекаемых из данных Большого адронного коллайдера, оценены значения поправок 5 и 6-го порядков ТВ КХД. Рассмотрение проведено с помощью широко используемого метода инфракрасных (ИК) ренормалонов и процедуры эффективных зарядов, опирающейся на применение метода ренорм-группы. Оба подхода выдают на 5 и 6 петлевом уровне знакопеременную степенную n_f –зависимость от числа ароматов более лёгких кварков, что также согласуется с поведением известных результатов компьютерно-ориентированных вычислений низших поправок ТВ (вплоть до 4 петлевых). Однако это противоречит структуре вкладов 5 и 6 порядков ТВ, полученных из рассмотрения детализированной асимптотической формулы, излучавшейся теоретиками из Италии и Германии в 2017 г и основанной на методе ИК ренормалонов (что предполагает её возможную модификацию). В численном виде результаты работы имеют следующий вид:

$$\frac{M_t}{1 \text{ ГэВ}} \approx 164.3 + 7.566 + 1.614 + 0.498 + 0.196 + \left\{ \begin{array}{l} 0.084 + 0.037 \text{ (метод эфф. зарядов)} \\ 0.087 + 0.065 \text{ (метод ИК ренормалонов)} \end{array} \right\}$$

В отличие от тяжёлых b -кварков асимптотический характер ряда ТВ для t -кварка не проявляется на используемом в конкретных приложениях 4 петлевом уровне. При этом теоретическая неопределённость извлекаемых в настоящее время значений масс t -кварка пока ограничивается вкладом 3 поправки ТВ и составляет порядка 500 МэВ. Данная неопределённость может быть уточнена (как следует из приведённой формулы) при проведении дальнейших экспериментов по измерению массы t -кварка, планируемых при работе БАК при энергиях $\sqrt{s}=17$ ТэВ.

2. Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРН, в том числе CMS, NA61, NA62, NA64 и др. Подготовка эксперимента SHiP: уточнение чувствительности эксперимента SHiP к тяжёлым нейтральным лептонам (стерильные нейтрино).

2.1. Работы по модернизации адронного калориметра

2.1.1. Участие в работах по фотоприемникам адронного калориметра

Одной из основных целей эксперимента CMS на БАК является поиск и исследование новой физики и, особенно, детектирование суперсимметричных частиц. Многие из возможных сигнатур новой физики требуют измерения адронных струй с поперечным импульсом вплоть до нескольких тераэлектронвольт. Следовательно, одним

из основных требований при конструировании детектора CMS является хорошая адронная калориметрия. Роль адронной калориметрии особенно возрастёт при повышении светимости ускорителя БАК до $10^{35} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Для улучшения параметров адронного калориметра (АК) детектора CMS в условиях высокой светимости предложено использовать систему считывания сигналов с АК по слоям (продольную сегментацию калориметра). Такая модификация требует замены существующих фотоприёмников (гибридных фотодиодов) на кремниевые фотоэлектронные умножители (КФЭУ), которые обладают более высокой квантовой эффективностью, компактностью и нечувствительностью к магнитным полям. Кроме того, использование КФЭУ может более чем в 10 раз улучшить соотношение сигнал/шум при регистрации мюонов, что позволит проводить непрерывную калибровку АК и сохранить требуемое разрешение в условиях значительных повреждений его сцинтилляционных элементов.

2.1.2. Тестирование линеек КФЭУ для модернизации адронного калориметра

В течение этого года группой ИЯИ РАН была проведена работа по тестированию характеристик КФЭУ в рамках Фазы модернизации адронного калориметра детектора CMS.

Во время остановки Большого адронного коллайдера в 2019-21 гг. планируется модернизация адронного калориметра детектора CMS с заменой лавинных фотодиодов на кремниевые фотоумножители (КФЭУ). Линейки КФЭУ были поставлены в ЦЕРН фирмой Hamamatsu в мае-августе четырьмя партиями в общем количестве 1680 штук (13440 каналов) в полном соответствии с планом поставок. Тестирование линеек КФЭУ заключалось в измерении вольт-амперных характеристик, темновых токов, шумовых спектров и импеданса с последующей отбраковкой не прошедших тест линеек.

Для тестирования линеек КФЭУ ранее были разработаны и созданы соответствующие стенды. Все стенды были построены на базе измерительной техники фирмы KEITHLEY и PicoTech и модернизированы для проведения контроля качества/надёжности 8-канальных линеек КФЭУ для центральной части адронного калориметра. Для автоматизации измерений было разработано программное обеспечение на основе пакета LabVIEW. С целью стандартизации работы оператора стенда были написаны инструкции по проведению измерений для каждого из стендов. На стендах имеется возможность измерять основные параметры КФЭУ: зависимость коэффициента усиления от напряжения смещения, зависимость квантовой эффективности от напряжения смещения, спектральную характеристику КФЭУ, зависимость коэффициента оптической

связи ячеек КФЭУ от напряжения смещения, отклик КФЭУ на быстрый лазерный импульс. На Рис. 6 показан стенд измерения вольт-амперных характеристик.

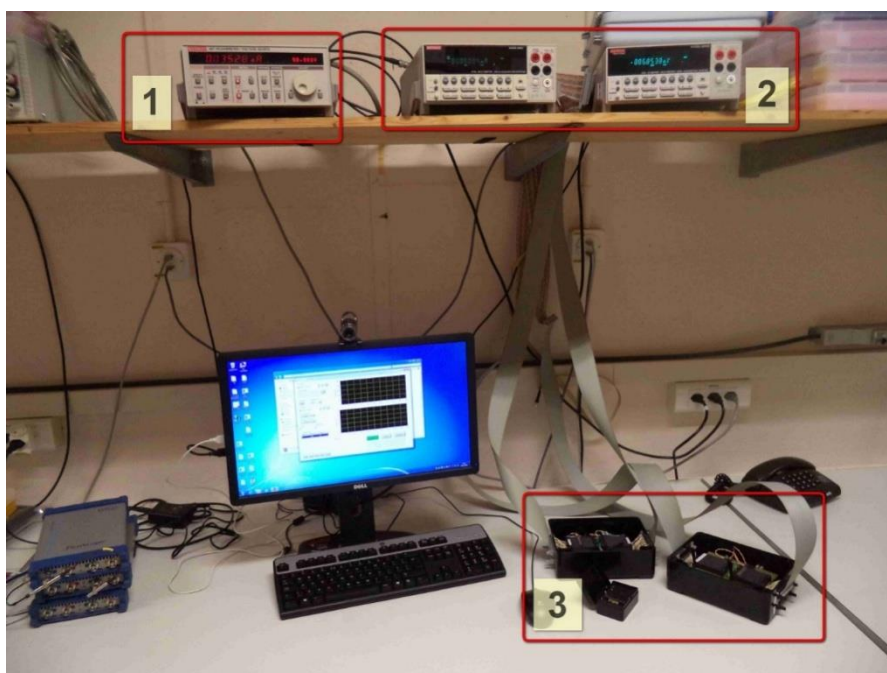


Рис. 6. Стенд измерения вольт-амперных характеристик КФЭУ.

Все линейки КФЭУ проверялись на предмет соответствия спецификации. На Рис. 7 показан коэффициент усиления (при температуре 23°C). При перенапряжении +4 В коэффициент усиления составил 350 000, что соответствует спецификации. На Рис. 8 показана эффективность регистрации фотонов, составляющая 30% при перенапряжении +3 В и 35% при перенапряжении +4 В, что лучше, чем в спецификации.

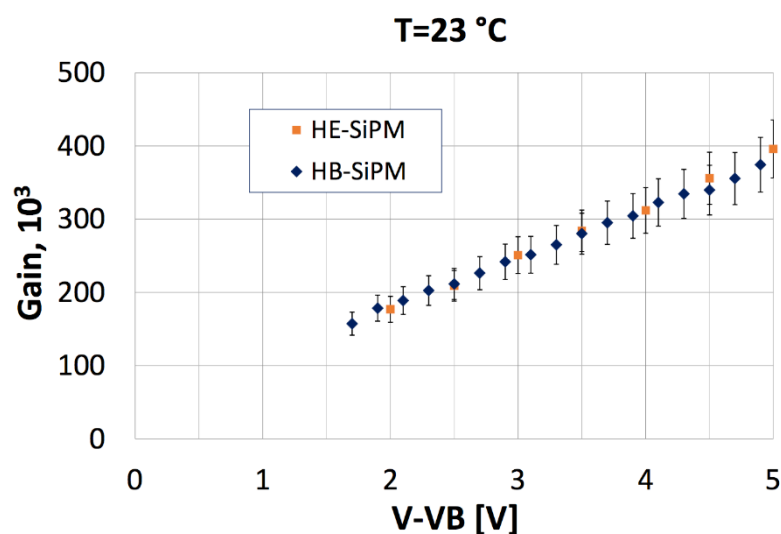


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления КФЭУ от перенапряжения.

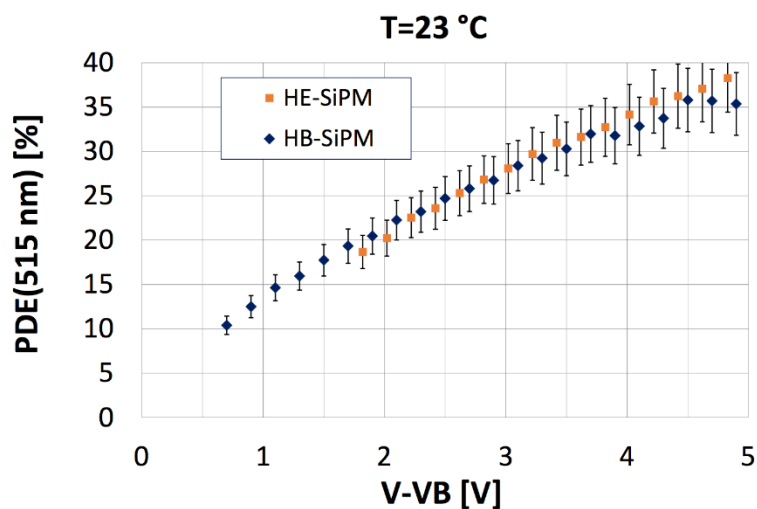


Рис. 8. Эффективность регистрации фотонов.

Для всех 1680 восьмиканальных линеек КФЭУ были проведены следующие измерения: зависимости темнового тока КФЭУ от напряжения смещения (Рис. 9), зависимости тока КФЭУ при облучении светом (длина волны 520 нм) от напряжения смещения, зависимости тока КФЭУ от напряжения смещения в прямом направлении (для определения величины гасящего сопротивления), вольт-фарадные характеристики КФЭУ, шумовые спектры КФЭУ при пороге 4,5 фотоэлектрона.

Для анализа данных измерений контроля качества линеек КФЭУ было создано специальное программное обеспечение, с помощью которого был проведен анализ данных измерений и отбраковка потенциально ненадёжных КФЭУ.

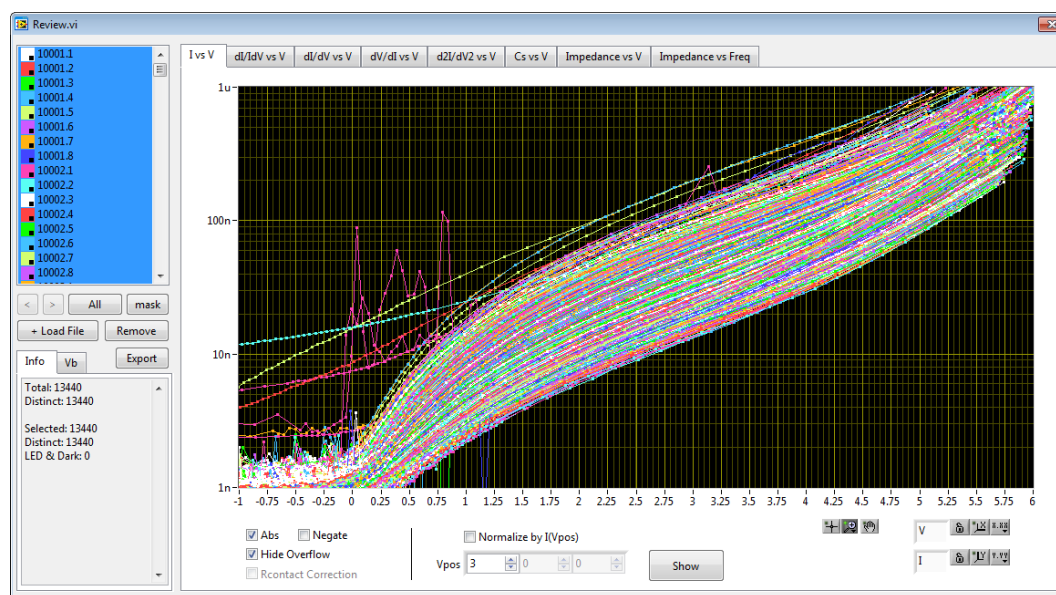


Рис. 9. Измеренные зависимости темнового тока от перенапряжения для 13 440 каналов КФЭУ (1680 линеек).

Кроме того, были проведены исследования ускоренного старения десяти линеек КФЭУ при температуре 70°C в течение четырех месяцев. Также были проведены исследования радиационной стойкости десяти линеек КФЭУ в полях высокоэнергичных нейтронов (около 1 МэВ). В Табл. 1 приведены суммарные результаты отбора линеек КФЭУ по всем параметрам.

Табл. 1 – Результаты отбора линеек КФЭУ.

Параметр	Партия 1	Партия 2	Партия 3	Партия 4	Всего	Доля, %
VB	0	0	0	0	0	0,00
Gain*PDE*Xtalk	0	0	0	0	0	0,00
I(dark)	4	4	3	0	11	0,65
R(forward)	0	0	2	4	6	0,36
C-V	0	0	0	0	0	0,00
Шум	8	18	18	11	55	3,27
Забраковано	12	22	23	15	72	4,29

Таким образом, из полученных 1680 линеек кремниевых фотоумножителей более 95% (более 99% каналов) были отобраны в результате тестирования и использованы для модернизации адронного калориметра.

2.2. Моделирование отклика детектора CMS

Были обработаны экспериментальные данные 2016 г. в количестве 35,9 фб⁻¹ по триггеру «двойной τ с порогом 32 ГэВ». 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 моделированием методом Монте-Карло. Для моделирования фона использовались генераторы AMC@NLO (tt +jets), madgraph (W+jets), pythia8 (WW, WZ, ZZ), powheg (tW), а для сигнала pythia8 (LRSM).

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 результате анализа данных, полученных в течение 2016 г. и соответствующих полной светимости БАК 35,9 фб⁻¹, были получены ограничения на массу тяжелого нейтрино в зависимости от массы W_R (Рис. 10). Сделан доклад на конференции RDMS о

поиске правовинтового W -бозона и тяжёлого нейтрино, связанного с третьим поколением лептонов (конечное состояние содержит два тау-лептона). Проведён сравнительный анализ этого поиска и соответствующих поисков в других каналах (две струи, два электрона + струи, два мюона + струи).

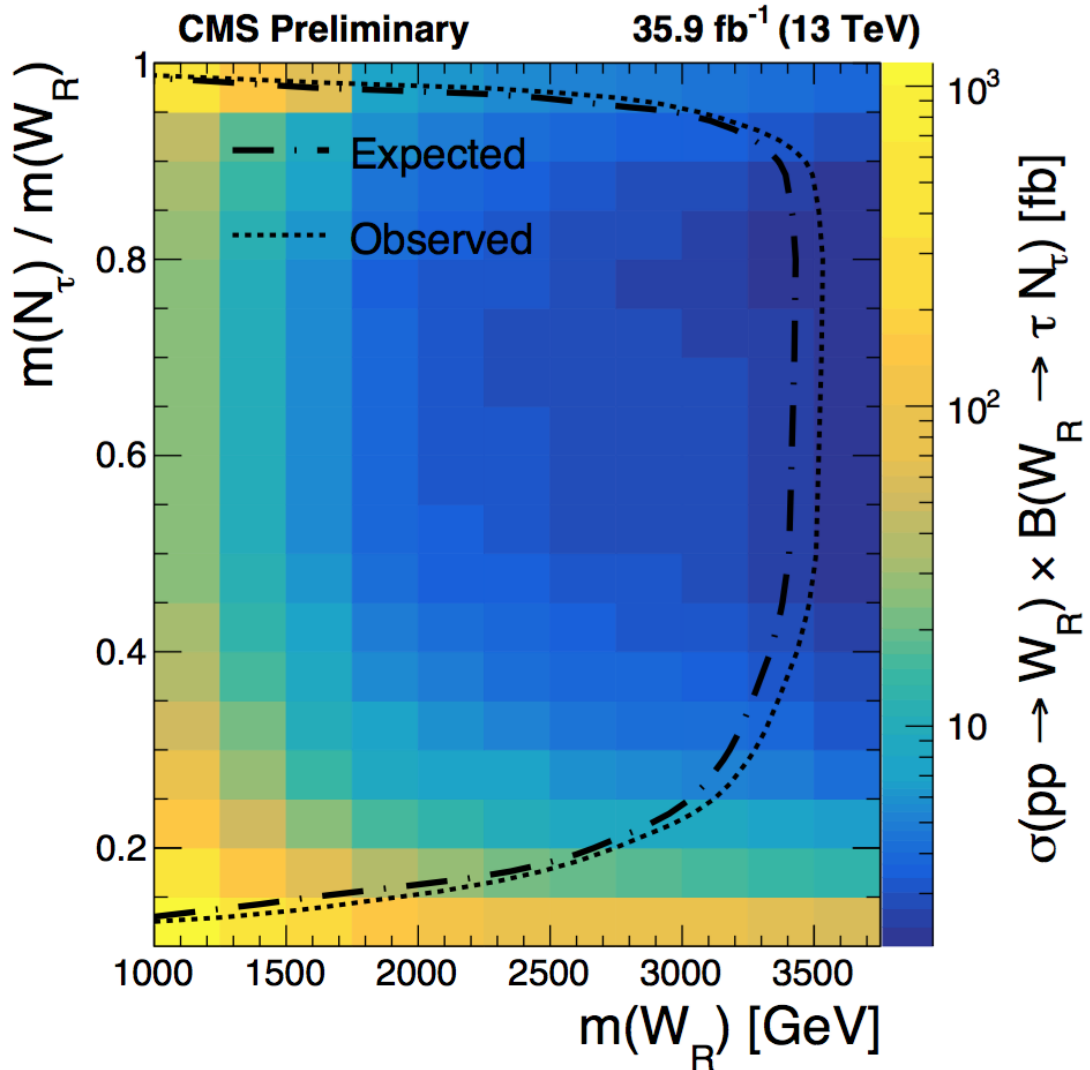


Рис. 10. Зависимость отношения масс $m(N)/m(W_R)$ от массы W_R .

2.3. Детектирование правого W -бозона и тяжелого нейтрино

Произведен поиск правого W_R -бозона и тяжелого нейтрино в событиях, содержащих один электрон или мюон, один распадающийся на адроны тау-лептон и как минимум две адронные струи. Получены новые ограничения на массу W_R -бозона и массу тяжелого нейтрино (Рис. 11). Для случая, когда масса тяжелого нейтрино равна половине массы правого нейтрино, правый W_R -бозон с массой 2900 ГэВ и меньше исключен.

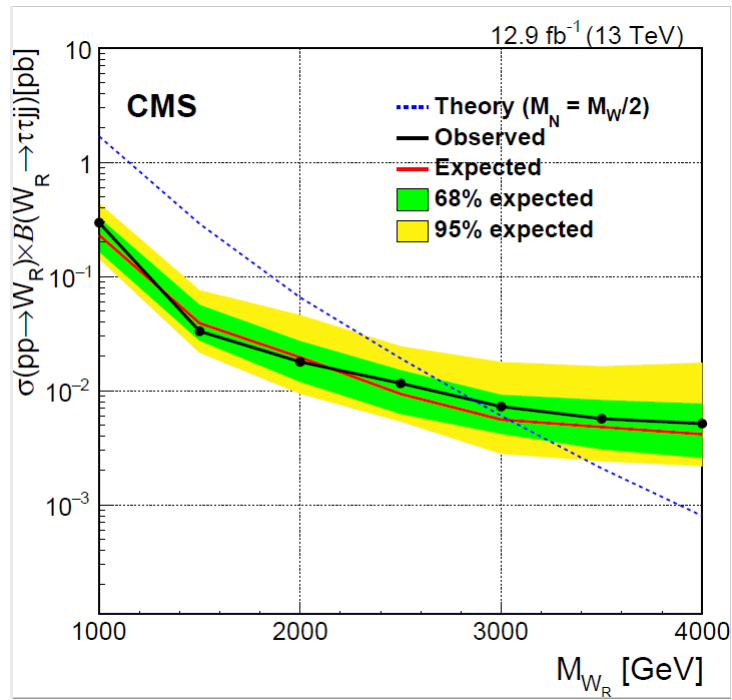


Рис. 11. Полученные ограничения на массу W_R -бозона и массу тяжелого нейтрино.

2.4. Разработка алгоритмов подавления шумов для адронного калориметра детектора CMS

Выполнялись исследования по тематике группы DPG (Detector Performance Group), изучающей характеристики работы адронного калориметра детектора CMS. Работа велась по тематике рабочей группы PSG (Performance Studies Group), изучающей эффективность работы адронного калориметра. Данная группа работает в составе группы DPG.

Передняя и задняя части адронного калориметра, расположенные в непосредственной близости от пучка, называются HF (HcalForward). HF состоит из двух частей, расположенных с двух сторон установки вдоль оси пучка. Каждая часть состоит из 13 конусов ($i\text{Eta} = 29 \div 41$), каждый конус имеет азимутальное разбиение по $i\text{Phi} = 1 \div 71$ с шагом 2. Съём сигналов с HF происходит с помощью оптических волокон, расположенных в канавках абсорберов пластин HF. Оптические волокна подходят к фотоэлектронным умножителям, которые обеспечивают съём информации. Существует два типа волокон – длинные и короткие. Длинные волокна проходят по всей длине абсорбера, короткие волокна начинаются в абсорбере на глубине 22 см. Одно длинное и одно короткое волокна определяют один модуль HF (башню). Электромагнитные ливни будут иметь заведомо разные сигналы в длинных и коротких волокнах в отличие от адронных ливней, что может позволить различить электромагнитные и адронные ливни.

Основным источником шума в HF являются ранние по времени сигналы от релятивистских заряженных частиц, производящих черенковский свет в окнах и стенках

фотоумножителей, а также от взаимодействий этих частиц с пучками оптических волокон, подводящих сигналы к умножителям. Эти процессы характеризуются более ранними по времени сигналами по сравнению с сигналами от реальных физических процессов, обусловленных прохождением частиц через модули HF.

2.4.1. Основные фильтры подавления шумов адронного калориметра

Основные фильтры для подавления шума в модулях HF построены на изучении разности сигналов с длинных и коротких волокон, а также на наличии и величине сигналов в окружающих ячейках (топологические фильтры). Основным фильтром является PET-фильтр (Polynomial Energy Threshold – полиномиальный энергетический порог). Этот фильтр строит отношение $R = (L-S)/(L+S)$, где L и S – сигналы с длинных и коротких волокон соответственно. Если R больше определенной величины (около 0,8) и энергия L+S больше определенного порога, зависящего от расположения модуля HF (больше 40 ГэВ), энерговыделение считается фоновым. Этот фильтр предназначен, в основном, для борьбы с сигналами, возникающими в окнах фотоумножителей, присоединенных к коротким волокнам, потому что большой сигнал в коротком волокне (больше порога) и небольшой сигнал или его отсутствие в длинном волокне свидетельствуют о шумовом происхождении сигнала в коротком волокне.

Вторым топологическим фильтром является фильтр S9S1. Это своего рода изоляционный фильтр, предназначенный для борьбы с шумом в длинных волокнах. Он определяет изолированность энерговыделения в длинном волокне по отношению к энерговыделениям в окружающих волокнах (длинных и коротких). Если энергия в длинном волокне больше определенного порога и величина S9S1 меньше определенной величины, то сигнал считается шумом. Величины порогов на энергию и S9S1 зависят от положения модуля HF по отношению к оси детектора (зависит от iEta).

Параметры топологических фильтров были определены при энергии сталкивающихся пучков 7 ТэВ. Было решено проверить, нет ли необходимости уточнить эти параметры для текущей энергии сталкивающихся пучков при энергии 13 ТэВ. Для проверки $i\text{Eta}$ -зависимых порогов были реконструированы события от следующих триггеров HLT: MET (с наибольшим возможным шумом), SingleMuon (с наименьшим шумом) и MC (не имеющими подобного шума), Рис. 12-13.

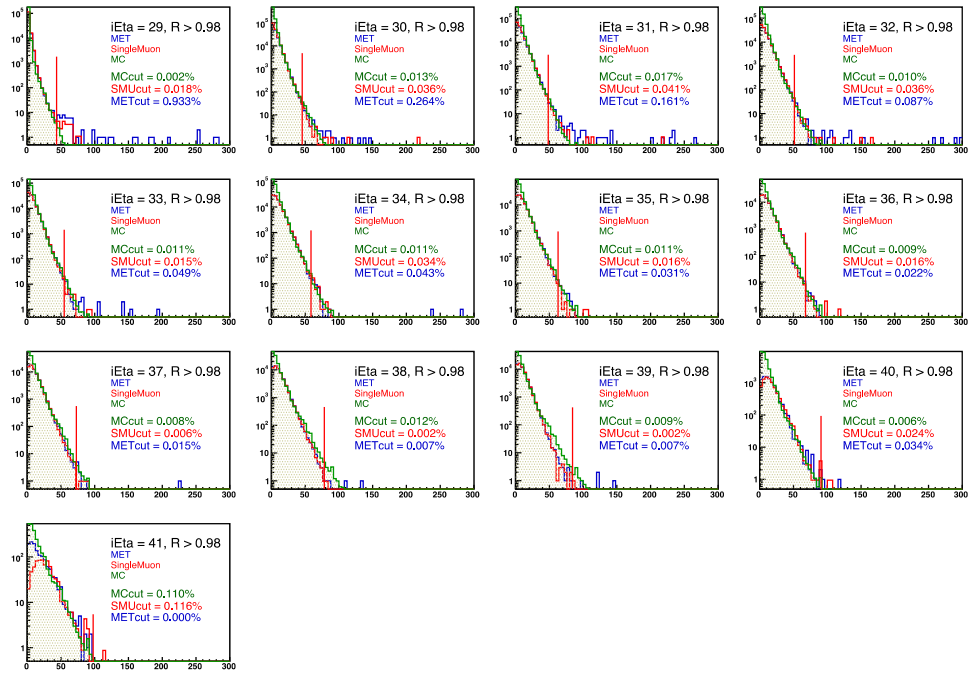


Рис. 12. $i\text{Eta}$ -зависимые пороги для длинных волокон.

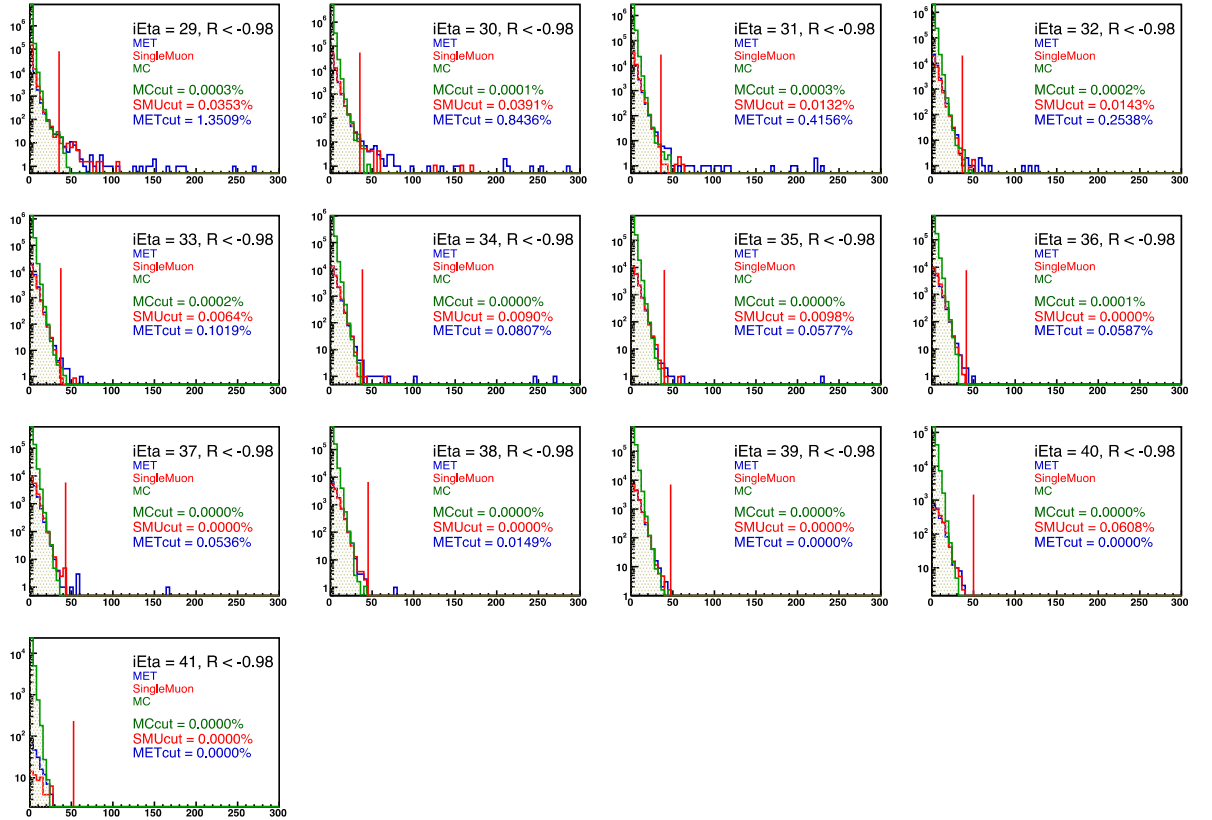


Рис. 13. iEta-зависимые пороги для коротких волокон.

Было проведено сравнение полученных распределений с аналогичными распределениями, полученными при начальном определении параметров топологических фильтров. В результате принято решение не менять существующие определения iEta-зависимых порогов для длинных и коротких волокон.

2.4.2. Использование асимметрии сигнала для подавления шумов

Для считывания сигналов с модулей HF применяются преобразователи заряд-цифра QIE10. Сигналы считываются с двух анодов фотоумножителей (a0, a1), что позволяет делать дополнительную проверку по асимметрии сигнала $QAsymmetry = (a0 - a1)/(a0 + a1)$. Для «хороших» сигналов $|QAsymmetry|$ должна быть меньше 0,7 при пороге 400 фК. Сигнал с каждого анода проверяется на время прихода сигнала с TDC, которым сопровождается зарегистрированный заряд с QIE10.

При изучении распределений TDC в зависимости от заряда, полученных при съеме сигналов с модулей HF, было обнаружено, что два канала, которые показывали в 2017 году наличие шума и были выведены из рассмотрения путем введения специальных порогов в базе данных, определяющей обрезания по временам TDC и по $QAsymmetry$, были исправлены и больше не шумели. Чтобы вернуть эти каналы в рассмотрение системы съема информации, была сгенерирована новая версия базы данных,

контролирующая параметры обрезаний по TDCи QAsymmetry, и проведено ее тестирование.

Азимутально-симметричная коррекция HcalRespCorrs для вычисления энергии в модулях HF была по ошибке применена только к одному из анодов при двуханодном съеме информации с QIE10 для обоих - коротких и длинных - волокон. Применение этой коррекции могло исказить энергии реконструируемых частиц. Для контроля была проведена реконструкция событий с ошибочной HcalRespCorrs_2018_v4.2_data и исправленной HcalRespCorrs_2018_v4.3_data. Из сравнения реконструированных событий был сделан вывод, что ошибка в данной коррекции не приводит к заметному искажению физических результатов.

Обрезания по TDC и QAsymmetry применяются для обоих анодов с двуханодным съемом информации с QIE10, если был установлен флаг rejectAllFailures = cms.bool(True). При этом значение True установлено по умолчанию. Обрезание по QAsymmetry применялось даже в том случае, если один из анодов не прошел TDC-критерий обрезания (по времени). Было решено применять обрезание по QAsymmetry только к тем парам анодов, времена регистрации сигналов в которых удовлетворяют TDC-критериям обрезания. Для этой цели был установлен еще один флаг при реконструкции сигналов с модулей HF. Новый флаг alwaysCalculateQAsymmetry = cms.bool(True) со значением True соответствует варианту, когда обрезание по QAsymmetry применяется ко всем анодам независимо от сигналов TDC. В случае значения False обрезание по QAsymmetry применяется только к тем парам анодов, которые удовлетворяют TDC-критериям обрезания. Из сравнения результатов реконструкции с двумя разными значениями флага alwaysCalculateQAsymmetry, был сделан вывод, что при применении более жесткого критерия обрезания по QAsymmetry видимой разницы не наблюдается.

Для улучшения характеристик работы системы съема информации с модулей HB (HcalBarrel) было сделано смещение основного временного интервала SOI (SliceOfInterest) в системе оцифровки информации с четвертого на третий. На SOI приходится максимальный сигнал при оцифровке снимаемого с QIE8 заряда (QIE8 производит только оцифровку заряда и не выдает временной информации). При этом не во всех модулях программы реконструкции была выполнена синхронизация. В частности, фильтр NEF (NegativeEnergyFilter) стал работать неправильно, что привело к изменению фоновых условий в HB. Была проведена регенерация базы данных, определяющей параметры дискриминантов фильтра NEF (Рис. 14-15).

По результатам проделанной работы было сделано восемь докладов на митингах рабочих групп PSG и DPG.

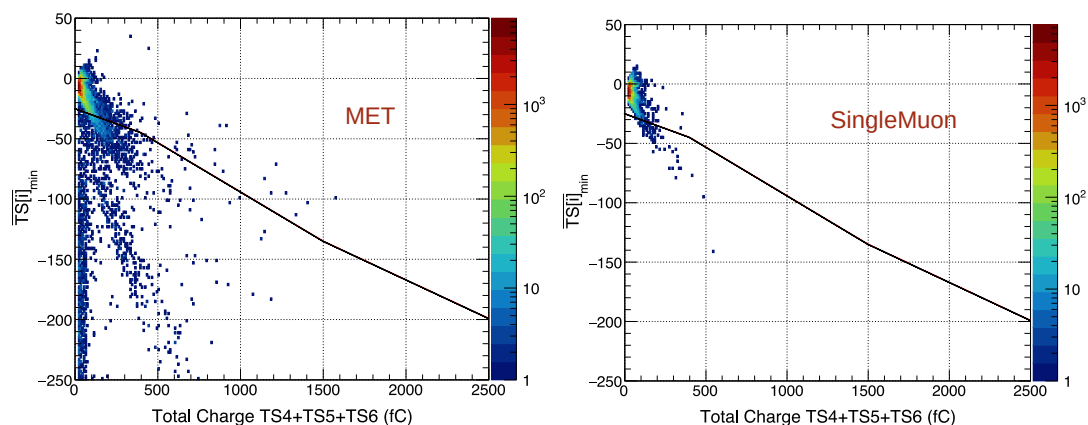


Рис. 14. Дискриминанты MET и SingleMuon фильтра NEF.

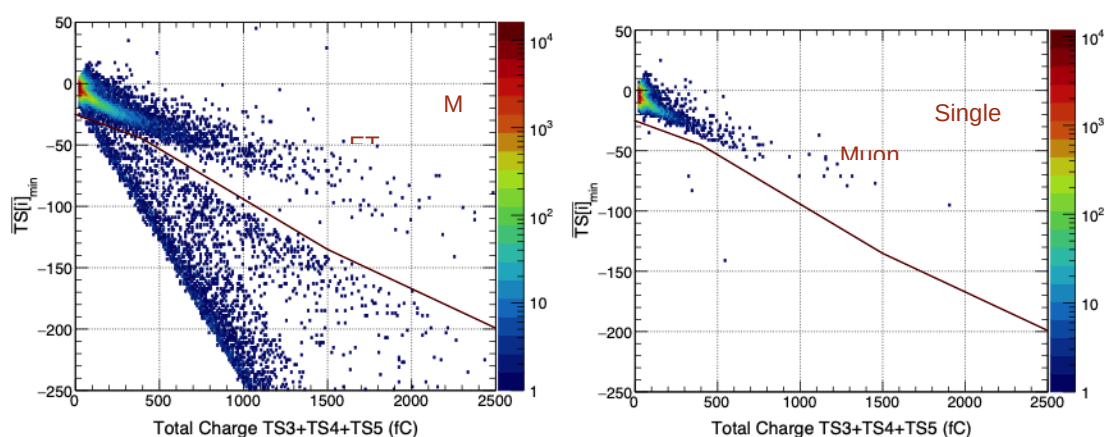


Рис. 15. Дискриминанты MET и SingleMuon фильтра NEF после исправления.

2.5. Результаты работы и достижения по эксперименту NA64

2.5.1. Статус эксперимента NA64 в 2018 г.

Набор статистического материала проводился в сеансе на установке NA64 в 2018 г. По решению комитета Research Board CERN рекомендовано продолжение набора статистики, позволяющее обнаружить массивные бозоны с массами вплоть до 1 ГэВ. Последние предварительные результаты, полученные в сеансе 2018 г., позволили сделать вывод о возможности расширения чувствительности 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 типичного верхнего предела на бозон-фотонную константу связи $\varepsilon < 6,7 \times 10^{-6}$ на 95%-ном доверительном уровне. Точное значение предела зависит от значения интенсивности

пучка в 2018 г. Полученные коллаборацией NA64 предварительные результаты дают основание получить 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 варианты следующего этапа эксперимента в 2019-2021 гг. включают также подготовку предложения эксперимента по поиску видимых распадов фотонов скрытого сектора на e^+e^- пары с последующей их регенерацией в детекторе NA64.

2.5.2. Измерения примеси адронов на установке NA64

На этапе 2018 г. на установке NA64 были проведены измерения примесей частиц из канала H4 при энергии первичных электронов 100 ГэВ. Результаты измерений показаны на Рис. 16, где показан также состав примесей в пучке.

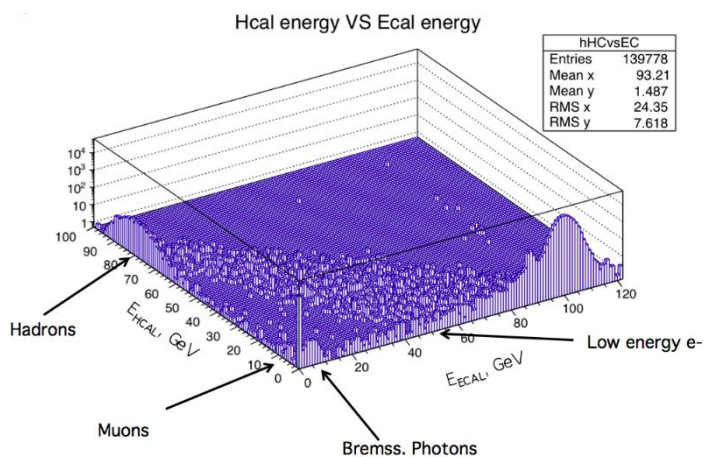


Рис. 16. Основной состав частиц в пучке канала H4SPS.

Для ограничения уровня фона была использована описанная выше система мечения электронов путем введения отбора на величины энергосвечения в кристаллах SRD. При этом на выходе частиц из вакуумного объема в зоне конверсии в системе пришлось установить тонкие окна, разделяющие вакуумированную зону с детекторами SRD. Окна имели высокую прозрачность для фотонов с энергией 2-8 МэВ. Кроме того, окна должны выдерживать давление газа порядка величины атмосферного давления. Окна также должны иметь низкую проницаемость и быть оптически прозрачными, чтобы позволить осуществлять юстировку системы. Чтобы обеспечить выполнение всех этих требований, окна были изготовлены из пленки полипропилена толщиной 1,5 мм, размещенной на специальной поддерживающей металлической сетке, которая обеспечила необходимую механическую прочность окна. Были выполнены измерения по определению

прозрачности окон, которые подтвердили правильность расчетов и показали высокую прозрачность - около 80% в диапазоне энергий фотонов 3-8 МэВ.

Результаты используемых отборов показаны на Рис. 17. Видно, что используемые критерии позволяют существенно подавить фон от примеси адронов в пучке электронов. Фактор подавления составил величину более 1000. Результаты были доложены комитету SPSC и получили высокую оценку рецензентов эксперимента NA64 в 2018 г.

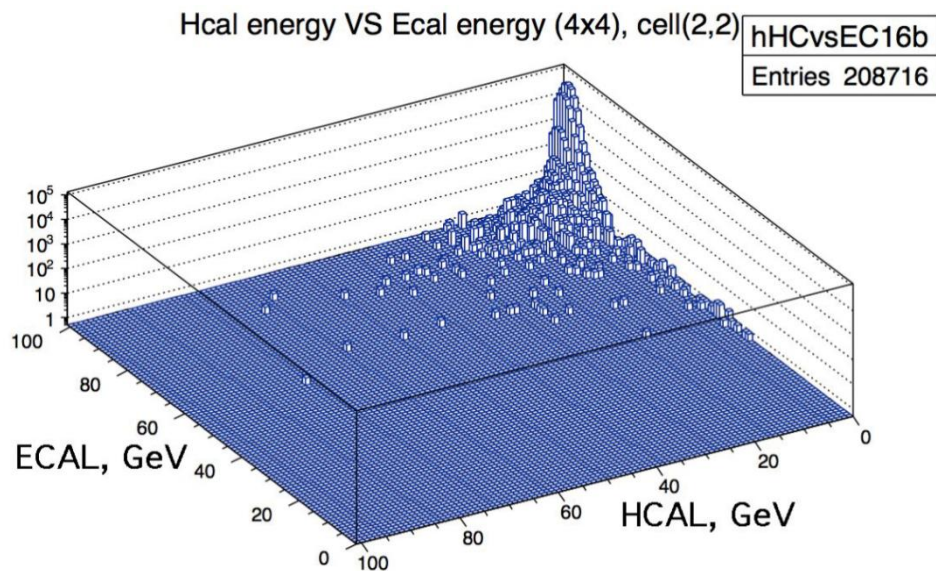


Рис. 17. Результат использования системы мечения 100-гэВных электронов на основе детектирования синхротронных фотонов с помощью счетчиков SRD.

2.5.3. Результаты по поиску сигнала в эксперименте в 2018 г.

В 2018 г. на установке NA64 были проведены первые измерения по оценке уровня фона и поиску сигналов с недостающей энергией в установке. Результаты показаны на Рис. 18. Данные свидетельствуют об отсутствии фона для диапазона масс A' от 1 до 100 МэВ. В дальнейшем поиски будут направлены на увеличение чувствительности в сторону меньших значений константы связи, иллюстрируемой на Рис. 19.

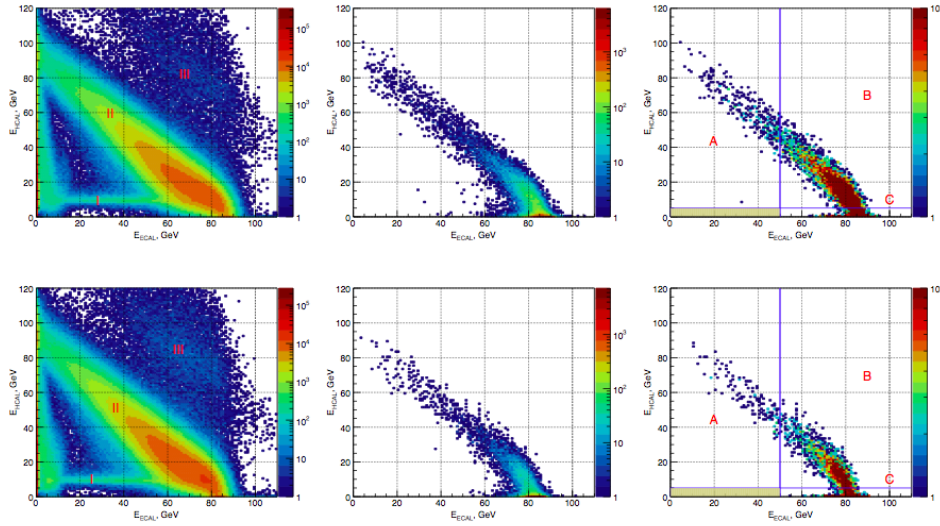


Рис. 18. Результаты, свидетельствующие об отсутствии фона в области поиска сигнала от рождения массивного бозона $E_{\text{ECAL}} < 60 \text{ GeV}$, $E_{\text{HCAL}} < 1 \text{ GeV}$. По осям - энергосодержание в электромагнитном (X) и адронном (Y) калориметрах.

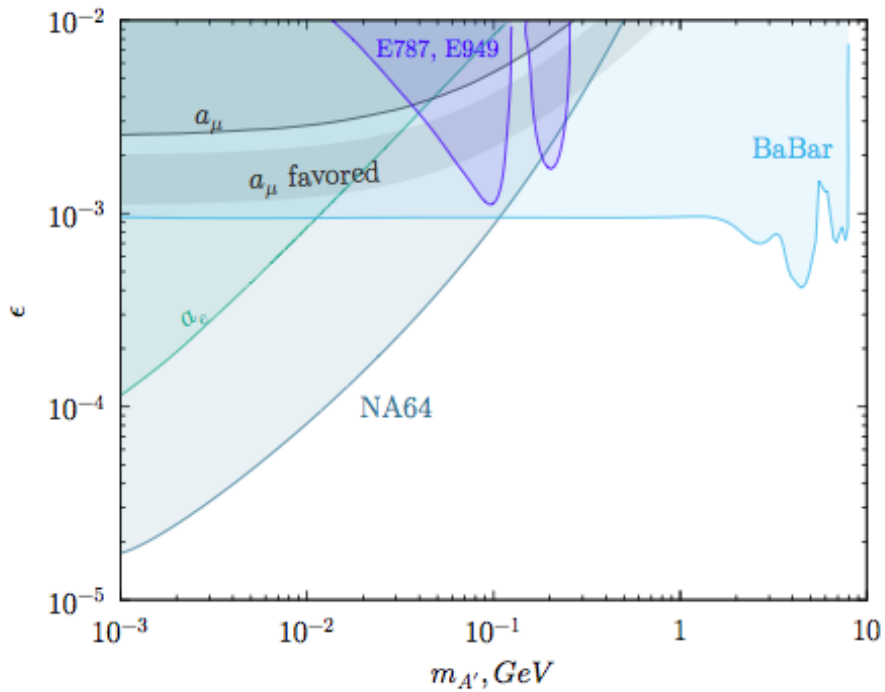


Рис. 19. Полученные ограничения эксперимента NA64 по сравнению с результатами других поисков массивного бозона. Кривые соответствуют числу зарегистрированных электронов с энергией 100 ГэВ около 4×10^{10} .

2.5.4. Повышение чувствительности установки для дальнейшего поиска A'

Возможность дальнейшего улучшения чувствительности поиска массивных бозонов на установке NA64 была доложена в 2018 г. на очередном заседании комитета SPSCCERN и положительно отмечена членами комитета.

В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для эффективной регистрации частиц в сеансах 2019-2021 гг. Реализация такого детектора возможна, например, с использованием дополнительного трэкера на основе straw-трубок. На Рис. 20 показаны впервые полученные новые ограничения на константу связи переносчика векторного взаимодействия с темной материей.

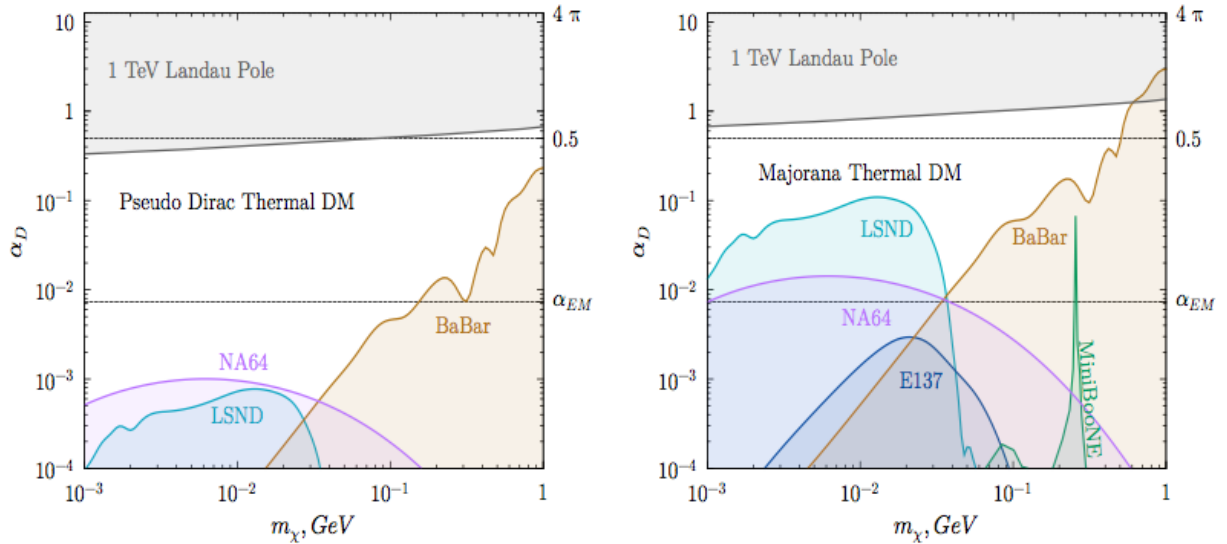


Рис. 20. Ограничения эксперимента NA64 на константу связи переносчика векторного взаимодействия с темной материей по сравнению с результатами других поисков.

2.5.5. ^8Be аномалия: Продолжение эксперимента по поиску распада $X \rightarrow e+e-$

В 2018 г. сотрудниками ИЯИ РАН в рамках программ эксперимента NA64 был продолжен эксперимент по поиску 17-мэвного X-бозона, распад которого по каналу $X \rightarrow e+e-$ объясняет т.н. ^8Be аномалию, и легкой темной материи в диапазоне масс 1-100 МэВ на ускорителе SPS в ЦЕРНе. Схема предложенного эксперимента показана на Рис. 21.

Предлагаемый эксперимент прошел апробацию в коллаборации NA64. Предложение NA64 о расширении поиска темной материи и о проведении соответствующего эксперимента по ^8Be аномалии было поддержано в комитете SPSC CERN. Измерения проводились в 2018 г., предварительные результаты показаны на Рис. 22.

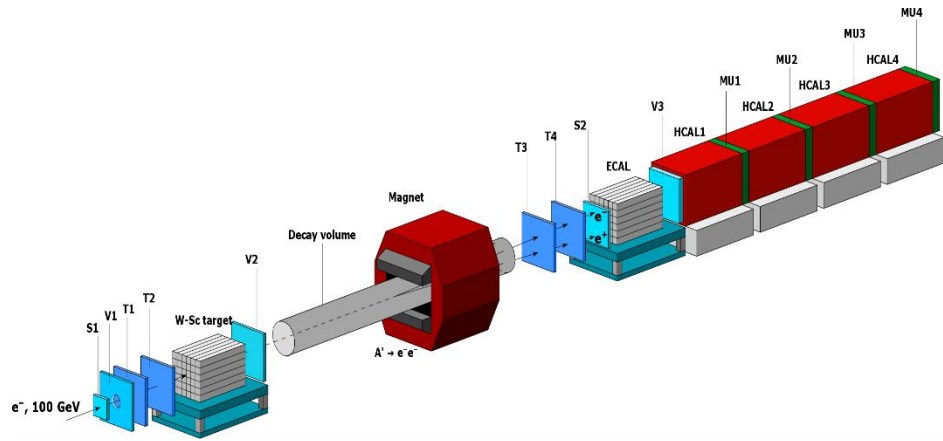


Рис. 21. Схема детектора для поиска легкой темной материи на ускорителе SPS с использованием электронного пучка с энергией в диапазоне 10-300 ГэВ.

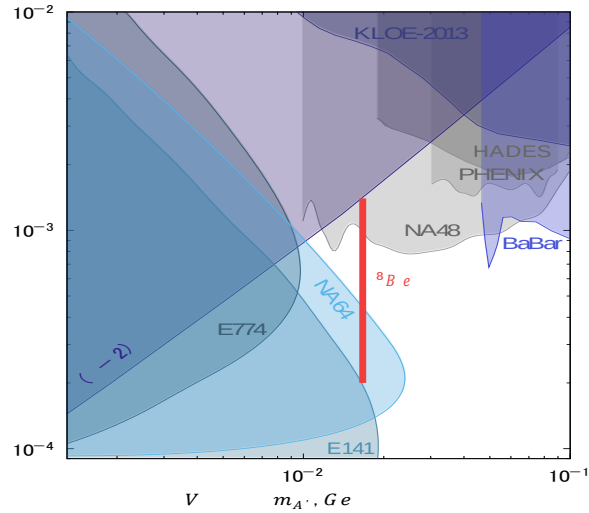


Рис. 22. Новые ограничения эксперимента NA64 на константу связи векторного X-бозона, предложенного для объяснения ^8Be -аномалии, по сравнению с результатами других поисков.

Экспериментальная установка NA61/SHINE (Рис. 23) располагается на канале транспортировки пучка H2, который может формировать и транспортировать вторичные пучки протонов и пионов на мишень установки NA61 в диапазоне импульсов от 13 ГэВ/с до максимального импульса ускорителя 400 ГэВ/с, а также пучки фрагментов ядер. Канал может транспортировать также первичные пучки ядер Ar, Xe и Pb, ускоренные на SPS.

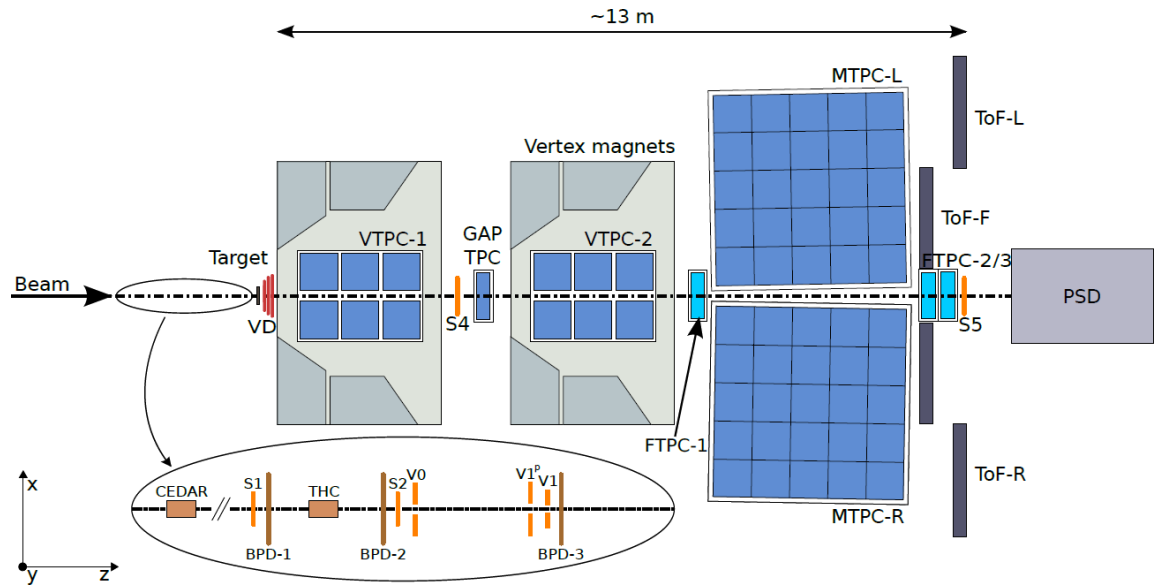


Рис. 23. Схема экспериментальной установки NA61/SHINE.

2.6. Эксперимент NA61

Основные детекторные системы установки NA61/SHINE используются для идентификации и измерения импульсов вторичных заряженных частиц, а также для измерения параметров пучковых частиц и для формирования триггера.

Установка NA61/SHINE имеет следующие основные характеристики:

- достаточно большой аксептанс $\sim 50\%$;
- высокое разрешение по импульсу $\sigma(p)/p \approx 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$ (при $B=9 \text{ Т} \cdot \text{м}$);
- разрешение по времени пролета для ToF-L/R: $\sigma(t) \approx 60 \text{ ps}$; для ToF-F: $\sigma(t) \approx 110 \text{ ps}$;
- хорошую идентификацию по ионизационным потерям:

$$\sigma(dE/dx)/\langle dE/dx \rangle \approx 0.04; \sigma(m_{\text{inv}}) \approx 5 \text{ MeV};$$

- высокую эффективность детектирования заряженных частиц: $> 95\%$;
- скорость считывания событий ~ 70 событий/сек.

Для отбора событий по центральности взаимодействия на триггерном уровне и для определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер в эксперименте NA61/SHINE используется передний адронный калориметр. Все работы по его моделированию, изготовлению модулей калориметра, разработке и изготовлению электроники, систем контроля калориметра были полностью выполнены силами ИЯИ РАН. Этот калориметр измеряет энергию спектаторов с хорошим энергетическим разрешением и используется в эксперименте для отбора событий по центральности взаимодействия на триггерном уровне. Кроме того, поперечная сегментация калориметра позволяет использовать его для

определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер. С 2011г. этот адронный калориметр был использован в экспериментах Be+Be, Ar+Sc, Pb+Pb, p+A. В 2018г. этот калориметр использовался в эксперименте и Pb+Pb и p+A экспериментах.

Схема калориметра показана на Рис. 24, слева. Калориметр состоит из 44 модулей и имеет поперечные размеры 120×120 см², Центральная часть калориметра состоит из 16 маленьких модулей с поперечным размером 10×10 см². Внешняя часть калориметра состоит из 28 больших модулей с поперечными размерами 20×20 см². Полная продольная длина каждого модуля составляет 5.7 ядерных длин. Центральные и внешние модули имеют одинаковую сегментированную продольную структуру. Каждый модуль собран из 60 чередующихся слоев свинца и сцинтилляционных пластин, Рис. 24, справа. Толщина каждой свинцовой пластины составляет 16 мм, а толщина сцинтилляционной пластины - 4 мм. При таком соотношении толщин свинца и сцинтиллятора (4:1) выполняется условие так называемой компенсации, при котором вклад электромагнитной компоненты адронного ливня равен вкладу адронной компоненты ливня. Свет от прохождения заряженных частиц через сцинтилляционные пластины собирается, передается и группируется переизлучающими оптоволоками на 10 фотодетекторов, установленных в конце каждого модуля. Таким образом, обеспечивается продольная сегментация модуля на 10 секций, что обеспечивает равномерную эффективность сбора света по длине модуля.

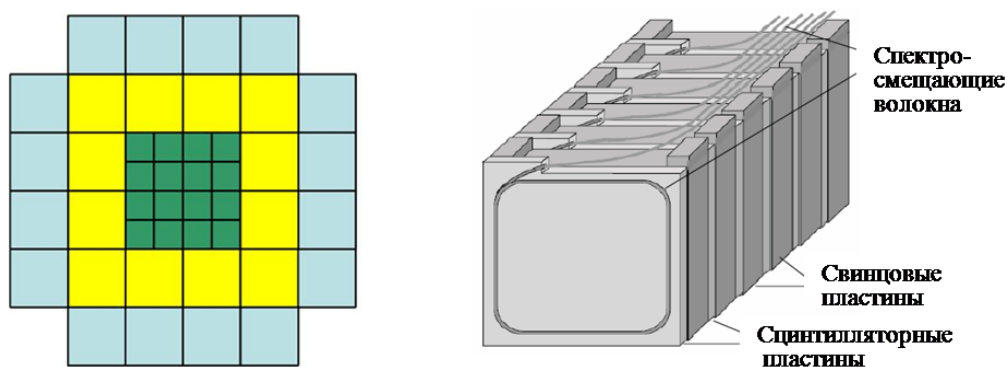


Рис. 24. Схема переднего адронного калориметра эксперимента NA61/SHINE (слева) и схема конструкции отдельного модуля (справа).

Фотография переднего адронного калориметра, используемого в экспериментах NA61 в 2018г. представлена на Рис. 25.



Рис. 25. Внешний вид переднего адронного калориметра установки NA61, используемого в экспериментах 2018г.

Для считывания света во внешних модулях калориметра используются 10 лавинных фотодетекторов MAPD-3A, производства Zecotek Photonics Inc (Сингапур). В 16 центральных модулях используются MPPC S12572-010C/P производства Hamamatsu. Размер пикселей этих фотодиодов составляет 10×10 мкм² и они имеют время восстановления порядка 10 наносекунд. Это позволило увеличить динамический диапазон за счет того, что пиксели успевают перезаряжаться несколько раз в течение импульса света от спектросмещающего оптоволокна длиной порядка 50-60 нс.

В 2018 году на пучке NA61 ускорителя SPS были проведены сеансы: p+C (июль - август), с энергией 120 ГэВ и протяженной углеродной мишенью - для исследования рождения вторичных частиц для последующего использования полученных данных в нейтринных экспериментах, и ион-ионный сеанс Pb+Pb при энергии 150 ГэВ/нуклон в ноябре-декабре 2018г. Для подготовки калориметра к этим физическим сеансам, в апреле-мае 2018г. была осуществлена калибровка калориметра силами сотрудников ИЯИ РАН.

Калибровки калориметра проводилась на мюонном пучке канала установки NA61. Также был осуществлен скан нескольких модулей калориметра пучками протонов в диапазоне энергий от 10 до 200 ГэВ. Результаты этих измерений позволяют оценить линейность отклика и энергетическое разрешение адронного калориметра в данном диапазоне энергий.

Линейность и энергетическое разрешение калориметра, измеренные после калибровки калориметра 2018 года, представлены на Рис. 26. Слева показана линейность

отклика калориметра, а справа – энергетическое разрешение калориметра в измеренном диапазоне энергии налетающих адронов. Результаты измерений показаны для нескольких положений пучка на поверхности калориметра – с положением пучка в центре центральных модулей и в центре одного из периферических модулей. Кривые энергетического разрешения представляют собой результат аппроксимации по формуле:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2}$$

где а, b и с - стохастический, постоянный и шумовой члены, соответственно. Видно, что стохастический параметр составляет ~60%, что типично для адронных калориметров данного типа и не зависит от положения пучка на калориметре.

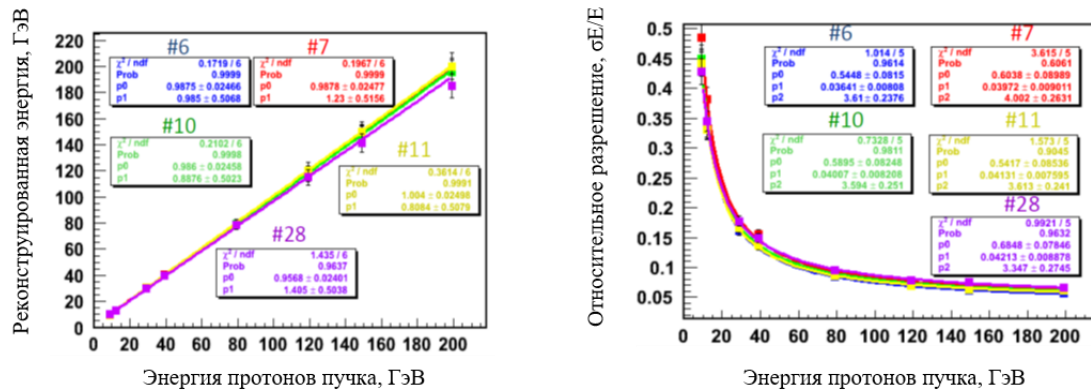


Рис. 26. Линейность отклика калориметра (слева) и относительное энергетическое разрешение (справа) калориметра, измеренные на пучках протонов в диапазоне энергий 10-200 ГэВ.

Для контроля работоспособности калориметра был создан модуль визуализации для общей панели мониторинга систем NA61 (Рис. 27). Калориметр представлен прямоугольником справа, на котором можно наблюдать выделенную энергию в отдельных секциях калориметра. На Рис. 27 показано одно событие с реакцией Pb+Pb.

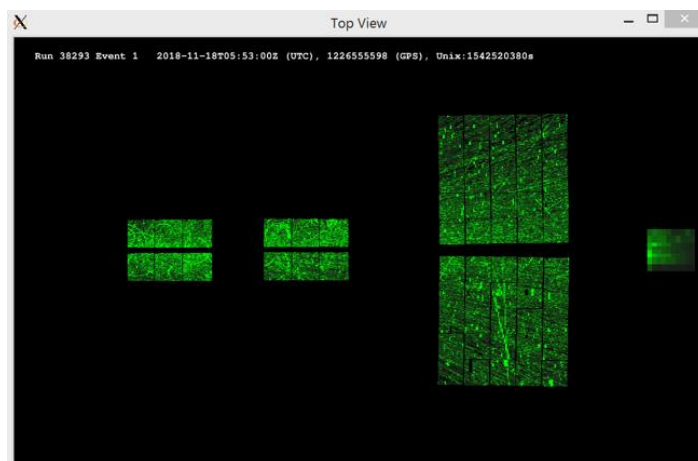


Рис. 27. Вид события на панели мониторинга систем эксперимента NA61.

В настоящее время коллаборацией NA61/SHINE подготовлена новая физическая программа экспериментов на период после 2020 года {X}, которая включает в себя исследования рождения частиц с открытым чармом (D-мезонов) в столкновениях Pb + Pb в зависимости от энергии налетающих ядер свинца в диапазоне энергий до 150 ГэВ. Будет также расширена программа измерений сечений в адрон-ядерных взаимодействиях для нейтринной физики и физики космических лучей. Для проведения всех этих экспериментов интенсивность пучка и скорость набора данных должны быть увеличены на порядок. Для этого потребуются создание новых и модернизация практически всех существующих детекторных систем NA61.

В NA61/SHINE коллаборации уже ведутся работы по модернизации ряда детекторных систем установки. В частности, создается новый большой вершинный детектор, модернизируется электроника детекторов ТРС, ведутся работы по тестированию нового время-пролетного детектора на основе резистивных камер.

Группой ИЯИ РАН в 2018г. разработан проект модернизации переднего адронного калориметра. Существующий калориметр не имеет отверстия для пучка в центре. Благодаря этому, выделенная в нем энергия является монотонной функцией центральности столкновений тяжелых ионов, и его можно использовать для определения центральности столкновений без привлечения информации с других детекторов. Однако, при повышении средней интенсивности пучка ионов свинца до 10^6 ионов за сброс (8 сек), использование такого калориметра без отверстия в центре для пропуска ионов пучка приведет к чрезмерной суммарной дозе облучения сцинтилляционных пластин в центральных модулях калориметра. Предполагается модернизировать существующий калориметр, заменив в нем 16 модулей маленьких центральных модулей будет на 4 больших модуля со скошенной боковой гранью, которые в сборке дают отверстие в

центре калориметра диаметром 6 см. Пучок ионов и тяжелых фрагментов, отклоняясь полем, будет проходить через этот модернизированный калориметр (MPSD - MainPSD) и поглощаться вторым калориметром, расположенным дальше по пучку (FPSD - ForwardPSD). Второй калориметр состоит из 9 модулей $20 \times 20 \text{ см}^2$. Необходимые для модернизации дополнительные большие модули с поперечным размером $20 \times 20 \text{ см}^2$ будут предоставлены коллаборации CBM, с которой подписано соответствующее соглашение. Эти модули уже изготовлены в ИЯИ по контракту с ФАИР.

Второй калориметр F-PSD был собран из 9 модулей калориметра CBM силами ИЯИ РАН и установлен позади действующего калориметра в апреле 2018г. Фото калориметров установки NA61 показано на Рис. 28.



Рис. 28. Второй калориметр (F-PSD) (справа) на пучке NA61 ускорителя SPS. На переднем плане показан действующий калориметр.

В мае 2018г. были проведены тестовые измерения отклика калориметра FPSD на пучке протонов. При этом основной калориметр выводился из пучка. Результаты измерений отклика и энергетического разрешения калориметра FPSD показаны на Рис. 29.

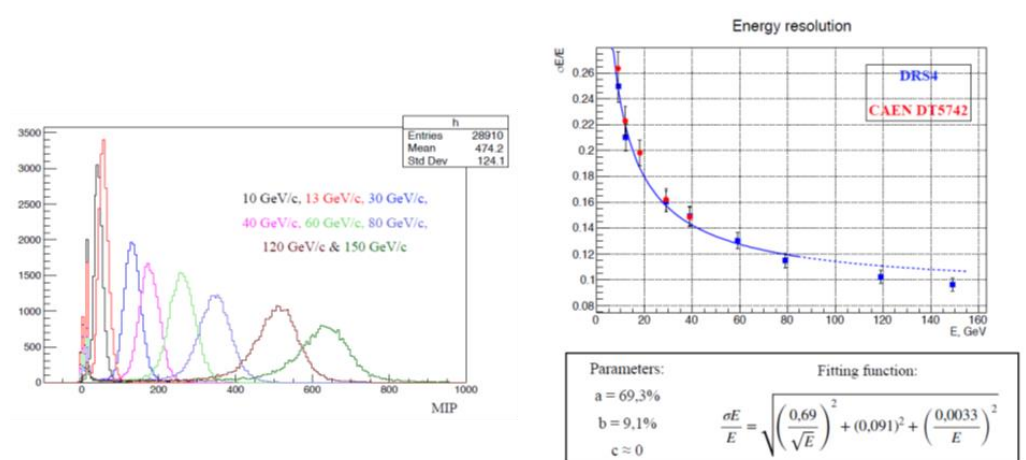


Рис. 29. Спектры протонов разных энергий (слева) и энергетическое разрешение калориметра FPSD(справа).

2.7. Подготовка к эксперименту SHiP

В рамках подготовки к эксперименту SHiP, была уточнена его чувствительность к стерильным нейтрино. Известно, что при исследовании феноменологии новых гипотетических частиц с массами в области порядка ГэВ важен учёт квантовых поправок, связанных с сильными взаимодействиями (КХД). Это изменяет предсказания для темпов рождения и распада таких частиц. Кроме того, учёт квантовых поправок открывает новые каналы, в частности, многомезонные каналы распада. В данной теоретической задаче ставилась цель изучить влияние квантовых поправок КХД на темпы процессов с участием гипотетических нейтральных лептонов (стерильных нейтрино). В результате подробного исследования оказалось, что в данном случае поправки не так уж и важны, эффекты редко достигают 30%, амного-мезонные каналы доминированы резонансами от тяжёлых быстрораспадающихся адронных состояний. Тем не менее, полученные результаты позволили уточнить темпы основных интересных процессов для проекта SHiP, и были включены в численный код, используемый при изучении перспектив этого эксперимента по поиску стерильных нейтрино.

2.8. Участие в проекте планируемого эксперимента MATHUSLA

Во многих обобщениях Стандартной модели физики частиц предсказывается существование относительно лёгких и долгоживущих частиц, которые кинематически могли бы рождаться на Большом адронном коллайдере, и пролетать сотни или больше метров до своего распада. Недавно предложенный проект MATHUSLA - большой детектор с малым содержанием материала, расположенный на поверхности земли недалеко от одного из мест столкновений пучков БАК, идеально подходит для поиска таких частиц. Большая группа теоретиков из ведущих мировых институтов исследовала перспективы этого проекта в поиске конкретных гипотетических частиц, и представила результаты исследования в виде объёмного научного труда. Сотрудники ИЯИ участвовали в изучении моделей со стерильными нейтрино и лёгкими сголдстино.

3. Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb. Набор статистики и обработка физических данных.

Основная цель эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах В-мезонов. В 2018 году в период июнь – декабрь эксперимент БАК-би уже набрал 2.18/фб интегральной светимости, что больше чем набранная

светимостью за тот же период в 2016 и 2017 гг. Пиковая светимость достигает уровня $4 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, что соответствует оптимальному режиму набора данных. Возросла загрузка каналов сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов. Кроме набора новых данных эксперимент LHCb в 2018 г. продолжил работу в области обработки ранее набранных данных, получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями.

3.1. Основные физические результаты, полученные LHCb в 2018 г.

Среди важнейших результатов, полученных LHCb в 2018 году можно выделить следующие:

Первое наблюдение двух новых массовых структур, согласующихся с резонансами с конечными состояниями $\Lambda^0_b \pi^-$ и $\Lambda^0_b \pi^+$ [1].

LHCb сообщило о наблюдении новых структур в обоих массовых спектрах $\Lambda^0_b \pi^-$ и $\Lambda^0_b \pi^+$, полученных из данных p - p соударений с интегральной светимостью $3/\text{fb}$. Эти новые состояния $\Sigma_b(6097)^\pm$, соответствуют $1P$ возбуждениям барионов с *bottom*-кварком b и b и b и b . Но нельзя исключить, что новые структуры – это суперпозиции нескольких состояний с близкими массами. Другие интерпретации, такие как молекулярные состояния, также возможны. Новые структуры наблюдаются с высокой достоверностью $>12 \sigma$. При этом базовые состояния $\Sigma_b^\pm$ и $\Sigma_b^{*\pm}$ также наблюдаются и подтверждают результаты CDF [2]. Массы и ширины распределений измерены с точностью в 5 раз превышающей предыдущие измерения.

Полученный результат является первым наблюдением новых массовых структур и наиболее точным измерением в отдельном эксперименте в мире.

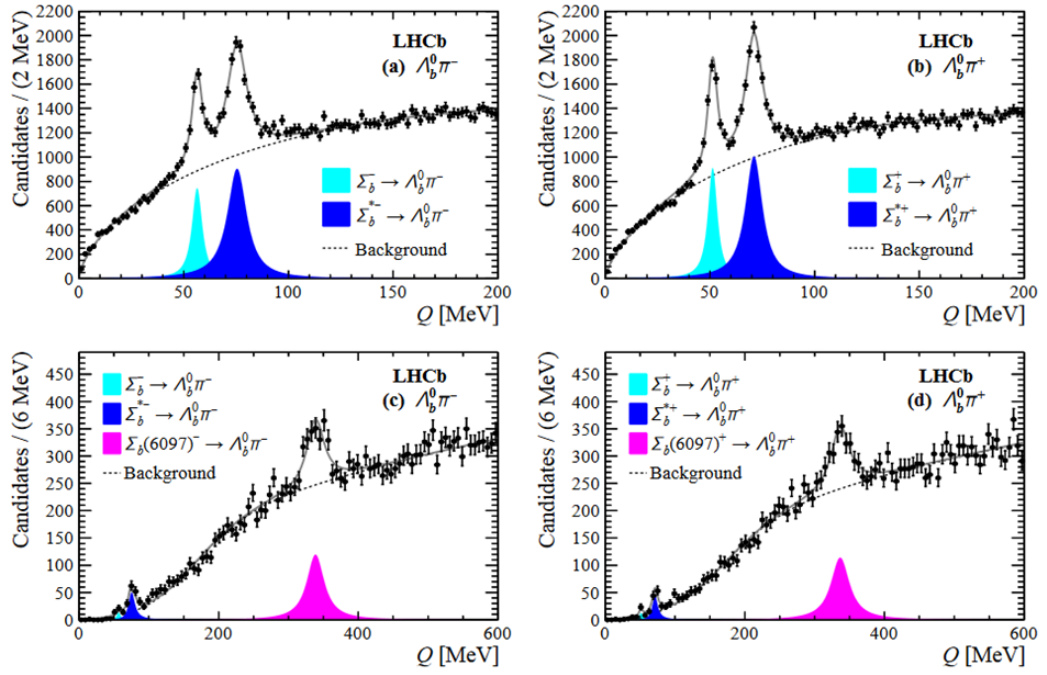


Рис. 30. Показаны распределения масс $\Lambda_b^0 \pi^-$ (слева) и $\Lambda_b^0 \pi^+$ (справа). Точками показаны экспериментальные данные. В верхнем ряду показаны результаты для состояний с низкой массой $\Sigma_b^\pm$ и $\Sigma_b^{*\pm}$, в нижнем ряду представлены (пурпурным цветом) результаты для новых массовых состояний $\Sigma_b(6097)^\pm$.

3.2. Поиски дву-мюонных резонансов в области масс Υ -резонанса [3].

Единственная известная фундаментальная скалярная частица со спином 0 – это бозон Хиггса. Во многих расширениях Стандартной модели предсказывается дополнительная частица со спином 0 – Φ -бозон. Детектор LHCb обладает хорошей чувствительностью к легким спин-0 частицам, распадающимся на пару мюонов с противоположными зарядами. Результаты поиска таких частиц в протон-протонных соударениях с энергиями 7 и 8 ТэВ в системе центра масс были представлены в [3]. Наличие сигналов не было обнаружено в области масс 5.5-15 ТэВ. Были установлены ограничения верхнего предела наблюдений, сравнимые по точности с ограничениями, полученными для других областей энергий. Кроме того полученный результат является самым точным для области вокруг Υ -резонанса. На Рис. 31 также представлены зеленым цветом гипотетические пики Φ -бозона для пяти различных масс.

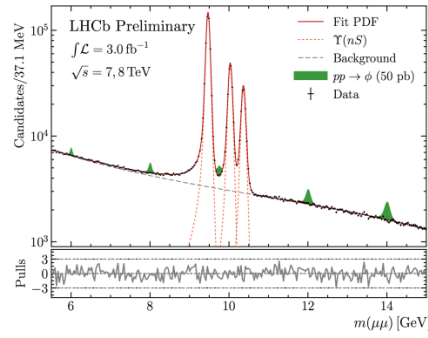


Рис. 31.

3.3. Первое наблюдение распада $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ [4].

Первое наблюдение распада $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ на уровне достоверности 3.4σ было представлено в LHCb [4]. Этот распад в СМ происходит только через петлевые процессы, поэтому его вероятность предсказывается очень маленькой. Новые частицы, возникающие в расширениях СМ, могут существенно увеличить или уменьшить вероятность данного распада, поэтому точное ее измерение является ключевым для поиска новой физики. На Рис. 32 показаны данные масс ($K^-\pi^+\mu^+\mu^-$), полученные LHCb. Небольшой избыток в спектре справа является гипотетическим сигналом $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$.

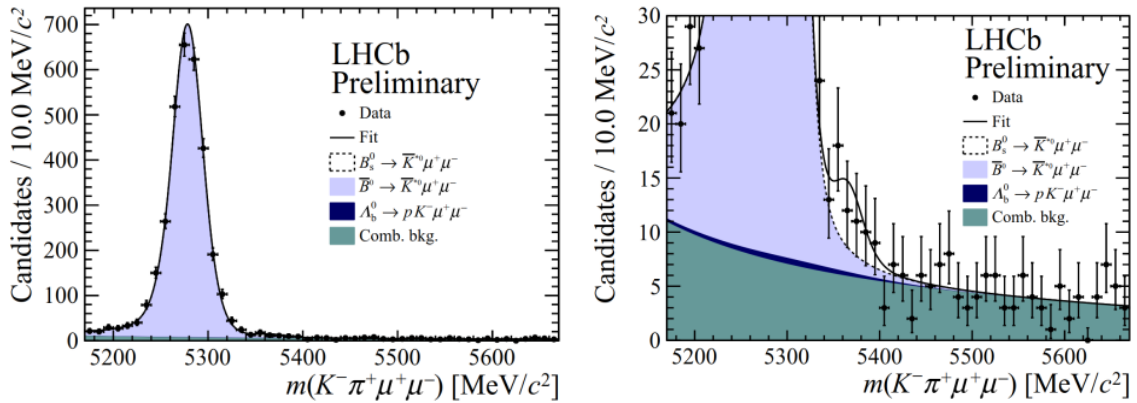


Рис. 32. Показаны измеренные массы ($K^-\pi^+\mu^+\mu^-$). Избыток в спектре справа является гипотетическим сигналом $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$

Дополнительная литература:

1. LHCb Collaboration / Observation of two resonances in the $\Lambda_b^0 \pi^\pm$ systems and precise measurement of $\Sigma_b^\pm$ and $\Sigma_b^{*\pm}$ properties // arXiv:1809.07752; LHCb-PAPER-2018-032; CERN-EP-2018-243; Submitted to PRL.
2. T. Aaltonen et al. (CDF collaboration) / Observation of the heavy baryons Σ_b and Σ_b^* // Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 202001; T. Aaltonen et al. (CDF collaboration) / Measurement of the masses and widths of the bottom baryons $\Sigma_b^\pm$ and $\Sigma_b^{*\pm}$ // Phys. Rev. D85 (2012) 092011.

3. By LHCb Collaboration, Search for a dimuon resonance in the Υ mass region” LHCb-PAPER-2018-008 in preparation. Also “Long lived particles and dark photons at LHCb” presented at 53d Rencontres de Moriond (13.03.2018) by Martino Borsato https://indico.in2p3.fr/event/16579/contributions/60830/attachments/47252/59369/LLPandDPatLHCb_MBorsato.pdf.

4. By LHCb Collaboration, “Search for new physics in $b \rightarrow sll$ decays” presented at 53d Rencontres de Moriond (13.03.2018) by Francesco Dettori, also “Rare decays, radiative decays and $b \rightarrow sll$ transitions at LHCb”, presented at 53d Rencontres de Moriond (19.03.2018) by Andrew Crocombe, LHCb-PAPER-2018-004 in preparation.

3.4. Обеспечение работоспособности сцинтилляционно-падового и предливневого детектора в процессе набора данных в 2018 г.

В 2018 г. сотрудники ИЯИ РАН продолжали работать над обеспечением бесперебойной работы калориметрической системы установки для эффективного набора физических данных. Сотрудники ИЯИ РАН принимают участие в наборе и контроле качества данных калориметрической системы установки БАК-би, изучении характеристик и операционном контроле предливневого и сцинтилляционно-падового детекторов, дежурствах на установке в качестве начальника смены и дежурного по калориметрической системе.

С декабря 2017 г. по март 2018 г. ускоритель БАК-би был остановлен на профилактические работы. За это время на калориметрической системе был выполнен ряд работ по замене вышедших из строя элементов и наладке электроники, доступ к которой закрыт во время работы ускорителя. На сцинтилляционно-падовом детекторе проводилась проверка системы распределения низковольтного питания, на адронном калориметре были заменены 45 деградировавших фотоумножителей, на электромагнитном – заменены 3 вышедших из строя и 24 нестабильных фотоумножителя.

На калибровочной системе электромагнитного калориметра были заменены один сгоревший и 4 нестабильных светодиодов. На Рис.33 показано распределение величин коэффициентов усиления фотоумножителей по площади адронного калориметра, на Рис.34 – средних токов фотоумножителей после предварительной настройки без пучка.

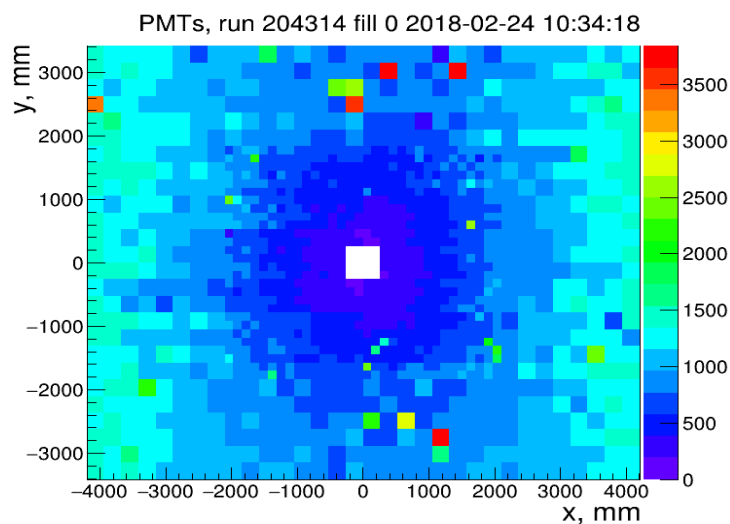


Рис. 33. Распределение величин коэффициентов усиления фотоумножителей по площади адронного калориметра.

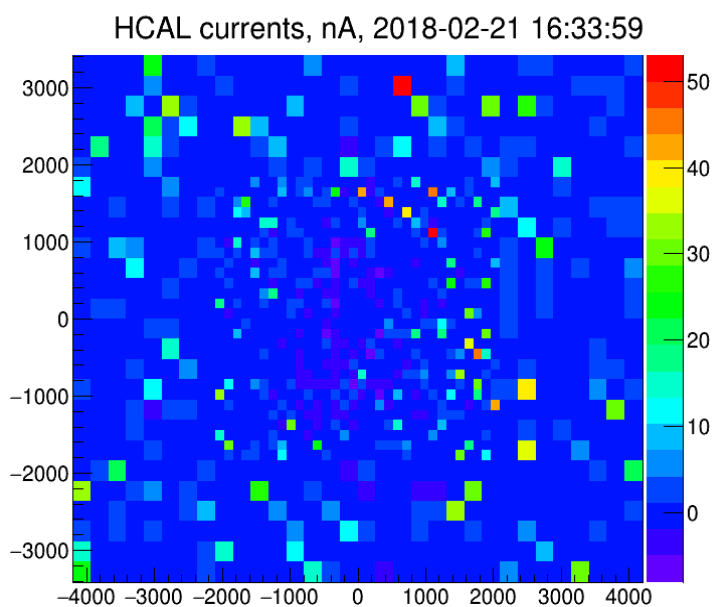


Рис. 34. Распределение величин средних токов фотоумножителей по площади адронного калориметра.

На Рис. 35 Показано распределение величин коэффициентов усиления фотоумножителей по площади электромагнитного калориметра. Во всех случаях наблюдается достаточно хорошая однородность распределений по площади детекторов.

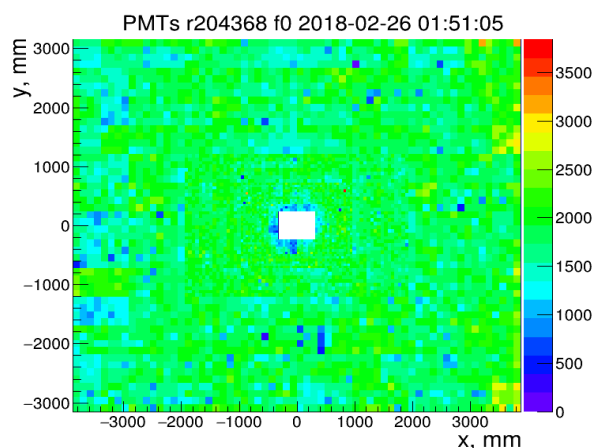


Рис. 35. Показано распределение величин коэффициентов усиления фотоумножителей по площади электромагнитного калориметра.

Старение и калибровка сцинтилляционно-падового детектора.

По причине того, что условия работы сцинтилляционно-падового детектора связаны с высокой нагрузкой и радиационным облучением, элементы детектора подвергаются деградации («старению») основных характеристик. Так, ячейки сцинтиллятора и пластиковые оптические волокна теряют часть своей прозрачности и световыхода из-за радиационных повреждений. В первую очередь это касается ячеек, расположенных во внутренней зоне детектора. Используемые многоканальные (мультианодные) фотоумножители также подвержены уменьшению чувствительности фотокатода и падению коэффициента усиления вследствие аккумулированного фототока. Для того, чтобы компенсировать падение усиления ФЭУ, приходится периодически подстраивать высокое напряжение. Так предыдущий цикл подстройки напряжений был выполнен в 2017 году, приращение напряжения доходило до +30V. В апреле текущего года были повышены напряжения на 12 фотоумножителях сцинтилляционно-падового детектора, которые в конце 2017 года показывали пониженную эффективность. Необходимость подстройки была вызвана низкой эффективностью, менее 90%, данных ФЭУ. Новые значения высокого напряжения, измененные 10 апреля, приведены в Табл. 2.

VFE	HV
55	579.306620
56	618.624575
60	572.423735
61	624.861671
66	620.390386
67	636.086737
68	574.455984
71	564.717707
72	626.521847
73	584.211805
76	632.047835

Табл.2 Новые значения высокого напряжения на ФЭУ сцинтилляционно-падового детектора

Для того, чтобы убедиться в том, что примененные коррекции напряжения привели к желаемому результату, эффективность сцинтилляционно-падового детектора была изучена на новых данных. Для этого был произведен набор 3.6 млн треков NoBias событий в начале мая. Для подробного изучения внешней области детектора этой статистики не достаточно, но в целом такой объем данных удовлетворяет достижению поставленной цели.

Эффективность сцинтилляционно-падового детектора может быть оценена при проведении треков заряженных частиц через плоскость детектора и определении числа срабатываний соответствующих ячеек.

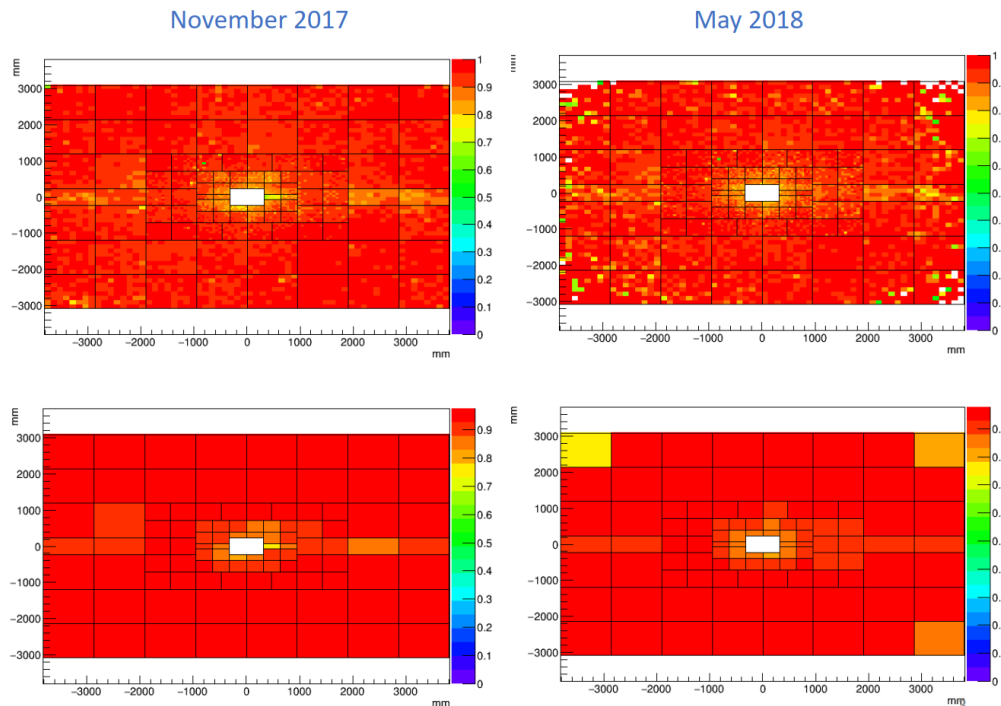


Рис. 36. Показаны эффективности ячеек сцинтилляционно-падового детектора, измеренные в 2017 и 2018 г. г., на треках от MIP.

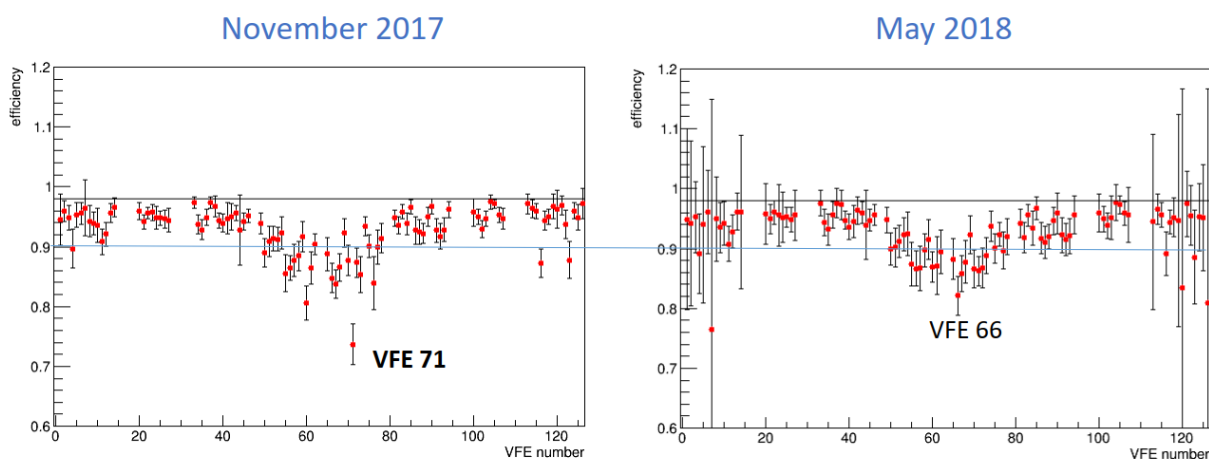


Рис. 37. Показана эффективность детектора, слева – в августе 2017 г., справа – в мае 2018 г. после подстройки высокого напряжения на 12 ФЭУ. Значения эффективности усреднены по зонам детектора, т.е. по 64 каналам детектора, подключенным к каждой карте VFE. Небольшая эффективность угловых зон объясняется недостаточной статистикой восстановленных треков. Виден провал эффективности на внутренней карте VFE71. Вероятная причина – повышенное старение ФЭУ и ячеек из-за большой загрузки в центральной области детектора. Как видно, произведенная коррекция напряжения позволила заметно повысить эффективность. Возможно, потребуются дополнительная калибровка в конце года, и/или замена ФЭУ.

В целом, эффективность детектора после калибровки и коррекции высокого напряжения остается на хорошем уровне. Средняя эффективность всего детектора 94%, отдельно по зонам – 91, 95, 96% для внутренней, средней и внешней зон. Эффективность зон детектора была изучена в августе 2017 г. Усредненная по VFE картам, эффективность показана на Рис.36. Эффективность зоны карты VFE71 в результате коррекции выросла с 74% до 86%.

В Табл. 3 показаны усредненные по зонам (внутренняя, средняя и внешняя) по площади детектора результирующие значения эффективностей. Пониженная эффективность для внутренней зоны объясняется деградацией световыхода из-за накопленной дозы.

Average efficiency

	Inner	Middle	Outer	All
Nov 2017	88.7%	94.5%	95.0%	92.7%
May 2018	89.6%	94.4%	95.3%	93.1%

Табл. 3. Усредненные по зонам по площади детектора значения эффективностей после коррекции напряжений на фотоумножителях сцинтилляционно-падового детектора.

Как видно из таблицы, калибровка и последующая коррекция усиления фотоумножителей позволяет поддерживать эффективность детектора на высоком уровне. Эффективность в средней и внешней зонах детектора остается на уровне 95%, во внутренней части эффективность чуть ниже, что вызвано повышенной загрузкой и более интенсивным старением.

В качестве общего заключения по калибровке и текущей эффективности сцинтилляционно-падового детектора можно отметить:

- Эффективность в средней и внешней зонах детектора остается на достаточно высоком уровне ~95%.
- Эффективность во внутренней части чуть ниже, возможно из-за повышенной загрузки и более интенсивных эффектов старения. Следует отметить, что в случае значительного падения световых выходов, вызванного например старением элементов детектора и/или потерей чувствительности фотокатода ФЭУ, недостаточную эффективность не удастся компенсировать простой коррекцией усиления. Возможно, придется в крайних случаях прибегнуть к замене ФЭУ.
- Периодическая подстройка величин порогов в регистрирующей электронике позволяет корректировать потери амплитуды сигналов, вызванных старением элементов детектора. Последующие калибровки сцинтилляционно-падового детектора и корректировка величин порогов запланированы.

Для предливневого детектора были заново измерены пьедесталы, значения коэффициентов усиления и соответствующие им значения высокого напряжения на фотоумножителях. Обновленные значения были занесены в базу данных. Для синхронизации всех детекторов были набраны данные в специальном режиме, по их результатам была сделана коррекция установочных параметров. На Рис. 37 показано распределение каналов для электромагнитного и адронного калориметров с неверными значениями калибровочных констант. Впервые этот эффект был обнаружен в октябре 2017 г. Для коррекции этих ошибок были проведены замены двух карт электроники электромагнитного калориметра. К сожалению, эта замена не возымела эффекта.

В апреле была проведена наиболее точная калибровка электромагнитного калориметра на нейтральных пионах. Такая калибровка проводится обычно раз в месяц из-за значительной трудоемкости: необходимо набрать около 4 миллионов нужных событий с достаточной статистикой по всей площади калориметра, для каждой ячейки набрать гистограмму с распределением по эквивалентной массе двух гамма-квантов, офитировать спектры и т.д. На Рис. 38 показан результат применения калибровки.

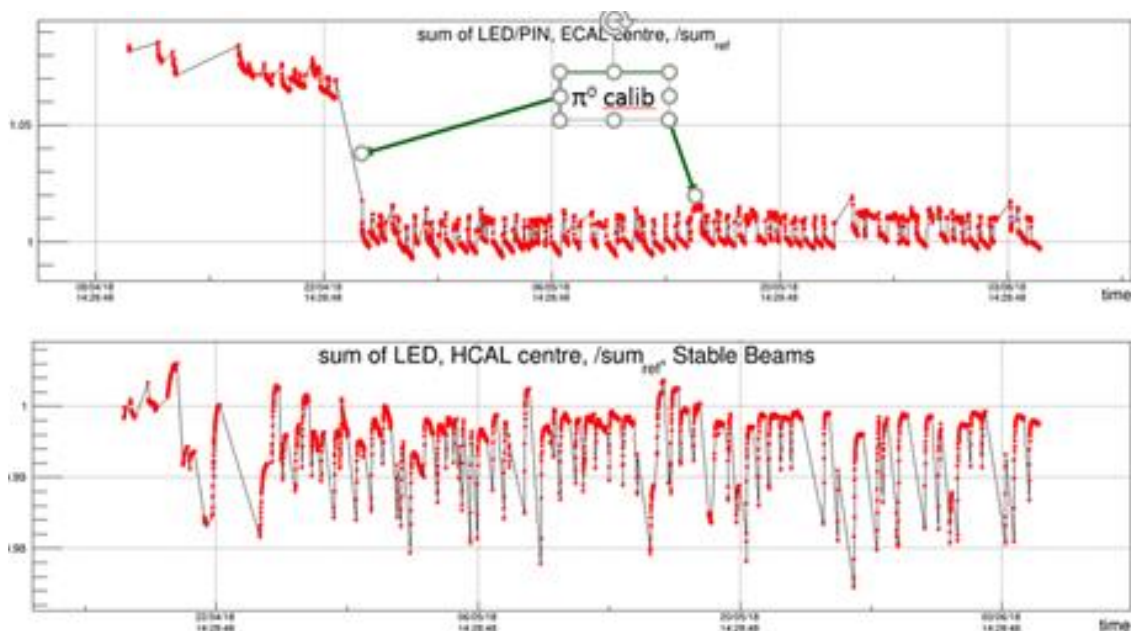


Рис. 38. Результат применения калибровки на нейтральных пионах для электромагнитного калориметра.

Обычно такая процедура запускалась вручную. В мае эта процедура была впервые запущена в автоматическом режиме.

В мае была произведена подстройка фаз синхросигнала на картах электроники предливневого детектора в попытке исключить ошибки в триггере нулевого уровня для фотонов и электронов. Замена карт входной электроники на помогла исправить ситуацию. В то же время выявлялись модули электроники с ошибками в работе: была заменена карта считывания *estell05*, которая являлась источником появления неполных событий, заменена карта входной электроники электромагнитного калориметра *EC19FEB02* и т.д. Источником десинхронизации карт входной электроники электромагнитного калориметра оказались ошибки конфигурации карт из-за ошибочной работы карты связи протокола *SPECS*. Проблема была решена включением/выключением питания *SPECS*-сервера.

Для больших экспериментов характерно наличие большого количества каналов и связанного с этим количества кабелей. На Рис. 39 показана равномерность распределения интенсивностей светодиодов для мониторинной системы электромагнитного калориметра. На левой двумерной гистограмме видны пять каналов с выпадающей интенсивностью. Четыре из них были поправлены заменой кабеля питания, а пятый – заменой разъёма *RJ45*. На правой двумерной гистограмме показаны интенсивности светодиодов мониторинной системы относительно реперных фотодиодов. Видно, что проведенные замены позволили исправить ситуацию.

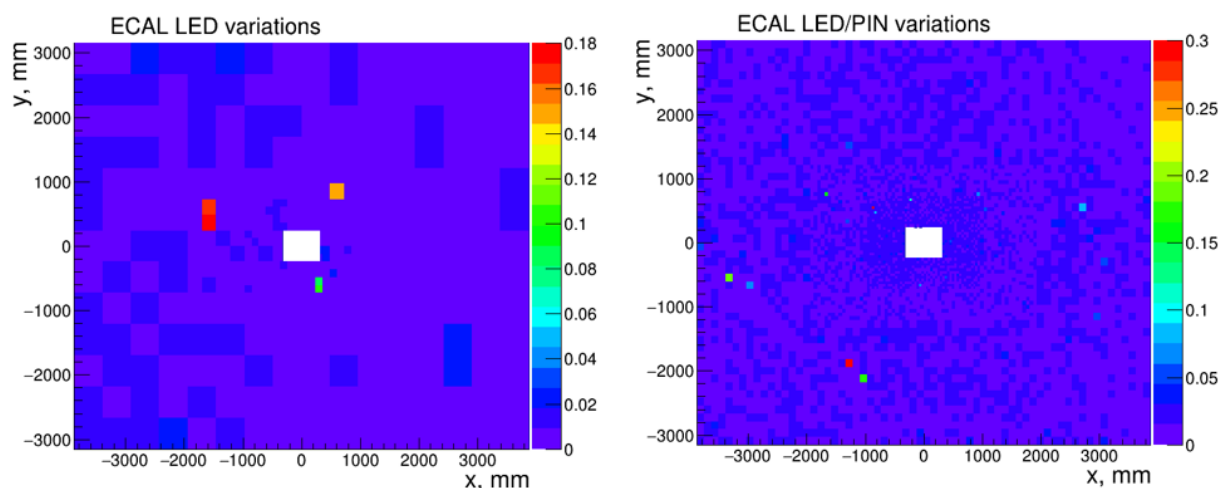


Рис. 39. Распределения интенсивностей светодиодов для электромагнитного калориметра.

Для предливневого детектора важными параметрами являются значения порогов входной электроники, поскольку величина превышения сигнала над порогом является мерой энергоснабжения в сцинтилляторах. Проверка значений и их коррекция проводятся регулярно. В конце июля были сделаны измерения порогов на специальном наборе данных без пучка. На Рис. 40 показано распределение значений порогов по площади предливневого детектора. Видна хорошая равномерность распределения и отсутствие провалов в форме прямоугольных зон, соответствующих разным картам входной электроники.

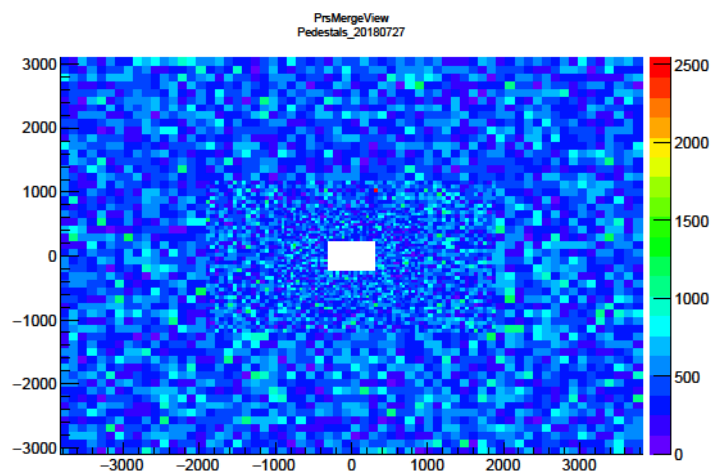


Рис. 40. Распределение значений порогов по площади предливневого детектора
Калибровка электромагнитного калориметра на нейтральных пионах является значимой только в том случае, если выбран правильный режим работы. Если напряжения на фотоумножителях будут выставлены неверно, масса нейтрального пиона будет определяться тоже с ошибкой. На Рис. 41 показаны распределения по восстановленной массе до коррекции высокого напряжения на электромагнитном калориметре и после.

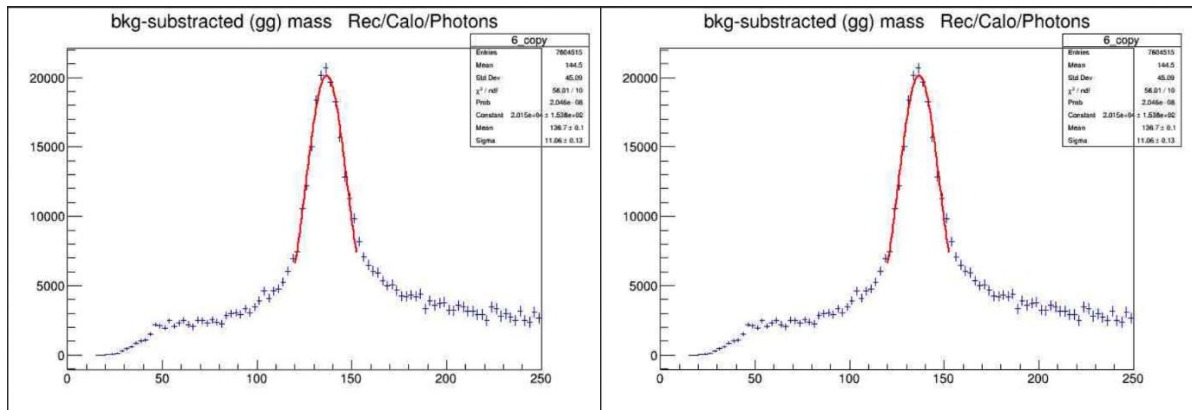


Рис. 41. Восстановленные массы нейтральных пионов до и после коррекции высоковольтного напряжения.

Разница в значении массы нейтрального пиона составила около $8 \text{ MeV}/c^2$.

Необходимость тщательной калибровки калориметров объясняется также и уменьшением световыхода сцинтиллятора под действием набранной дозы радиации. На Рис. 42 показан ход падения световыхода как в зависимости от интеграла светимости, набранного установкой БАК-би, так и от времени. Видно, что за время наблюдения световыход пластин сцинтиллятора для внутренней зоны адронного калориметра уменьшился на 35%.

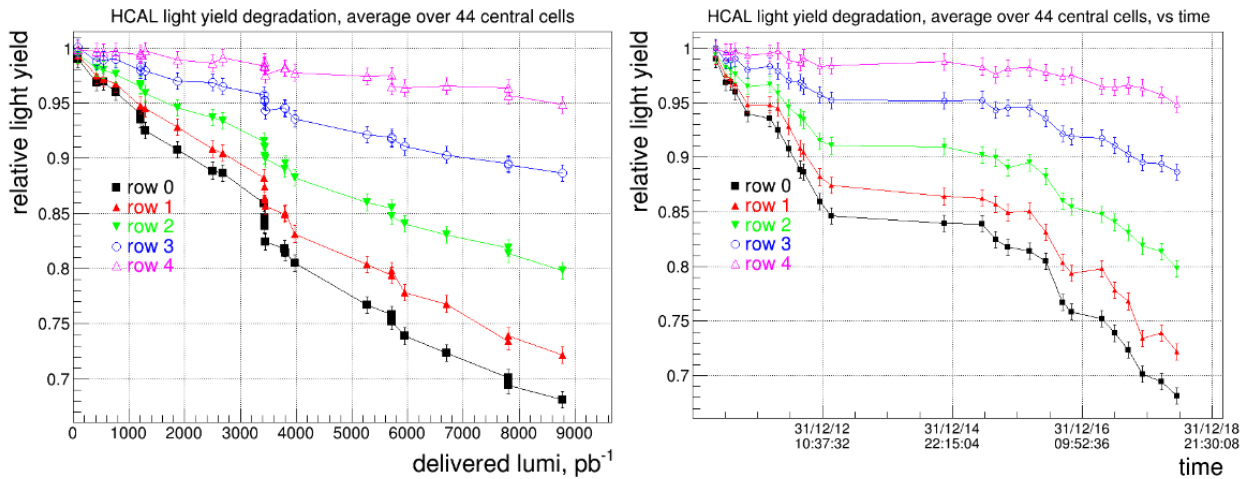


Рис. 42. Снижение световыхода пластин сцинтиллятора для внутренней зоны адронного калориметра.

По результатам работы в 2018 году калориметрическая система эксперимента БАК-би показала устойчивую работу. Уровень ошибок, связанных с десинхронизацией корзин электроники или отдельных модулей, был на приемлемом уровне. Количество неработающих каналов составило несколько единиц, что не может сказаться на качестве набранных данных.

В 2018 году сотрудники ИЯИ РАН отработали 15 смен в качестве начальников смен. Также сотрудники ИЯИ РАН принимали участие в собраниях калориметрической группы и в собраниях коллаборации БАК-би, где обсуждались вопросы: по мониторингованию калориметра, по модернизации электроники калориметра, по планируемой модернизации калориметра БАК-би и демонтажу предливневого детектора в следующем году, общие вопросы эксплуатации калориметра, общие вопросы работы эксперимента и текущего набора данных.

Подготовка к демонтажу сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов во время длинной остановки LS2 в 2019-2020 гг.

В текущем 2018 году установка БАК-би завершает набор данных в режиме аналогичном условиям предыдущих 2016-2017 гг.. В 2019-2020 годах планируется остановка ускорителя БАК и всех экспериментов для проведения работ по модернизации. Целью модернизации ускорителя и экспериментов является подготовка к работе на повышенной светимости. Основной метод модернизации в случае эксперимента БАК-би заключается в замене считывающей электроники на вариант с частотой 40 МГц и в переходе на полностью программируемый («интеллектуальный») триггер на базе прямых вычислений. Необходимость в «железном» триггере нулевого уровня L0 отпадет. В целях оптимального использования средств, принято решение об отказе от дальнейшего использования сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов. Начало демонтажа детекторов планируется на первую половину 2019 г. Основное требование – сохранить элементы детектора: модули, супермодули и детекторную электронику в целости, чтобы обеспечить их возможную эксплуатацию в дальнейшем.

Первый этап подготовки к демонтажу заключался в выработке рабочей документации по порядку операций. В этой связи в 2017 г. и 2018 г. состоялся ряд рабочих совещаний. На сегодняшний день закончен документ по планируемым работам в предварительной редакции. В целом запланированы работы по полному демонтажу сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов и свинцового конвертора, вместе с электроникой детекторов и сопряженными с ними сервисами. Демонтаж должен быть выполнен в четко определенном в документе порядке. Демонтаж супермодулей детекторов возможен только после демонтажа системы прокладки кабелей и собственно кабелей детекторов и части системы водяного охлаждения надетекторной (VFE) электроники. Вышеперечисленное касается:

- Электроники считывания (FE electronics)
- Системы низковольтного питания
- Систем высоковольтного питания и мониторингирования

- Детекторных корзин электроники (VFE)
- Светодиодной мониторинг системы
- Кабелей между супермодулями и корзинами электроники на платформе
- Кабелей предливневого детектора между платформой и бараками электроники
- Система водяного охлаждения сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов
- Свинцового конвертора
- Супермодулей сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов
- Системы перемещения и крепления детекторов и конвертора

В процессе проведения работ потребуются перемещение, открытие или закрытие калориметрических детекторов, в зависимости от этапа работ. В дополнение, некоторые специальные приспособления потребуются для перемещения и транспортировки элементов детекторов и конвертора:

- Приспособления для подвешивания краном супермодулей и частей конвертора
- Транспортная корзина для свинцового конвертора
- Транспортная корзина для супермодулей детекторов
- Кран для проведения работ по установке приспособлений для работы на высоте, для разборки плоскости свинцового конвертора и снятия супермодулей детекторов

Группа ИЯИ РАН на этапе установки детектора разрабатывала систему сборки, хранения и перевозки супермодулей детекторов. Поэтому опыт конструкторских и сборочных работ ИЯИ будет востребован при разборке детектора и перевозке супермодулей к месту хранения. Основная идея демонтажа заключается в съеме и дальнейшем хранении супермодулей в сборе вместе с электроникой. Из опыта, наработанного при монтаже детектора, известно какие приспособления потребуются. Среди ранее использовавшихся приспособлений будет востребована изготовленная в ИЯИ и имеющаяся в наличии в ЦЕРН корзина для перевозки и хранения 4 супермодулей, см. Рис. 43. Для обеспечения перевозки и хранения остальных супермодулей спроектированы и будут изготовлены до конца года дополнительные корзины большей емкости, на 8 супермодулей каждая, см. Рис. 44, 45. Точный план по синхронизации всех операций в шахте БАК-би во время остановки 2019-2020 гг. подготовлен в виде электронных документов ЦЕРН.



Рис. 43. Фотография корзины, изготовленной в ИЯИ для перевозки и хранения 4 супермодулей сцинтилляционно-падового и предливневого детектора и использованной для монтажа в 2008 г.

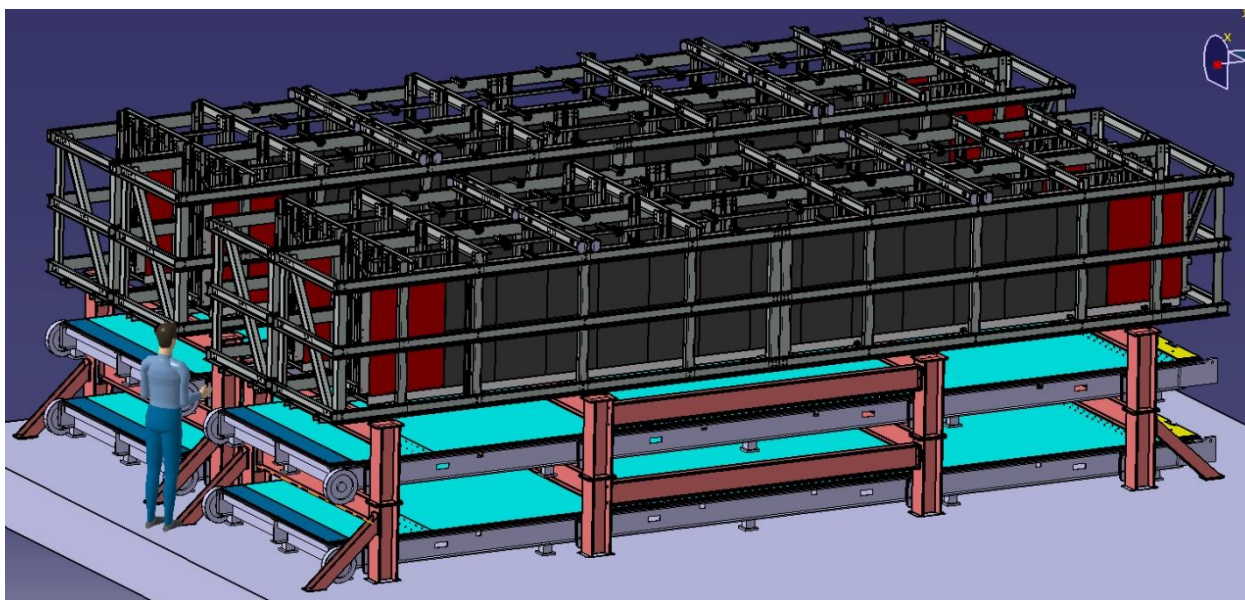


Рис. 44. Общий вид корзин для перевозки и хранения 16 супермодулей, планируемых для использования при демонтаже и для последующего хранения в 2019 г.

	May			June			July			August			September			October			November			December								
	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20	s21	s22	s23	s24	s25	s26	s27	s28	s29	s30
Design																														
CERN control/agreement																														
Price Inquiry																														
Selection																														
Production																														
Assembly																														

Рис. 45. План по изготовлению новых корзин для перевозки и хранения 16 супермодулей, планируемых для демонтажа и последующего хранения в 2019 г.

Также существенная работа требуется по подготовке участников работ с точки зрения обеспечения норм безопасности в ЦЕРН. Для этого требуется прохождение

необходимого обучения согласно курсам подготовки в электронном виде и прохождение тренировок в аудиториях. Сюда относятся курсы по общей технике безопасности и по безопасности эксперимента БАК-би, курсы по безопасному использованию электричества, безопасность работы в радиационных условиях, безопасность работы на высоте более 8 м, в том числе, использование кислородных масок и подъемных механизмов. Для управления подъемниками требуется прохождения курсов управления такими средствами и соответствующая сертификация. Выполнение этих мероприятий необходимо заранее, за два-три месяца до начала работ. Часть курсов и экзаменов предполагаемыми участниками уже пройдена.

Подготовка плат управления калориметрами для замены в 2019-2020 г.г.

Наряду с подготовкой демонтажа сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов происходит подготовка замены плат электроники калориметров, в том числе плат управления высоким напряжением, мониторной системой и калибровкой. Основная цель замены этих плат – замена на элементы с улучшенной радиационной стойкостью и обновленной функциональностью. В соответствии с планом-графиком происходит подготовка документации с описанием планов по замене электроники калориметров. На данном этапе подготовлены электронные документы «пакета рабочей процедуры» по установке электроники калориметров, в том числе плат управления высоким напряжением, мониторной системой и калибровкой источником Cs. Сами платы управления остаются теми же самыми, предполагается замена коммуникационных и программных мезонинов, как показано на Рис. 46. Мезонинные платы, всего 52 штуки с учетом запасных, были изготовлены в ИЯИ и планируется распайка элементов уже в текущем году.

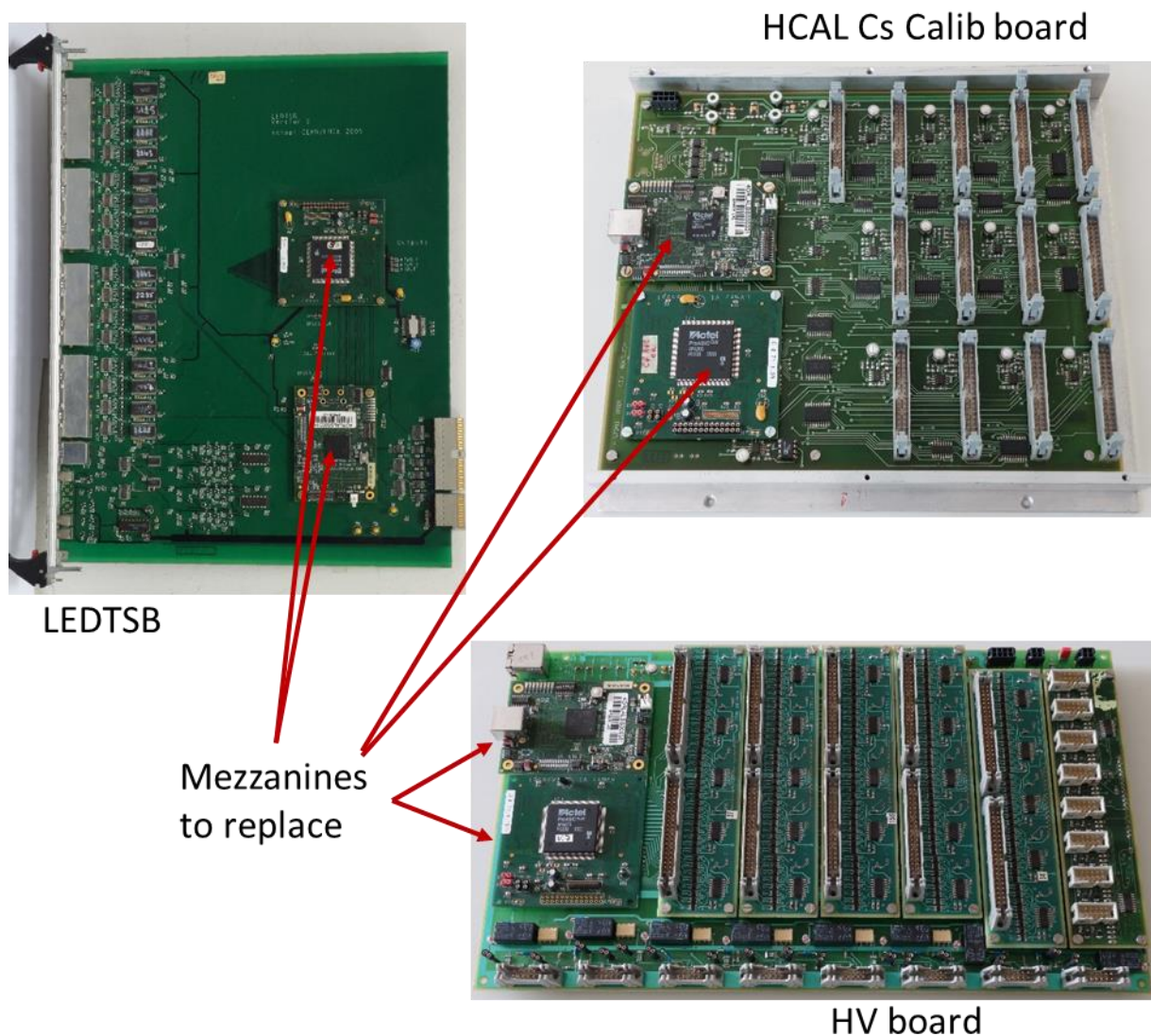


Рис. 46. Показаны фотографии плат управления высоким напряжением, мониторинг системой и калибровкой калориметров. Стрелками указаны платы-мезонины, подлежащие замене.

4. Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов.

Продолжается анализ данных эксперимента E949 с целью поиска редких распадов положительно заряженных каонов, запрещенных в первом порядке Стандартной Модели. В частности, ищется распад каона на четыре фермиона, который возможен только в более высоких порядках слабого взаимодействия. Работа с данными эксперимента E949 позволяет не только искать новую физику вне рамок Стандартной Модели, но и отрабатывать новые методы выделения редких каонных распадов и поиска следов стерильных частиц, которые применяются при анализе данных других экспериментов, в частности, NA62 (ЦЕРН).

Эксперимент NA62 (ЦЕРН) нацелен на поиск редкого распада положительно заряженного каона ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$), чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели. В рамках NA62 в 2018 г. были проведены длительные сеансы по набору статистики основного процесса, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН, в том числе и в качестве дежурных экспертов. По ходу набора статистики идет процесс анализа как основной, сверхредкой, моды каонного распада ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$), так и других мод, связанных с поиском стерильных частиц. Помимо набора новой статистики, продолжается анализ данных, накопленных в предыдущие годы, в частности, в 2016-2017 гг. Для проанализированных данных в сигнальных областях основной моды каонного распада ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) предсказывается 0.267 сигнальных событий и 0.152 ± 0.09 фоновых событий, а наблюдается одно событие. Соответствующий верхний предел на вероятность этого распада получается равным $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) < 14 \times 10^{-10}$. Этот первый результат основан примерно на 2% полной статистики, набранной в 2016-2017 гг., но он очень важен как демонстрация правильности концепции эксперимента.

Продолжается анализ данных эксперимента E949 с целью поиска редких распадов положительно заряженных каонов, запрещенных в первом порядке Стандартной Модели. В частности, ищется распад каона на четыре фермиона, который возможен только в более высоких порядках слабого взаимодействия. Работа с данными эксперимента E949 позволяет не только искать новую физику вне рамок Стандартной Модели, но и отрабатывать новые методы выделения редких каонных распадов и поиска следов стерильных частиц, которые применяются при анализе данных других экспериментов, в частности, NA62 (ЦЕРН).

Была продолжена работа по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, используя методы, алгоритмы и опыт, полученные участниками проекта из группы ИЯИ в эксперименте E949. Исследовались основные фоновые процессы и критерии отбора возможных распадов тяжелых нейтрино и подавления фона в эксперименте NA62 в различных интервала масс для распадных мод $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\text{H}}$ и $K^+ \rightarrow e^+ \nu_{\text{H}}$. Анализ данных, накопленных в 2016-2018 гг., продолжается, в том числе и по поиску различных мод каонного распада: $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$; $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^- \gamma$.

Продолжается анализ данных эксперимента E36 (J-PARC), основной целью которого является изучение универсальности взаимодействий мюонов и электронов по распадам каонов в мюонную и электронную моды.

Кроме того, теоретически исследовалась регенерация короткоживущей компоненты К-мезонов. Это интересное и важное явление напрямую связано с СР -, Т- и СРТ-инвариантностью. Предыдущие расчеты, основаны на старой модели процесса, которая исходит из несвязных уравнений движения. Показано что это является принципиальной ошибкой, которая приводит к качественному расхождению результатов. Были предложены принципиально новые модели, основанные на теории возмущений и на точном решении системы связанных уравнений движения. Показано, что оба данных подхода дают одинаковые результаты. Исследован вопрос, относящийся к общей теории осцилляций в поглощающей среде. Как правило, поглощение описывается оптическим потенциалом. Однако теория процесса развита для уравнения движения, но не системы связанных уравнений движения. Показано что в последнем случае следует использовать эрмитов Гамильтониан. Это приводит к принципиально другой модели процесса. Она предложена в опубликованном препринте. Все данные результаты являются принципиально новыми.

5. Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонном ускорительном комплексе J-PARC.

5.1. Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы по набору данных как в нейтринной, так и в антинейтринной моде (в феврале – июне 2018 г.), в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН.

В нейтринном эксперименте T2K проведены измерения осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в электронные нейтрино и антинейтрино. Основываясь на комбинированном анализе полученных данных, а также данных реакторных экспериментов, эксперимент T2K впервые получил указание на нарушение СР симметрии в нейтринных осцилляциях с наиболее вероятной величиной СР нечетной фазы около -90 градусов, соответствующей максимальному нарушению. Значения фазы $\delta_{CP} = 0$ и $\delta_{CP} = \pi$, которые соответствуют случаю, когда СР симметрия сохраняется, исключены с уровнем достоверности 95% (что соответствует значимости 2σ). Дальнейший анализ всех данных, набранных к июню 2018 г., продолжается.

Получено ограничение на легкие стерильные нейтрино из данных Супер-Камиокандэ, полученных с пучком нейтрино из J-PARC. В результате получены лучшие

ограничения на параметр смешивания $\sin^2\theta_{24}$ в диапазоне масс нейтрино от 10^{-4} до 3×10^{-3} эВ².

Зарегистрированы первые нейтринные события от реакции квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино в комбинации детекторов WAGASCI (мишень пластик + вода) и Baby-MIND (магнитный детектор).

5.2. Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино

В 1-м квартале 2018 года была завершена работа по монтажу всех модулей детектора Baby-MIND, состоящего из стальных пластин 200×300 см², толщиной 3 см и активных плоскостей из вертикальных и горизонтальных сцинтилляционных детекторов, на установке ближнего детектора ND280 эксперимента T2Kв J-PARC, Япония. Пластины намагничиваются за счет тока 1.5 кА, проходящего через алюминиевые катушки, намотанные вокруг стальных пластин. В центральной части детектора магнитное поле составляет величину 1.5 Т. В мае-июне 2018 г. детектор был запущен в работу и были зарегистрированы первые нейтринные события с пучком мюонных нейтрино. Детектор Baby-MIND готов к дальнейшему набору данных в качестве трековой части детектора WAGASCI.

5.3. Проект Нейтринная платформа NP05

В рамках проекта Нейтринная платформа NP05 проводятся НИОКР работы по созданию вето- и триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также нового детектора – активной мишени SuperFGD– для регистрации нейтринных взаимодействий. В текущем варианте предполагается сборка этого нового детектора из большого числа сцинтилляционных кубиков (около 2 млн кубиков из полистирола с добавками и со светоотражающим покрытием) со стороной 1 см, в каждом из которых проделываются три сквозных отверстия (во взаимно перпендикулярных направлениях x , y , z) для оптических спектросмещающих волокон, свет с которых снимается с помощью компактных лавинных фотодиодов. Внешние размеры детектора (в текущем варианте): 200 см х 200 см х 56 см. Сцинтилляционные сигналы с оптоволокон регистрируются микропиксельными лавинными фотодиодами Hamamatsu MPPC S13360. Сигналы со всего детектора будут считываться с помощью примерно 60 тысяч лавинных фотодиодов и каналов электроники. Высокая сегментация данного детектора позволит улучшить геометрическое разрешение при определении координат точки нейтринных взаимодействий (вершины), что, в свою очередь, приведет к

уменьшению систематических погрешностей измерения параметров нейтринных осцилляций.

Предварительные тесты прототипа детектора показали очень хорошие параметры этого детектора. Световыход/MIP составил около 140 фотоэлектронов для 3D сигнала с трех спектросмещающих волокон, временное разрешение около 600 пс. Монте Карло моделирование показывает хорошее разделение электронов и фотонов, а также низкий порог регистрации протонов около 200 МэВ/с в этом детекторе. В 2018 году были проведены тесты большого прототипа детектора (состоящего из более чем 9 тысяч кубиков) на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе, которые также показали хорошие результаты.

Прототип состоит из 9216 кубиков и имеет 1728 спектросмещающих волокон с лавинными фотодиодами. Создание такого прототипа является важным шагом по изучению возможности создания полномасштабного детектора из 2 миллионов сцинтилляционных кубиков. Предварительный анализ данных показал хорошие параметры детектора: световыход, временное разрешение, идентификацию частиц и т.д. Анализ данных продолжается.

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

Важнейшие результаты, полученные в 2018 году.

Для экспозиции нейтринного пучка $8.85 \cdot 10^{20}$ протонов на мишень получены следующие результаты.

6.1. Регистрация мюонных нейтрино.

На дальнем детекторе зарегистрировано 126 событий (включая 9 фоновых событий), рожденных мюонными нейтрино. В отсутствии осцилляций ожидалось зарегистрировать 723 события.

6.2. Регистрация электронных нейтрино

На дальнем детекторе зарегистрировано 66 событий (ожидаемый фон 20 событий), от взаимодействия электронных нейтрино ν_e , которые появились в пучке мюонных нейтрино из-за $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. В результате подгонки спектров мюонных и электронных событий, 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_{32}^2 (10^{-3}эВ^2) - [2.37, 2.52], $\sin^2(\theta_{23})$ - [0.43, 0.51] и [0.52, 0.60], $\delta_{\text{CP}}(\pi)$ - [0, 0.12] и [0.91, 2]. Обратная иерархия масс нейтрино ($m_3 < m_1 < m_2$) исключается на 90% доверительном уровне. Полученные ограничения (90% доверительный уровень) на разности квадратов масс нейтрино Δm_{32}^2 и значения $\sin^2(\theta_{23})$ угла смешивания θ_{23} представлены на Рис. 47 в сравнении с результатами других экспериментов.

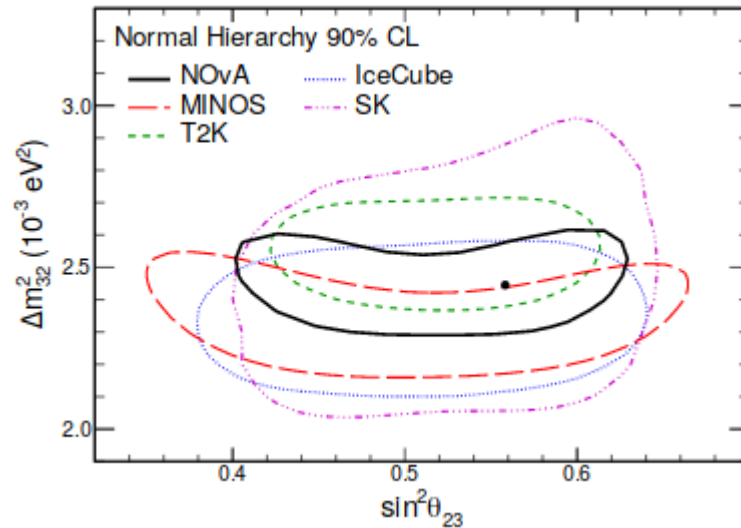


Рис. 47 Ограничения (90% доверительный уровень) на разности квадратов масс нейтрино Δm_{32}^2 и значения $\sin^2(\theta_{23})$

6.3. Теоретические исследования

Предложена модель для описания квазиупругого рассеяния лептонов на ядрах с учетом вклада двухчастичных токов обменных мезонов и изобарных токов. Показано, что эта модель позволяет с хорошей точностью описать данные об инклюзивных сечениях рассеяния электронов и полных сечениях рассеяния (анти)нейтрино на ядрах углерода.

7. Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс в бета-распаде газообразного трития в области масс 0,1–8 кэВ, как кандидатов на роль частиц тёплой тёмной материи.

7.1. Моделирование отклика кремниевого детектора на электроны с энергией до 20 кэВ.

В 2018 году проводились расчеты отклика кремниевого детектора при регистрации электронов от распада трития. Такие расчеты важны для сравнения с экспериментом и для дальнейшего использования при оценке числа событий ниже порога регистрации аппаратуры.

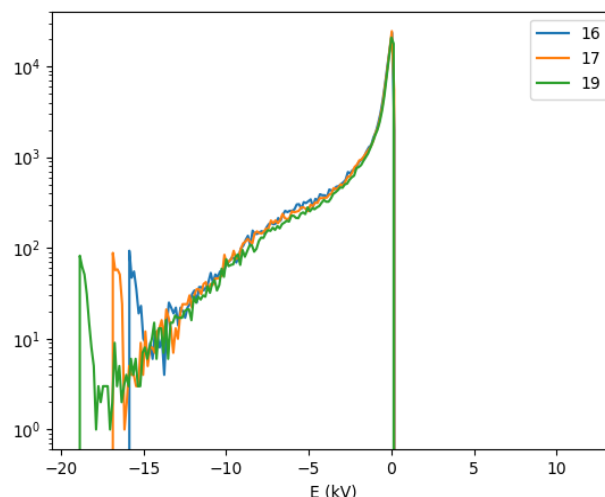


Рис. 48. Расчет доли выделенного в детекторе сигнала относительно первичной энергии электрона при трех значениях. Учитывалось влияние магнитных и электростатических зеркал спектрометра для рассеянных назад электронов. Энергетическое разрешение электроники не учтено.

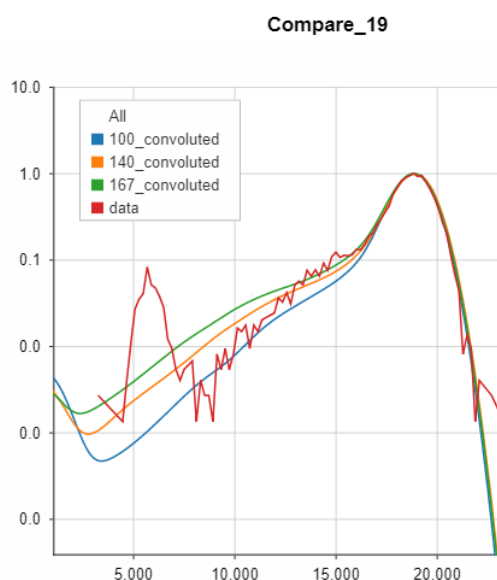


Рис. 49 Сравнение расчетов при разных значениях мертвого слоя детектора с экспериментальными данными при калибровке электронной пушкой при 19 кэВ.

7.2. Набор статистики. Проведение измерений бета спектра трития с использованием кремниевого детектора дрейфа – SDD

Для расширения возможностей по измерению спектра электронов необходимо иметь низко шумящие детектор и электронику, которые позволили бы опустить порог

регистрации и существенно уменьшить ряд систематических эффектов. Такие возможности открываются с использованием кремниевых дрейфовых детекторов, SDD. Такие детекторы имеют ряд неоспоримых преимуществ: очень тонкое входное окно, распределенный потенциал, который позволяет применить центральный анод с очень малой емкостью (меньше одного пикофарада), а значит, уменьшить уровень шумов. Кроме этого, возникает возможность организовать много каналов детектирования с, практически, отсутствием мертвых зон. В полупроводниковой лаборатории в Институте Планка в Мюнхене начато изготовление отдельных опытных образцов таких детекторов. Первоначально они разрабатывались для регистрации мягких гамма квантов для астрофизических исследований. Было предложено испытать эти детекторы для низкоэнергичных электронов.

В 2018 году в первом сеансе в апреле участвовала группа из Института Макса Планка, Мюнхен. Образцы 7-пиксельных детекторов были прокалиброваны на различных источниках электронов доступных только на «Троицк нью-масс». Это электронная пушка с энергией до 20 кэВ, электроны автоэмиссии при определенной конфигурации магнитных полей, и электроны от трития.

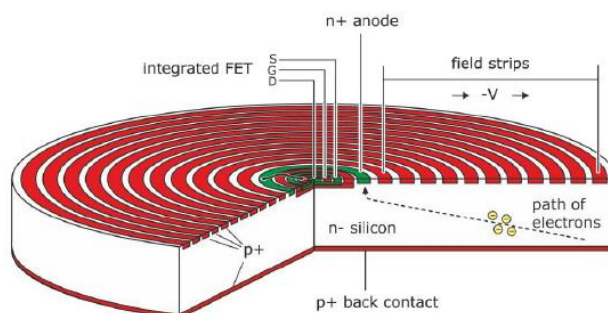


Рис. 50 Структура одного пикселя SDD используемого в измерениях.

В сеансе активно участвовали наши коллеги из Германии и Франции. Электроника эффективно математически подавляла шумы с использованием трапецеидального метода обработки формы оцифрованного сигнала. Детектор показал очень хорошие параметры по уровню шумов и энергетическому разрешению, которое составило примерно 400 эВ (ширина на полу высоте) для электронов с энергией 20 кэВ. Дальнейшее лучшение шумов возможно с применением численных фильтров шумов.



Рис. 51. Часть регистрирующей аппаратуры, установленной в задней части спектрометра.

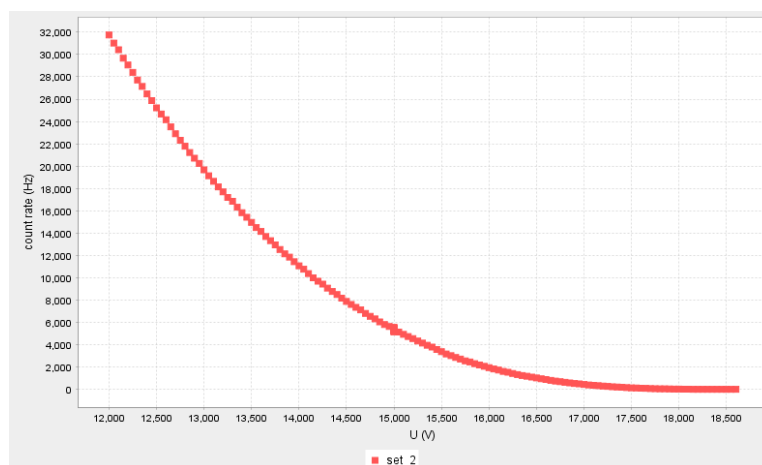


Рис. 52. Предварительный интегральный бета-спектр трития, полученный непосредственно с одного из каналов регистрации в одном из сотни измеренных файлов.

8. Участие в проведении измерений массы нейтрино на установке КАТРИН в диапазоне 1 эВ.

8.1. Проект КАТРИН

В 2001 году, в Технологическом институте в Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) был принят проект КАТРИН по созданию новой установки (см. Рис. 53), которая должна поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне $0,2 \text{ эВ}/c^2$ [1].

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк нью-масс», которая является прототипом установки КАТРИН [2].

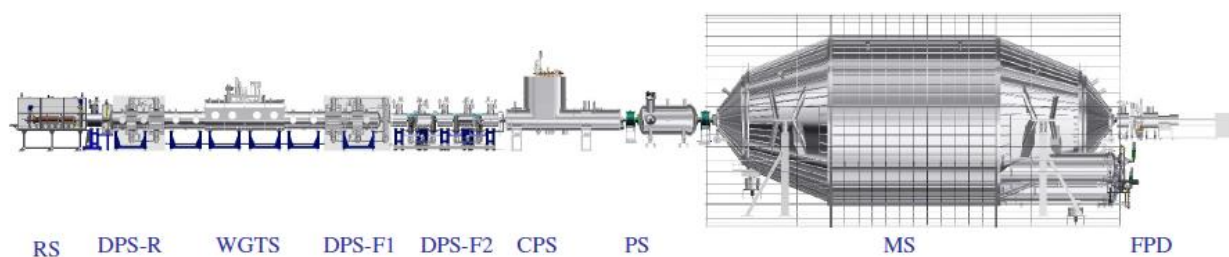


Рис. 53. Установка КАТРИН.

RS-задняя стенка, DPS-R- задняя дифференциальная откачная станция, WGTS-безононный 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.

Многие параметры новой установки являются рекордными: общая длина 70м, диаметр спектрометра 10м и вакуум на уровне $1 \cdot 10^{-11}$ мбар [3], безононный источник трития активностью 100 ГБк и канал транспортировки общей длиной 25 м сформированный цепочкой из 29 сверхпроводящих соленоидов с полем от 3.6 до 5.6 Тл, температура газового источника, поддерживаемая в пределах 25 мК, и т.д.

Проект КАТРИН является полигоном для применения самых передовых экспериментальных технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей и т.д. Следует отметить также применение последних достижений в области программного обеспечения как сбора, так и обработки физических данных. Таким образом, участие в проекте КАТРИН предоставляет возможность находиться в курсе современных подходов в физическом эксперименте. Это особенно важно для подготовки молодых сотрудников.

14-го октября 2016 года начался запуск установки как целого. Впервые электроны, излученные с «задней стенки» установки, были зарегистрированы детектором, расположенным на ее противоположном конце, на расстоянии 70м.

В 2018 году завершена подготовка установки к проведению исследований спектра трития в проектном режиме. Этому факту была посвящена связанная с первым напуском трития в систему «Инаугурация КАТРИН», состоявшаяся 11.06.2018 (см. Рис. 54).

На установке «КАТРИН» в 2018г. были проведены два сеанса.

Первый сеанс проводился в период с 18.05 по 20.06. Основной целью была проверка температурной стабилизации трубы источника газообразного трития, стабильность магнитного поля, стабильности давления в буферном объеме системы

инъекции, стабильность состава газовой смеси. Полученные параметры оказались в пределах спецификаций и даже превосходили их (Рис. 55).



Рис. 54. 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

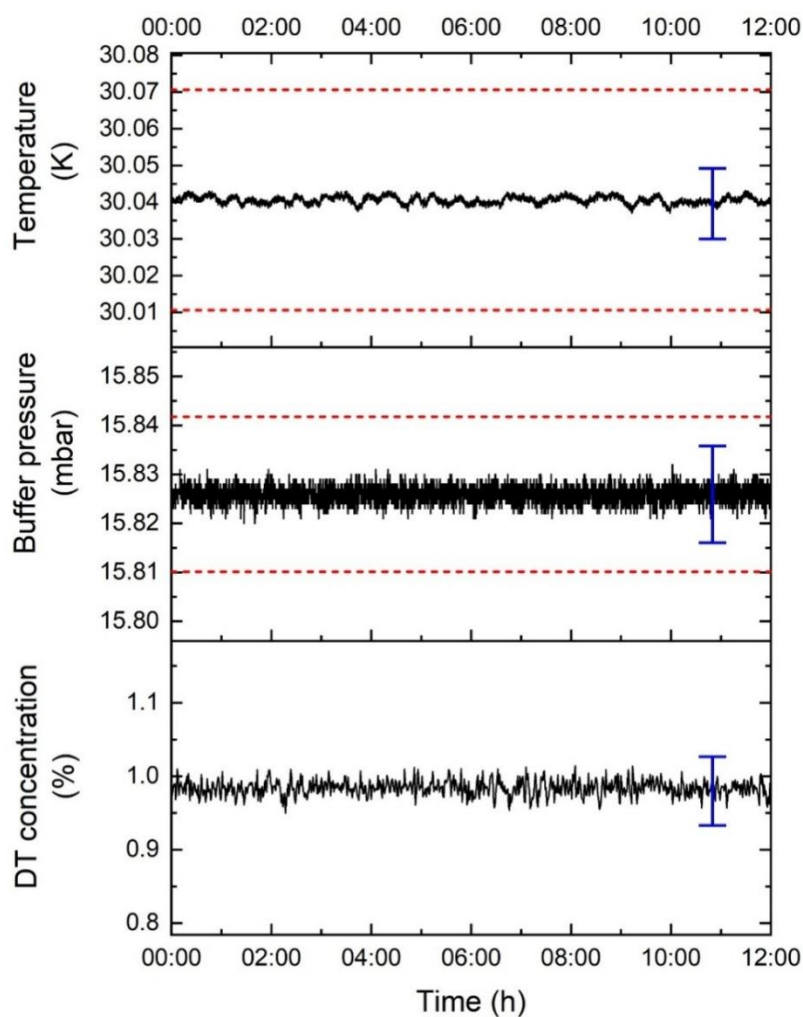


Рис. 55. Параметры газового источника. Красный пунктир –спецификации, голубой интервал – систематическая неопределенность.

Первый тритий был запущен с систему 11.06 на уровне 1% от номинальной величины. Система циркуляция трития была запущена не в полном объеме и инжекция проводилась из заранее подготовленных сосудов с готовой смесью.

Были проведены первые измерения спектра трития и протестированы системы перехвата ионов трития между источником и спектрометром.

Полностью система циркуляции в газовом источнике была опробована в сеансе 03.09 – 22.10. В качестве циркулирующего газа использовался чистый дейтерий. Была продемонстрирована устойчивая работа системы при объеме газа в источнике от 1% до 100% от номинального значения. Осуществлялась постоянная очистка от не водородных газов. Проведен запуск «задней секции», содержащей позолоченный электрод для выравнивания электрического потенциала в газовом источнике и электронную пушку для генерирования тестового пучка электронов. Были испытаны разные схемы засветки фотокатода пушки, опробован метод проводки электронного пучка через канал транспортировки ит.д.

При разных толщинах источника была проведена серия измерений спектра неупругих потерь электронов в дейтерии. Причем измерения проводились как в режиме интегрального спектрометра, так и в режиме спектрометра по времени пролета.

8.2. Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН

8.2.1. Систематические погрешности связанные с спектром неупругих потерь электронов при рассеянии на молекуле трития.

Измерения спектра неупругих потерь при рассеянии электронов на молекулах газообразного трития были выполнены ранее на установке «Троицк ню-масс» [4]. Для обработки данных в эксперименте КАТРИН нужно провести новые измерения спектра неупругих потерь, существенно повысив их точность. В том числе, необходимо уточнить представления о систематике таких измерений.

В ноябре 2018 на совещании коллаборации был сделан доклад о противоречиях в существующих данных по спектру неупругих потерь. В частности, не совпадают удельные вклады электронного возбуждения и ионизации (см. Табл. 4)

Табл.4 – Вклады возбуждения электронных состояний и ионизации

Источник, метод	Excitation/Ionization
R.K.Janev, W.D.Langer, K.Evans, Jr., D.E.Post, Jr / Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas. Cross Sections and Reaction Rate coefficients // ISBN 3-540-17588-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York. Экстраполяция экспериментальных данных, полученных при энергии электронов ниже 2 кэВ.	60/40
В.Н.Асеев и др. European Physical Journal D10 (2000) ,39-52. Эксперимент при энергии электронов 18 кэВ	57,4/42,6
J.W. Liu Phys. Rev. A7 (1973) 103 Теоретический расчет, Оба сечения примерно следуют одной зависимости $\sim 1/T \ln T$	53,4/46,6

8.2.2. Разработка программного обеспечения проекта КАТРИН и обработка данных.

Для обработки данных сеанса с 18.05 по 20.06. использовалась модель спектра электронов для поиска стерильных нейтрино в тритиевом спектре (SSC-Sterile), разработанная совместно с группой проф. Сюзанны Мертенс, Институт физики Макса Планка, Мюнхен). Эта модель последовательно учитывает физические эффекты, которые оказывают влияние на форму спектра вдали от граничной энергии. Пример фита данных с использованием модели SSC-Sterile приведён на Рис. 56.

В модели включены: эффекты, связанные с рассеянием электронов на задней стенке установки КАТРИН; зависимость сечения рассеяния электронов на молекулах в источнике от энергии электронов; изменения углового распределения электронов при многократном рассеянии в источнике.

Модель позволяет учесть изменения углового распределения электронов при прохождении электрода пост-ускорения, а также эффекты обратного рассеяния на детекторе и отражения электромагнитными полями.

Такие эффекты влияют на чувствительность эксперимента к вкладам стерильного нейтрино с массой до нескольких кэВ и являются основными источниками систематической неопределённости. Включение этих эффектов на уровне модели

позволяет корректно проводить статистическую обработку данных и оценивать потенциальную чувствительность эксперимента к дополнительным массовым состояниям нейтрино.

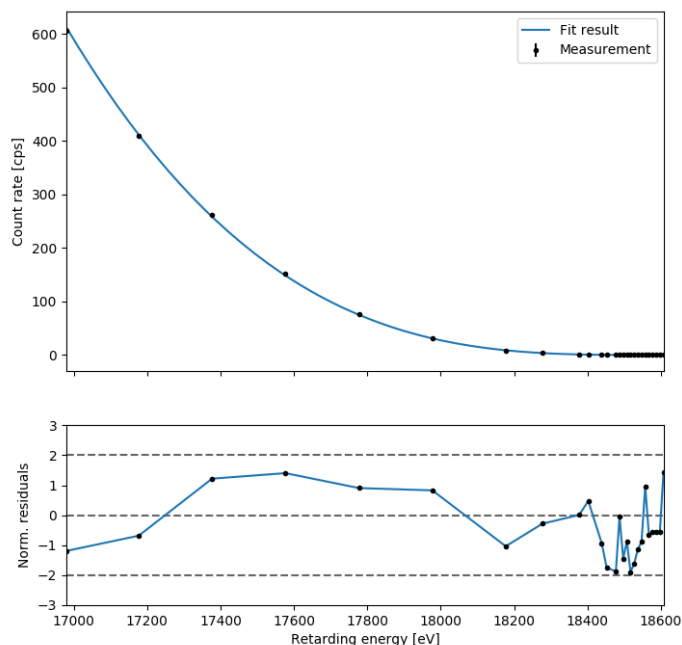


Рис. 56. Обработка тритиевого спектра из данных сеанса с 18.05 по 20.06. с помощью модели SSC-Sterile.

8.2.3. Измерение спектра неупругих потерь электронов при рассеянии на молекуле трития.

Потери энергии при рассеянии вносят одну из основных систематических неопределённостей при измерениях электронов тритиевого спектра. В сеансе 03.09 – 22.10 были проведены измерения функции потерь энергии электронами при рассеянии на молекулах D₂ в источнике эксперимента КАТРИН. Для измерений была использована электронная пушка (монохроматический источник электронов с высокой интенсивностью), установленная на задней стенке установки КАТРИН.

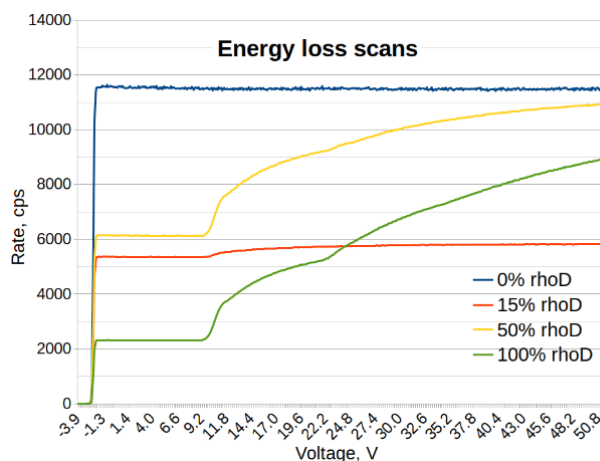


Рис. 57. Функции пропускания для разных давлений газа в источнике (в долях от номинального)

Измеренные спектры пропускания для различных давлений газа приведены на Рис. 57. Такой набор данных позволяет извлечь спектр потерь энергии (см. детальный анализ в работе [5]).

Кроме того, были проведены измерения функции потерь по методике времени пролета, когда пушка работает в импульсном режиме, а спектрометр используется в качестве пролетной базы. Такой подход позволяет получить напрямую дифференциальный спектр электронов и соответствующий спектр потерь энергии. Характерная форма спектра потерь приведена на Рис. 58.

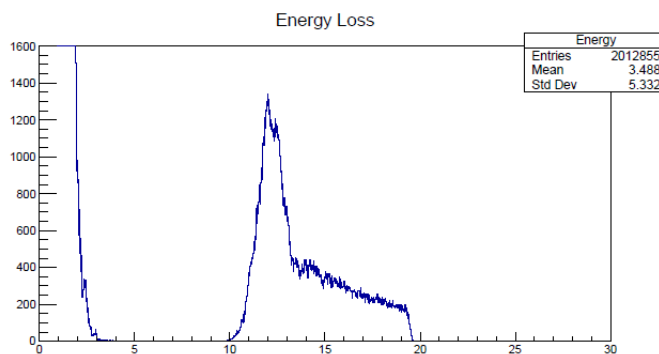


Рис. 58. Пример восстановленной функции потерь энергии

Сотрудники ИЯИ РАН принимали участие в проведении сеанса 03.09 – 22.10 и обработке данных.

8.2.4. *Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино.*

Одной из основных проблем проведения эксперимента по поиску тяжелых стерильных нейтрино является необходимость регистрировать высокие потоки электронов с энергией масштаба 10-20 кэВ с разумным уровнем просчетов. 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 - 10^7 в секунду для каждого единичного сектора.

В октябре 2018 сотрудниками ИЯИ РАН была восстановлена работоспособность стенда испытаний детекторов, разработанного в ИЯИ РАН году и установленного в 2002 году в КИТ, Карлсруэ (см. Рис. 59).

На стенде в КИТ, Карлсруэ исследовались счетные характеристики детектора на базе «Детектора отраженных электронов» производства ЗАО «ТЕХНОЭКСАН» [6]. (<http://www.technoexan.ru/>) Был измерен отклик детектора при облучении монохроматическими электронами разных энергий (Рис. 60). Ширина одиночного импульса по основанию не более 40 нс. В ИЯИ РАН проводится работа по оптимизации подключения предусилителя с целью сократить это время и улучшить амплитудное разрешение.

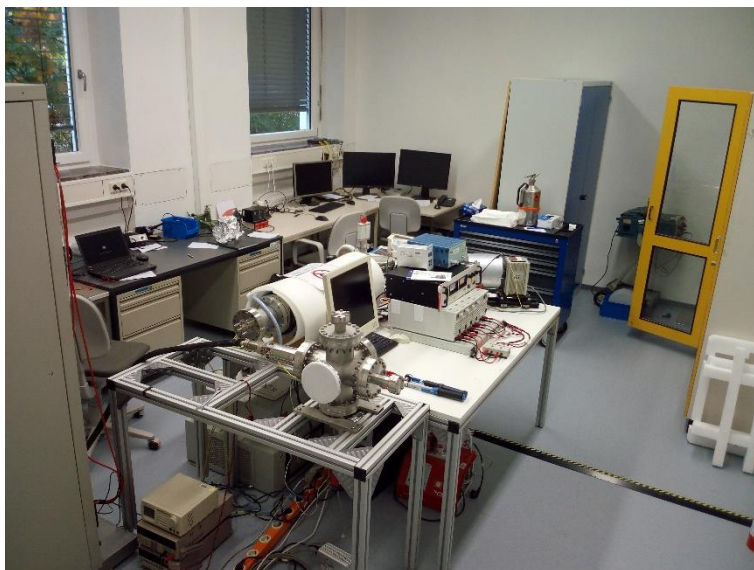


Рис. 59. Стенд испытаний детекторов разработанный в ИЯИ РАН и установленный в КИТ, Карлсруэ.

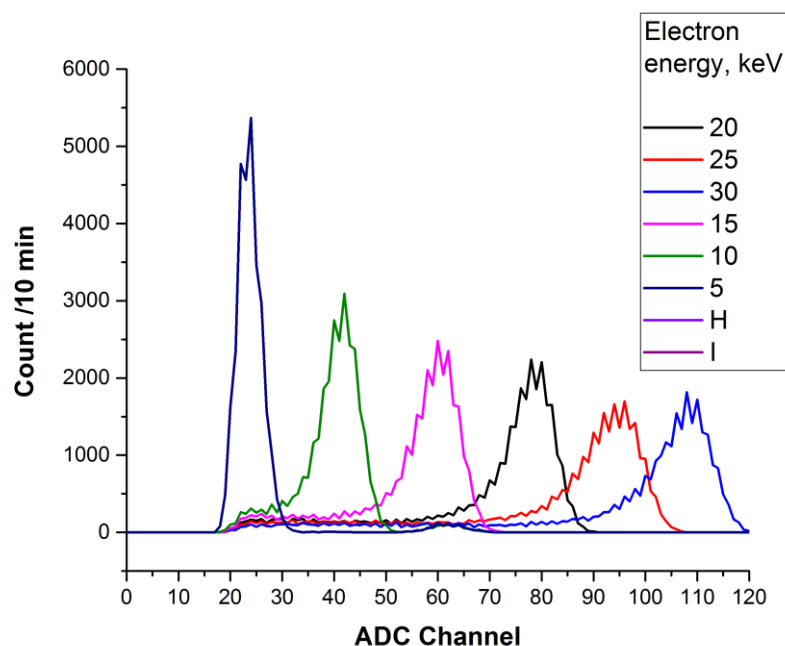


Рис. 60. Амплитудные спектры «детектора отраженных электронов» при облучении монохроматическими электронами различных энергий.

Дополнительная литература:

1. <http://www.katrin.kit.edu/>
2. arXiv:hep-ex/0109033v1
3. M.Arenz et al. / Commissioning of the vacuum system of the KATRIN Main Spectrometer // Journal of Instrumentation 11, P 0401, 2016.
4. V.N.Aseev et.al. // European Physical Journal D10 (2000) , 39-52
5. V. Hannen et al. // Astroparticle Physics 89 (2017), 30-38
6. <http://www.technoexan.ru/>

9. Исследование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Разработка методики регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с помощью низкофонового газового детектора. Поиск массивных «скрытых» фотонов с помощью мультикатодного счётчика.

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 [1, 2]. Общий вид счетчика в момент его сборки изображен на Рис. 61.

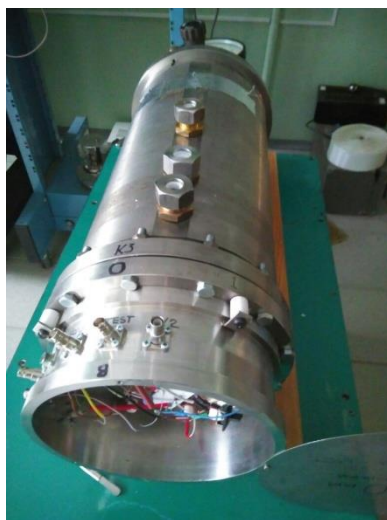


Рис. 61 Общий вид мультикатодного счетчика

В этом счетчике, схематически изображенным на Рис. 62, рабочей поверхностью является внешний катод цилиндрической формы, из которого эмитируются электроны. За счет относительно большой (примерно 0.3 м^2) площади катода достигается высокая

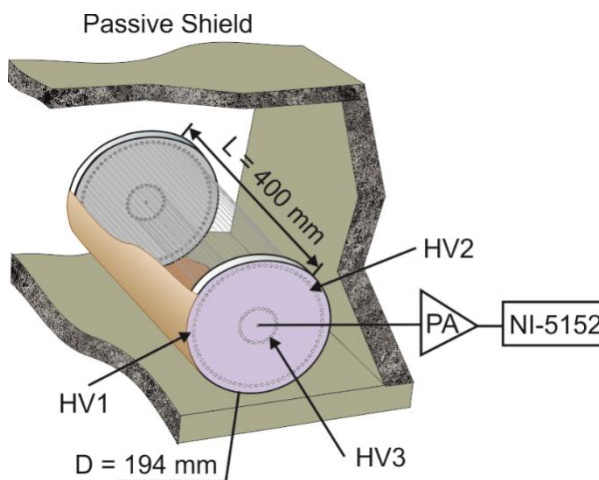


Рис. 62 Схема мультикатодного счетчика

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 электронной лампе. На этот катод подается либо положительный (относительно потенциала сплошного катода), либо

отрицательный (запирающий) потенциал. На Рис. 63, 64 представлены картины потенциала полей для этих двух конфигураций.

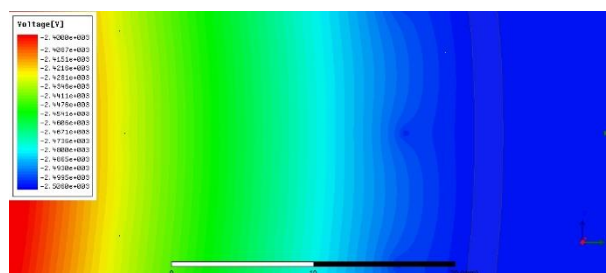


Рис. 63 Потенциалы поля в конфигурации 1

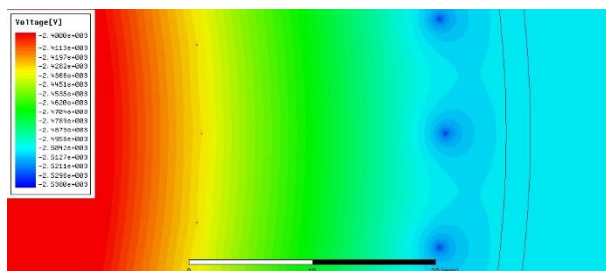


Рис. 64 Потенциалы поля в конфигурации 2

На Рис. 65 показаны напряженности полей в этих конфигурациях.

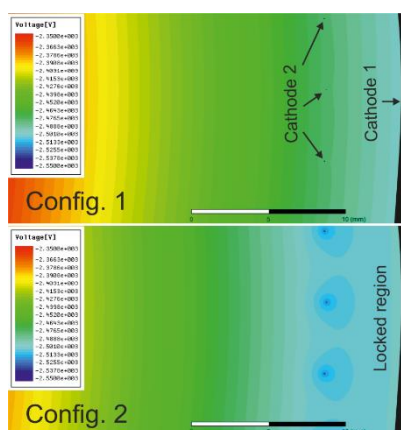


Рис. 65 Напряженности поля в конфигурации 1, 2

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. Рис. 66. Получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов из металлического катода $(0.81 \pm 0.08) \times 10^{-4}$ Hz/cm². По результатам измерений получен предел на константу смешивания для скрытых фотонов.

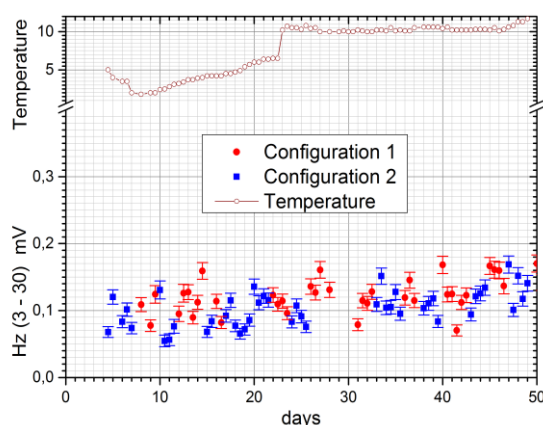


Рис. 66. Результаты измерений с алюминиевым счетчиком.

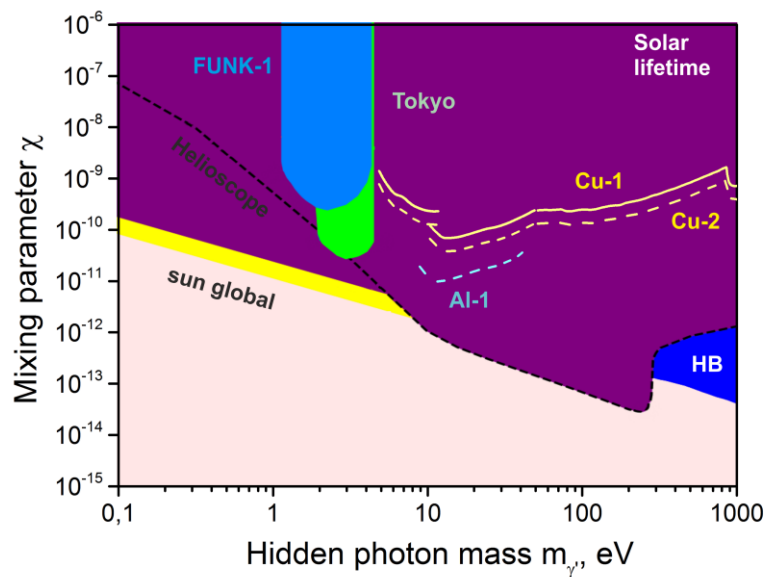


Рис. 67. Ограничения на величину константы смешивания по данным, полученным с помощью мультикатодного счетчика с медным (Cu-1, Cu-2) и алюминиевым (Al-1) катодом.

Дополнительная литература:

1. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. / On a Search for Hidden Photon CDM by a Multicathode Counter // Adv.High Energy Phys. 2016 (2016), 2058372
2. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. / A multi-cathode counter in a single-electron counting mode // NIM A 910, (2018), 164
3. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V./ Search for Hidden Photon Dark Matter Using a Multi-Cathode Counter // Proceeding of ICPPA-18, Moscow, 2018

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

10.1. Эксперимент GERDA

1. Продолжена эксплуатация действующей установки GERDA-II. Российские учёные участвовали в эксплуатации установки в 2018 году. Общий вид установки, расположенной в подземной лаборатории LNGS INFN в Гран-Сассо в Италии показан на Рис. 68.

В GERDA используются детекторы, изготовленные из особо чистого германия, обогащенного изотопом ^{76}Ge . Поскольку германий является одновременно источником и детектором искомых событий, эффективность регистрации близка к максимально возможной. Кроме того, экспериментальная установка компактна и требует минимального количества конструкционных материалов, что является принципиально важным для достижения низкого уровня фона. Высокое энергетическое разрешение, присущее германиевым детекторам, и инновационные экспериментальные методики, разработанные коллаборацией GERDA, обеспечивают рекордное подавление естественного радиоактивного фона. Так как период полураспада $0\nu\beta\beta$ процесса на много порядков превышает возраст Вселенной, именно снижение фона является наиболее критичным для увеличения чувствительности эксперимента.



Рис. 68. Общий вид установки, расположенной в подземной лаборатории LNGSINFN в Гран-Сассо.

«Голые» германиевые детекторы погружены в криостат, заполненный 64 м^3 жидкого аргона, имеющего температуру -190°C . Криостат находится в водяном резервуаре объемом 590 м^3 , который, в свою очередь, расположен в подземной лаборатории Гран Сассо, защищающей установку от космического излучения. Аргон и вода, используемые в установке, являются очень чистыми и служат дополнительной защитой от окружающей радиоактивности. При этом предусмотрена возможность регистрации событий, вызванных фоновым излучением, что позволяет успешно идентифицировать фоновые сигналы, возникающие в аргоне и воде.

На Рис. 69 показан момент сборки гирлянды германиевых детекторов перед опусканием в жидкий аргон.

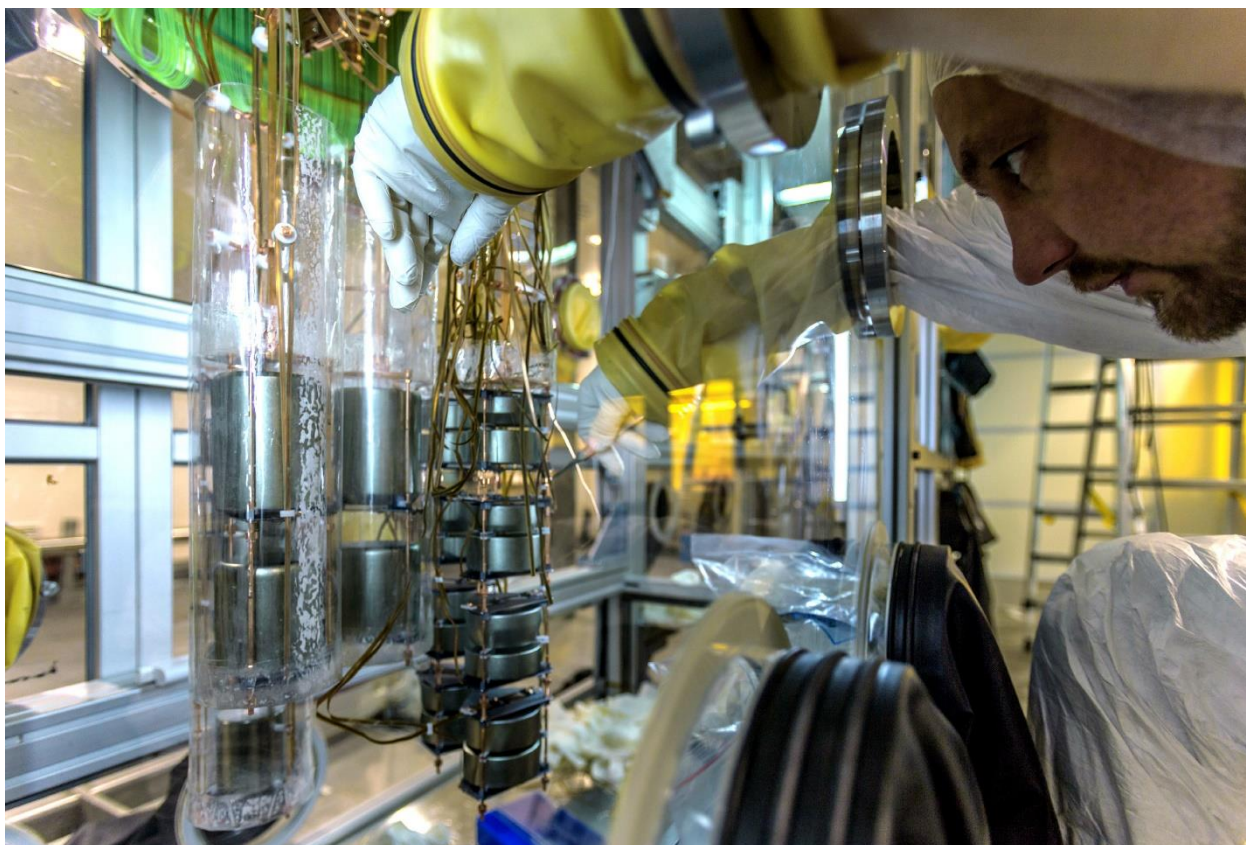


Рис. 69. Момент сборки гирлянды германиевых детекторов перед опусканием в жидкий аргон в чистой атмосфере.

Новейшие методики подавления фоновых сигналов обеспечили рекордно низкий уровень фона, что позволяет считать GERDA первым «безфоновым» экспериментом по поиску двойного безнейтринного бета распада. После анализа данных, накопленных за первые пять месяцев работы установки, сигналов от $0\nu\beta\beta$ распада обнаружено не было. Установлен предел на период полураспада $T_{1/2} > 8 \times 10^{25}$ лет. Этот результат опубликован в 2018 году в журнале Phys.Rev.Lett. Российские учёные являются соавторами этого результата. Достигнутый уровень фона должен обеспечить отсутствие фоновых событий в течение всего периода накопления данных вплоть до завершения набора статистики в 2019 году. К этому моменту чувствительность эксперимента превысит 10^{26} лет. «Безфоновый» режим работы делает проект GERDA наиболее чувствительным к регистрации двойного безнейтринного бета распада среди всех конкурирующих экспериментов.

2. Смонтирована в лаборатории Гран-Сассо установка по очистке отходов обогащённого германия, образовавшихся при изготовлении германиевых детекторов, продемонстрирована работоспособность установки. Технология очистки была разработана в России.

На Рис. 70 показан общий вид установки, расположенной в химической лаборатории Гран-Сассо (Италия).



Рис. 70. Общий вид установки, расположенной в химической лаборатории Гран-Сассо (Италия).

3. Начата разработка первой очереди эксперимента LEGEND-200, который является продолжением эксперимента GERDA.

10.2. Осцилляции реакторных нейтрино

В 2018 г. коллаборация Double Chooz приступила к демонтажу оборудования. В это же время продолжается анализ накопленных данных.

Сделан анализ проходящих сквозь детектор потоков мюонов. Получены годовые вариации этих потоков за время работы двух детекторов. Поток мюонов, проходящих через ближний детектор $(3.64 \pm 0.04) \times 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и через дальний $(7.00 \pm 0.05) \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Предложена система анализа, основанная на Фурье анализе совокупного амплитудного распределения импульсов от фзу. В 2017 году более 20 дней оба реактора АЭС не работали, что позволило тщательно измерить коррелированные фоны. На Рис. 71

показаны спектры ${}^9\text{Li}$ в обоих детекторах, измеренные в этот период. Получена зависимость выхода ${}^9\text{Li}$ от эффективной глубины расположения детектора, что позволяет предсказывать фон в детекторах других экспериментов, в частности Daya Bay и RENO.

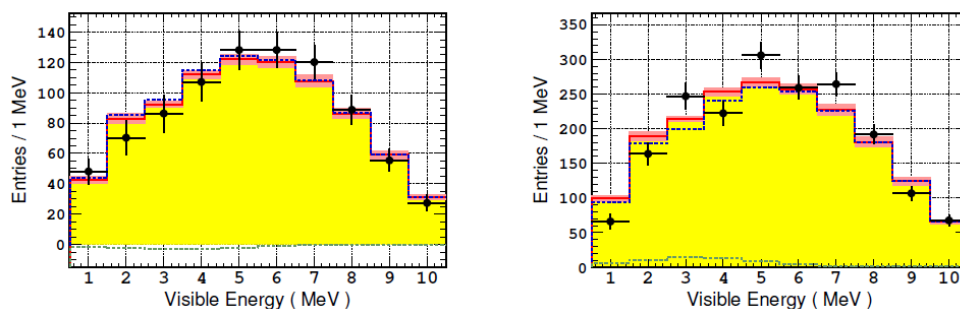


Рис. 71. Измеренный спектр ${}^9\text{Li}$ в ближнем (слева) и дальнем (справа) детекторах. Вклад от ${}^8\text{He}$ показан розовым цветом.

На базе лучшего анализа фонов уменьшена систематическая погрешность в измерениях $\sin^2 2\theta_{13}$. Получено новое значение $\sin^2 2\theta_{13} = 0.105 \pm 0.014$, которое на два стандартных отклонения отличается от значения Daya Bay в большую сторону.

Для объяснения увеличенного значения $\sin^2 2\theta_{13}$ предложено объяснение в наличии дополнительного источника антинейтрино от бассейнов-отстойников, которые расположены со стороны ближнего детектора.

10.3. Эксперимент JUNO

Выполнены работы по подготовке к массовому производству полусферических 20-дюймовых фотоумножителей (общая потребность эксперимента – 17500 штук) и полусферических 3-дюймовых фотоумножителей (общая потребность эксперимента – 25000 штук), а также по подготовке измерительных стендов для массового тестирования отбора этих фотоумножителей. Начато массовое производство фотоумножителей обоих типов. Произведено, протестировано и отобрано 8000 штук 20-дюймовых и 12000 штук 3-дюймовых фотоумножителей.

Выполнялись работы по разработке сцинтилляционных добавок нового типа для жидкого сцинтиллятора ближнего детектора эксперимента JUNO. Получены экспериментальные образцы этих сцинтилляционных добавок. Предварительные исследования параметров показывают, что жидкие сцинтилляторы с такими добавками имеют световой выход в 1,5-2 раза выше, чем сцинтилляторы со стандартной добавкой PPO. При этом кинетика свечения в 1,5-2 раза медленнее, чем в сцинтиляторе с PPO – постоянные высвечивания 9-10 нс и 5-6 нс соответственно.

11. Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ^{124}Xe . Продолжение измерений с образцом ^{124}Xe . Обработка данных измерений 2014-2018гг.

В 2018г. в эксперименте ^{124}Xe продолжались измерения с образцом ксенона объемом 50л, обогащенного по изотопу ^{124}Xe до 21% (58,6г). Полное время набора статистики в эксперименте на 31.10.2018 составило 28675 час. При этом экспозиция для изотопа ^{124}Xe достигла 68 кг·день, для изотопа ^{126}Xe , присутствующего в образце рабочего газа, - 83.6 кг·день. Данные по изотопу ^{126}Xe используются для определения возможного вклада событий от распада изотопа ^{125}Xe (и его дочернего ^{125}I), образовавшегося от взаимодействия фоновых нейтронов с ^{124}Xe , в параметрическую область событий искомого эффекта. Ведётся обработка данных. На основании полученных данных установлен предел на период полураспада Xe-124 относительно 2К-захвата, на уровне $7.7 \cdot 10^{21}$ лет (90% У.Д.).

Был проведен анализ измерений с природным криптоном, в котором присутствовал нестабильный изотоп ^{81}Kr . Получено значение вероятности образования двойной К-вакансии в ^{81}Br в результате К-захвата ^{81}Kr :

$$P_{\text{KK}} = [5.7 \pm 0.8(\text{stat.}) \pm 0.4(\text{syst.})] \cdot 10^{-5}.$$

С учетом этого результата был проведен углубленный анализ данных эксперимента по поиску 2К-захвата ^{78}Kr . Получено обновленное значение периода полураспада:

$$T_{1/2} = [1.9^{+1.3}_{-0.7}(\text{stat.}) \pm 0.3(\text{syst.})] \cdot 10^{22} \text{ лет (90\% У.Д.).}$$

12. Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии, астрофизика космических лучей. В том числе теоретическое исследование приливного разрушения аксионных сгустков темной материи в гало Галактики и поиск возможных наблюдательных эффектов от шлейфов разрушенных аксионных сгустков наземными и орбитальными детекторами.

Была рассмотрена задача о метрике черной дыры, находящейся в расширяющейся Вселенной на стадии радиационного доминирования. В частности, это может быть первичная черная дыра. В случае, когда радиус черной дыры намного меньше космологического горизонта, найдены самосогласованные выражения для метрических коэффициентов и для распределения и движения вещества на больших расстояниях от черной дыры. На расстояниях, гораздо меньших космологического горизонта, решение совпадает с полученным ранее решением для квазистационарной аккреции.

Результаты работы могут найти применение, в частности, для расчетов формирования пиков плотности темной материи вокруг первичных черных дыр и для эволюции сгустков темной материи на стадии радиационного доминирования.

13.Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо. Обработка новых экспериментальных данных с установок LVD.

Одной из экспериментальных задач, решаемых на установке LVD, является изучение мюонной компоненты космических лучей под землей. Изучение атмосферных мюонов на больших глубинах позволяет получить информацию о первичном спектре космических лучей и взаимодействиях мюонов при высоких энергиях. С другой стороны, мюоны космических лучей являются основным источником фона в экспериментах по поиску редких событий, проводимых глубоко под землей.

Сезонные вариации потока мюонов существуют, как на уровне моря, так и под землей. Эти вариации вызываются температурным и барометрическим эффектами, связанными с изменениями высоты и плотности атмосферы летом и зимой. Температурный эффект влияет на генерацию мюонов в верхних слоях атмосферы, барометрический – на выживание мюонов в атмосфере. Два этих эффекта находятся в противофазе. Для мюонов больших энергий (~ 280 ГэВ), которые регистрируются под землей, наблюдается положительный температурный эффект. Это связано с тем, что больших глубин достигают, главным образом, мюоны от распадов пионов первого поколения генерации, число которых увеличивается при расширении атмосферы и падении ее плотности в верхних слоях (на высоте ~ 20 км).

Измерения вариации интенсивности мюонов на больших глубинах были выполнены в экспериментах MACRO, MINOS, AMANDA, LVD (8 лет наблюдений), IceCube, Borexino.

Был проведен анализ данных LVD за 25 лет с 1992 по 2018. Отбирались мюоны, прошедшие через внутренние счетчики детектора с энергосодержанием более 50 МэВ и во временном окне 250 нс. На Рис. 72 показан измеренный темп счета мюонов (верхний график), экспозиция мюонов в день (средний график). Также на нижнем графике Рис. 72 приведена интенсивность мюонов – число мюонов на кв. метр в секунду. Для определения среднего значения интенсивности мюонов было построено распределение мюонов по интенсивности в сутки. Фитируя это распределение функцией Гаусса, был получен средний темп счета мюонов, он составил $I_0 = 3.3475 \pm 0.0005$ (стат) ± 0.03 (сис) $\pm 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Штриховая область представляет полосу 3σ .

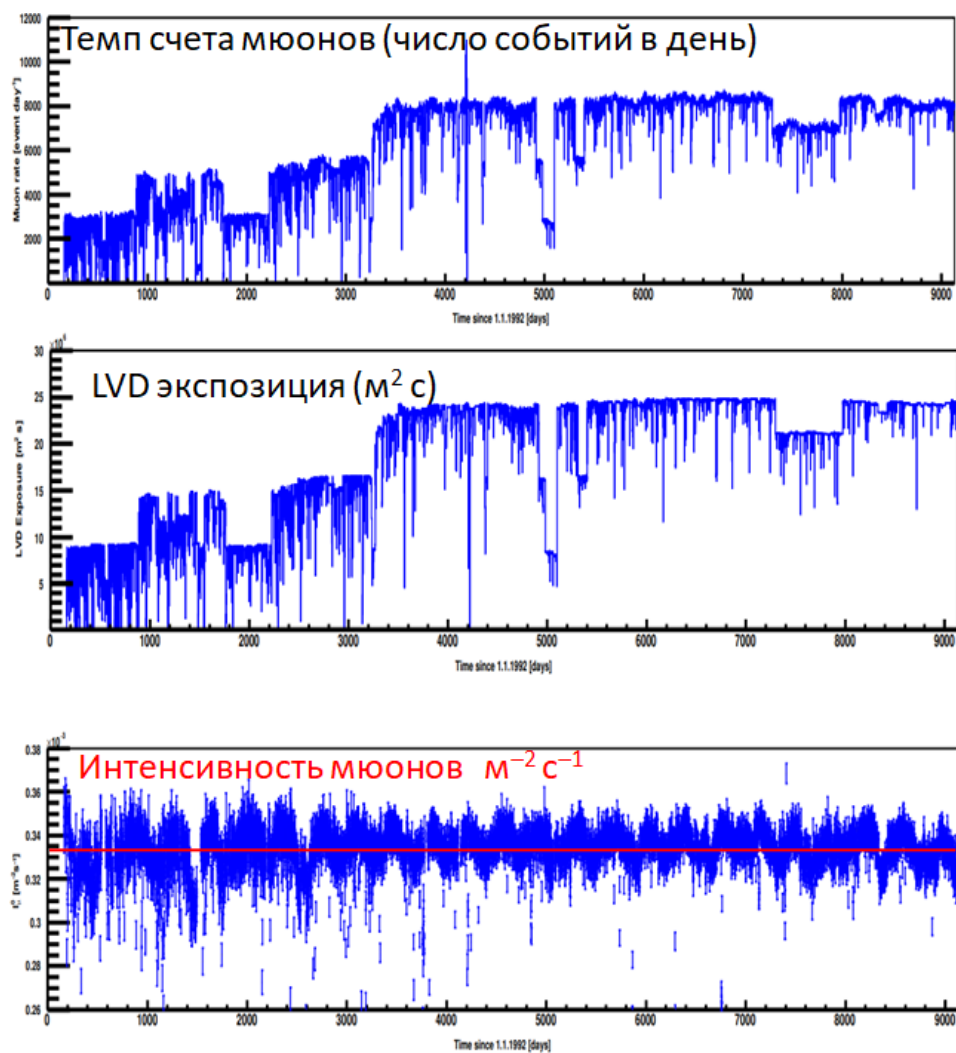


Рис. 72. Темп счета мюонов (верхний график), экспозиция мюонов в день (средний график), результат - интенсивность мюонов. Данные набора мюонов в LVD с 1992 года по 2018 год.

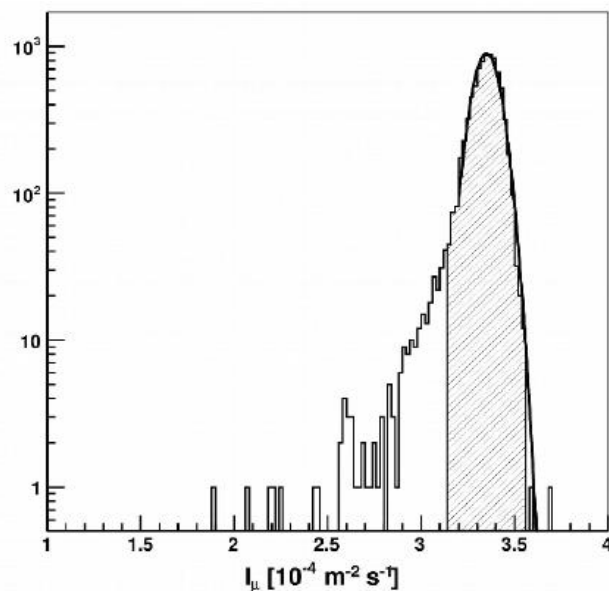


Рис. 73. Экспериментальное распределение суточного потока мюонов и фитирование его функцией Гаусса.

В Табл. 5 и на Рис. 74 представлены данные измеренных температурных коэффициентов в различных экспериментах.

Табл. 5 Измеренные температурные коэффициенты.

Эксперимент		$E_{thr} \cos\theta$, GeV	Температурный коэффициент, α_T
DoubleCHOOZ	CF	22.3	0.212 ± 0.021
Daya Bay	D1	37	0.362 ± 0.031
Daya Bay	D2	41	0.433 ± 0.038
DoubleCHOOZ	CN	46	0.355 ± 0.019
MINOS	MN	54	0.428 ± 0.059
UTAH	UT	128	0.26 ± 0.01
Daya Bay	D3	143	0.641 ± 0.057
SHERMAN	SH	200	0.48 ± 0.13
BAKSAN	BK	220	0.8 ± 0.09
BARRETT	BR	300	1.01 ± 0.24
Ice Cube	IC	400	0.86 ± 0.01
AMANDA	AM	500	0.86 ± 0.05
MINOS	MF	785	0.873 ± 0.013
MACRO	MC	1600-150	0.91 ± 0.07
BOREXINO	BX	1600-75	0.93 ± 0.04
GERDA	G1	1600	0.96 ± 0.05
GERDA	G2	1600+75	0.91 ± 0.05
OPERA	OP	1600+150	0.94 ± 0.05
LVD	LVD	1600+225	0.94 ± 0.02

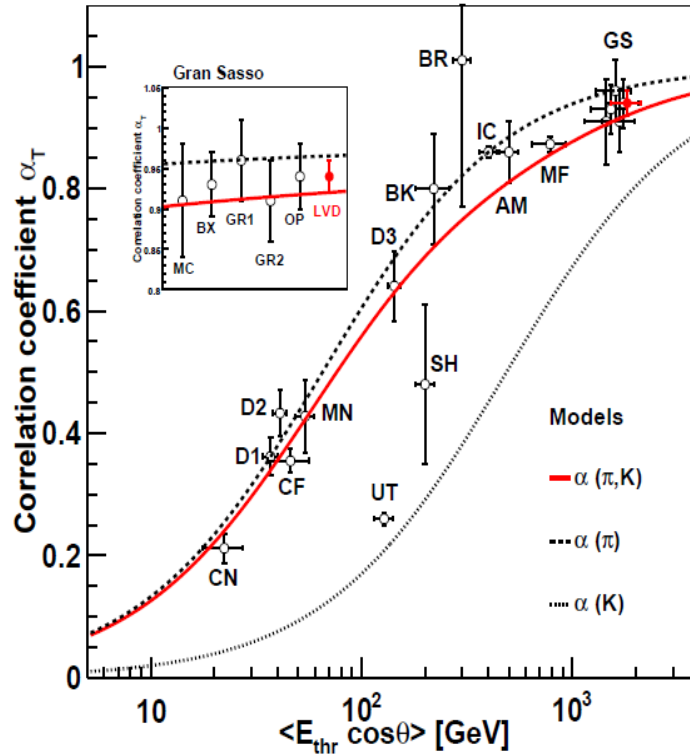


Рис. 74. Измеренные температурные коэффициенты в различных экспериментах

Для определения фазы – значения максимальной интенсивности вариаций мюонов, обычно используют «косинусоидальный» метод приближения $N(t) = N_0 + \delta N \cos(2\pi(t - \phi)/T)$. Вариации температуры, а следовательно и интенсивности мюонов, имеют гармонический вид: летом значения больше, а зимой меньше. Но статистически известно, что бывают годы, когда, например, бывает ранняя теплая весна, или холодное лето, поэтому максимумы и минимумы год от года могут смещаться и быть в разные месяцы, то в июне, то в августе. На Рис. 75 приведен кусок данных за два года наблюдений изменения интенсивности и изменения температуры. Голубыми линиями отмечен период 1 год, 365 дней между максимумами. Видно, что значение минимума приходится не на середину периода. Распределение имеет пилообразную форму, температура и интенсивность уменьшается зимой быстрее, чем увеличивается летом.

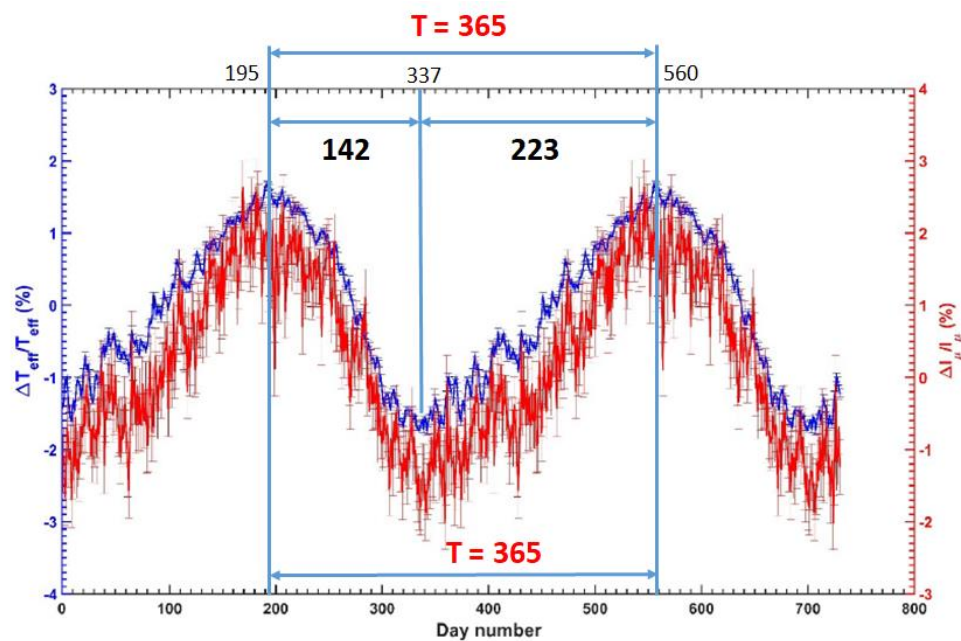


Рис. 75. Изменения интенсивности мюонов (красная кривая) и изменения температуры (синяя кривая) за 2 года.

Табл. 6 Значения максимума и минимума интенсивности мюонов и температуры.

MUON FLUX						T _{eff}					
Day number	Date	A _{max}	Day number	Date	A _{min}	Day number	Date	A _{max}	Day number	Date	A _{min}
193	12.07.1994	1.212	358	24.12.1994	-3.160	203	22.07.1994	1.557	348	14.12.1994	-1.603
563	17.07.1995	0.791	723	24.12.1995	-3.022	568	22.07.1995	1.538	713	14.12.1995	-1.608
933	21.07.1996	1.572	1088	23.12.1996	-1.618	933	21.07.1996	1.536	1078	13.12.1996	-1.602
1288	11.07.1997	1.396	1448	18.12.1997	-1.542	1298	21.07.1997	1.540	1443	13.12.1997	-1.607
1648	06.07.1998	1.777	1828	02.01.1999	-1.971	1663	21.07.1998	1.553	1813	18.12.1998	-1.626
2028	21.07.1999	1.728	2198	07.01.2000	-1.106	2028	21.07.1999	1.575	2178	18.12.1999	-1.619
2383	10.07.2000	1.375	2538	12.12.2000	-1.185	2393	20.07.2000	1.583	2543	17.12.2000	-1.642
2743	05.07.2001	2.004	2923	01.01.2002	-1.880	2758	20.07.2001	1.578	2908	17.12.2001	-1.644
3133	30.07.2002	1.646	3283	27.12.2002	-0.990	3123	20.07.2002	1.554	3273	17.12.2002	-1.611
3493	25.07.2003	1.560	3638	17.12.2003	-1.187	3488	20.07.2003	1.545	3638	17.12.2003	-1.641
3853	19.07.2004	1.911	3998	11.12.2004	-1.047	3853	19.07.2004	1.548	4003	16.12.2004	-1.632
4213	14.07.2005	1.247	4358	06.12.2005	-1.815	4218	19.07.2005	1.561	4363	11.12.2005	-1.611
4588	24.07.2006	1.511	4723	06.12.2006	-0.972	4583	19.07.2006	1.576	4728	11.12.2006	-1.602
4948	19.07.2007	1.913	5103	21.12.2007	-1.135	4948	19.07.2007	1.558	5093	11.12.2007	-1.493
5313	18.07.2008	1.443	5443	25.11.2008	-0.827	5313	18.07.2008	1.548	5458	10.12.2008	-1.415
5668	08.07.2009	1.928	5818	05.12.2009	-0.816	5678	18.07.2009	1.532	5823	10.12.2009	-1.376
6043	18.07.2010	2.087	6188	10.12.2010	0.234	6043	18.07.2010	1.533	6183	05.12.2010	-1.346
6398	08.07.2011	1.938	6573	30.12.2011	-1.179	6403	13.07.2011	1.552	6548	05.12.2011	-1.412
6763	07.07.2012	1.288	6913	04.12.2012	-1.692	6768	12.07.2012	1.577	6908	29.11.2012	-1.455
7133	12.07.2013	1.602	7263	19.11.2013	-0.730	7133	12.07.2013	1.619	7273	29.11.2013	-1.475
7488	02.07.2014	2.077	7638	29.11.2014	-1.335	7503	17.07.2014	1.635	7638	29.11.2014	-1.505
7858	07.07.2015	1.710	8013	09.12.2015	-2.234	7868	17.07.2015	1.655	8003	29.11.2015	-1.500
8233	16.07.2016	0.932	8378	08.12.2016	-2.520	8233	16.07.2016	1.676	8368	28.11.2016	-1.479
8608	26.07.2017	0.993	8738	03.12.2017	-2.054	8603	21.07.2017	1.663	8733	28.11.2017	-1.457

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Задача «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов пертурбативной КХД. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

1. Проведена обработка экспериментальных данных 2017 года эксперимента NA64 с полной статистикой в $4.3 \cdot 10^{10}$ падающих электронов на мишень. Получены рекордные ограничения на модель темного фотона с легкой темной материей.

2. Проанализированы данные в сигнатуре с распадом темного фотона на электрон позитронную пару и получены новые ограничения на константу связи темного фотона с электроном.

3. Показано, что в $L_{\mu} - L_{\tau}$ модели, объясняющей мюонную g-2 аномалию, на однопетлевом уровне возникает ненулевая константа связи электрона с легким Z' бозоном, что позволяет проверить эту модель в эксперименте NA64 в ЦЕРНе.

4. Оценен потенциал открытия мили-заряженных частиц в NA64 эксперименте. Показано, что NA64 эксперимент с мюонным пучком способен получить рекордные ограничения на мили заряженные частицы.

5. Подготовлено предложение для дирекции ЦЕРНа об использовании мюонного пучка в сеансе 2021-2023 годов и оценен потенциал открытия новой физики в этом эксперименте.

6. Показано, что теория гравитации с квадратичным по кривизне слагаемым является одновременно и перенормируемой и унитарной. Таким образом, данная модель является подходящим кандидатом на роль фундаментальной квантовой теории гравитации.

7. Выполнен обзор космологических решений в виде отскока в теории Хорндески и ее расширении.

8. Построено линеаризованное действие в расширенной теории Хорндески.

9. В рамках расширенной теории Хорндески построено устойчивое решение в виде кротовой норы

10. Из исследования динамики нуклеосинтеза в ранней Вселенной получены ограничения на модель легкой темной материи, взаимодействующей с веществом.

11. Предложена модель, в которой удастся решить проблему относительно низкого масштаба сильной связи в инфляции на поле Хиггса за счет добавления дополнительной степени свободы в гравитационном секторе.

12. Исследована зависимость оценочных пяти- и шести-петелевых КХД поправок к полюсной и бегущей массам тяжелых кварков от количества легких флэйворов.

13. Исследованы свойства нетопологические солитоны, которые появляются в теориях калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, а также спектр их возмущений.

14. Проведен анализ влияния нестандартных нейтринных взаимодействий с фермионами Стандартной модели на распространение нейтрино с энергией 1-1000 ГэВ, возникающих от аннигиляции частиц темной материи в Солнце. Показано, что эти потоки могут значительно отличаться в моделях с нестандартными взаимодействиями.

15. Вычислен спектр гравитационных волн от фазового перехода первого рода в ранней Вселенной для феноменологически интересных точек в пространстве параметров суперсимметричной модели.

16. Исследованы процессы рассеяния классических сферически-симметричных волновых пакетов в теории ϕ^4 — аналогов процессов многочастичного рассеяния. Показано, что в результате рассеяния частиц изменяется не более чем на 22% от начального.

17. Показано, что существует целый класс схем перенормировок, в которых выполняется точное соотношение между ренорм-групповой бета-функцией $N=1$ суперсимметричной КЭД и аномальной размерностью материи этой теории.

18. Изучен процесс квантово-механического испарения черных дыр в простых моделях гравитации с позиции многочастичного рассеяния в квантовой теории поля.

2. Задача «Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРН, в том числе CMS, NA61, NA62, NA64 и др. Подготовка эксперимента SHiP: уточнение чувствительности эксперимента SHiP к тяжёлым нейтральным лептонам (стерильные нейтрино)».

План работ на 2018 год выполнен полностью. Очередной этап работ по теме проекта в основном был связан с проведением анализа набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий, а также с работами по модернизации адронного калориметров установки CMS, в частности, с деятельностью по модернизации фотоприемников.

В 2018 г. продолжался анализ данных, основанный на статистике протон-протонных столкновений, полученной на детекторе CMS на Большом адронном коллайдере при полной светимости в 2018 г. Пока не получено доказательств того, что наблюдается избыток событий, превышающий их число, ожидаемое в Стандартной

модели. В результате предварительного анализа данных были получены предварительные ограничения на массу правого бозона около 3500 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино более 1000 ГэВ.

Сотрудниками ИЯИ РАН – членами коллаборации NA64 - разработана и предложена концепция эксперимента по поиску легкой темной материи на новой установке на ускорителе SPS с уровнем планируемой чувствительности, который превосходит уровень, достигнутый на сегодняшний день в экспериментах, проводимых и планируемых в США, Японии и Италии. Результаты эксперимента, представленные в данном отчете, опубликованы в виде статей в журналах Phys. Rev. Lett., Nucl. Instr. Meth., Phys. Res. A, Phys. Rev. D.

В 2018 году сотрудниками Лаборатории были получены следующие результаты:

- на основе экспериментальных данных 2016-17 гг. эксперимента CMS получены новые ограничения на массы тяжелого нейтрино и правого W_R -бозона в лево-правосимметричной модели;

- в эксперименте NA64 по поиску легкой темной материи получены новые рекордные ограничения на связь темного фотона с частицами легкой темной материи как для видимой, так и для невидимой мод распада.

Основной задачей на 2019 год является обработка накопленных экспериментальных данных и подготовка к третьему сеансу работы Большого адронного коллайдера в 2021-2023 гг.

В 2018г. на установке NA61/SHINE в ЦЕРНе завершена программа экспериментов по поиску и исследованию начала деконфайнмента и поиску критической точки фазового перехода в сильно взаимодействующей ядерной материи. Предварительный анализ полученных данных показывает, что наблюдается эффект перемежаемости для центральных событий в столкновениях ядер аргона и скандия при энергии 150 ГэВ. Такой эффект не наблюдается при столкновениях ядер свинца и бериллия при тех же энергиях. Возможно, что наблюдаемый эффект является первым указанием на обнаружение критической точки фазового перехода.

В начале 2018г. силами группы ИЯИ проведена калибровка переднего адронного калориметра на пучке мюонов и адронов и калориметр был полностью подготовлен к физическим сеансам 2018г на пучках протонов и ионов свинца. Во время свинцового сеанса с участием ИЯИ РАН получены новые данные по рождению частиц с открытым чармом (D-мезонов) в столкновениях Pb + Pb при энергии ионов свинца 150 ГэВ. В сеансе на пучке протонов p+C с энергией 120 ГэВ и протяженной углеродной мишенью были

измерены выходы вторичных заряженных частиц, необходимые для последующего использования в нейтринных экспериментах.

Группа ИЯИ осуществляла экспертную поддержку функционирования калориметра во время физических сеансов на пучках протонов и ионов свинца в 2018г, вела постоянный мониторинг процесса набора и качества получаемых данных с калориметра, дежурила в регулярных сменах во время экспериментов, проводила калибровку в специально выделенных для этой цели тестовых сеансах.

В 2018г., в рамках программы работ по модернизации переднего адронного калориметра установки NA61/SHINE, был собран новый дополнительный передний адронный калориметр из 9 модулей калориметра CBM, которые были изготовлены в ИЯИ РАН. Проведена калибровка этого калориметра на пучке мюонов и исследован отклик калориметра на пучках протонов в диапазоне энергий 10 – 150 ГэВ.

В 2018г. по данной теме опубликовано 4 статьи в реферируемых журналах, представлены 2 доклада на международных конференциях и представлены 10 докладов на различных совещаниях коллаборации NA61/SHINE.

В рамках подготовки к эксперименту SHIP проделано теоретическое исследование по уточнению чувствительности этого эксперимента к стерильным нейтрино, результаты опубликованы в отдельной теоретической публикации и отдельной статье коллаборации SHIP.

В рамках проекта эксперимента MATHUSLA исследована возможность наблюдения с помощью этого планируемого в ЦЕРН эксперимента стерильных нейтрино и легких сголдстино, результаты включены в whitepaper проекта MATHUSLA.

3. Задача «Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb. Набор статистики и обработка физических данных».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В 2018 г. группой ИЯИ РАН были полностью выполнены все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы LHCb. Эксперимент LHCb в 2018 г. продолжил работу по набору статистики. Также продолжена обработка набранных ранее данных, получен ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе первое наблюдение двух новых массовых структур, согласующихся с резонансами с конечными состояниями $\Lambda_0 b \pi^-$ и $\Lambda_0 b \pi^+$, поиски дву-мюонных резонансов в области масс Υ -резонанса, первое наблюдение распада $B_s^0 \rightarrow K^*0 \mu^+ \mu^-$ и ряд других.

На этапе создания установки LHCb группа ИЯИ РАН разработала и изготовила предливневый детектор, являющийся частью калориметрической системы. За время

эксплуатации было показано, что конструкция предливневого детектора является надежной и удовлетворяет поставленным требованиям эксперимента. С точки зрения операционной эксплуатации общая эффективность детектора близка к 100%. В 2017 г. сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по поддержанию работоспособности калориметрической системы.

В рамках модернизации калориметрической системы LHCb в результате проведения научно-исследовательской работы изготовлены платы управления высоким напряжением, мониторинг системы и калибровка калориметров. Разработанные компоненты и технологии изготовления соответствуют техническим требованиям на модернизацию элементов супердетектора БАК-би.

4. Задача «Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов продолжился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редких распадов, положительно заряженных каонов, запрещенных в первом порядке в Стандартной Модели и возможных только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949. Эта методика выделения редких каонных распадов использовались при анализе данных эксперимента NA62 (ЦЕРН).

5. Задача «Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонном ускорительном комплексе J-PARC».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы в нейтринной и антинейтринной модах (февраль – май 2018 года), в которых сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие. Проводится дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2018 гг., по измерению как осцилляционных параметров нейтрино и антинейтрино, так и сечений взаимодействий нейтрино с веществом. Эксперимент T2K вышел на изучение нарушения CP симметрии в нейтринных взаимодействиях (в лептонном секторе), которое до сих пор было обнаружено только в кварковом секторе, и получил результат, исключаящий сохранение CP симметрии в нейтринных осцилляциях с уровнем достоверности 95%.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой завершено создание магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, состоящего из

33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами (сцинтилляционные детекторы разработаны и собраны в ИЯИ РАН). В феврале 2018 г. детектор Baby-MIND был полностью смонтирован на нейтринном канале J-PARC, где он является одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K(J-PARC). Была проведена настройка и запуск всего детектора Baby-MIND как от космических лучей, так и в ходе набора нейтринных данных эксперимента T2K.

В рамках Нейтринной платформы ЦЕРН проводятся НИОКР работы по созданию вето- и триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, кроме того, группа ИЯИ разработала и создала прототип 3D сегментированного сцинтилляционного детектора (SuperFGD), который будет установлен в качестве нейтринной мишени в обновленном ближнем детекторе ND280. Прототип детектора, состоящий из 10 тысяч сцинтилляционных кубиков объемом 1 см^3 каждый, дважды был протестирован на канале T9 в ЦЕРНе: в июне-июле и августе-сентябре 2018 г., проводится анализ данных для получения основных параметров детектора. В ходе НИОКР был разработан метод изготовления сцинтилляционных кубиков методом литья под давлением с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон.

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

План работ на 2018 год выполнен полностью. Опубликованы результаты анализа спектра событий, обусловленных взаимодействием мюонных нейтрино. Для проверки модели проведены расчеты инклюзивных спектров электронов в рамках модели, которая учитывает вклад двух-частичных токов обменных мезонов и изобарных токов. Результаты расчета хорошо согласуются с данными.

7. Задача «Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс в бета-распаде газообразного трития в области масс 0,1–8 кэВ, как кандидатов на роль частиц тёплой тёмной материи».

План работ на 2018 год выполнен полностью. Наиболее важные достижения в 2018 году:

- Проведено два сеанса набора статистики по прецизионному измерению бета спектра трития. Результаты обрабатываются.

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

- Выполнены полноценные измерения тритиевого спектра с использованием 7-ми пиксельного детектора нового типа на основе кремниевого дрейфового детектора (SDD). Результаты обрабатываются.

- Проведены работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования. Запущены дополнительные новые системы хранения и транспортировки гелия.

8. Задача «Участие в проведении измерений массы нейтрино на установке КАТРИН в диапазоне 1 эВ».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

Разработан модуль программного обеспечения, позволяющий учитывать вклад внутреннего движения на упругое рассеяние электронов. Модуль встроен в общий пакет программ KASSIOPEIA предназначенный для расчётов и моделирования спектра электронов в эксперименте КАТРИН.

Проводилось Монте-Карло моделирование данных эксперимента КАТРИН; тестирование, сравнение и проверка программного обеспечения и методов обработки данных в эксперименте КАТРИН.

Для моделирования поиска стерильных нейтрино разрабатывалась модель спектра электронов бета-распада трития в широком диапазоне энергий с учетом эффектов источника, спектрометра и детектора.

В рамках подготовки эксперимента по измерению спектра неупругих потерь энергии электронами в рассеянии на молекулярном тритии рассматривались систематические поправки. Проведение эксперимента перенесено на вторую половину 2018 года.

Оформлено предложение эксперимента по исследованию зависимости от энергии налетающих электронов сечения возбуждения электронных состояний молекул трития.

Проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления, подбор оптимального предусилителя. Совместные измерения на стенде в КИТ, Карлсруэ перенесены на январь 2018 года.

9. Задача «Исследование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Разработка методики регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с помощью низкофонового газового детектора. Поиск массивных «скрытых» фотонов с помощью мультисканодного счётчика».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

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. В измерениях Al-1 получена рекордно низкая скорость счета одиночных электронов $(0.81 \pm 0.08) \times 10^{-4} \text{ Hz/cm}^2$. Получены новые, более сильные ограничения на константу смешивания скрытого фотона. Чувствительность метода критически зависит от темнового тока детектора. Для дальнейшего продвижения нами планируется дальнейшее снижение темнового тока. Одним из методов является специальная обработка поверхности металлического катода и поверхности нитей, используемых в качестве катодов. Планируется также изготовить счетчик с катодом из металла с большой работой выхода, например, никель или платина. Нами планируются также измерения при низких температурах для снижения влияния эффекта термоэмиссии. Самым важным в этой работе является то, что представленные здесь результаты получены в прямом, а не в косвенном измерении.

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

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В течение 2018 года российские учёные из ИЯИ РАН продолжали участвовать в поведении эксперимента GERDA-II, расположенного в подземной Национальной лаборатории Италии Гран-Сассо (LNGS INFN). Они участвовали в эксплуатации действующей установки GERDA-II. Смонтирована в лаборатории Гран-Сассо установка по очистке отходов обогащённого германия, образовавшихся при изготовлении германиевых детекторов, продемонстрирована работоспособность установки. Технология очистки была разработана в России. Начата разработка первой очереди эксперимента LEGEND-200. Российские учёные стали соавторами публикаций в составе коллаборации GERDA. Подготовлены и согласованы планы совместных работ в составе коллабораций GERDA и LEGEND.

В эксперименте Double Chooz сделан анализ проходящих сквозь детектор потоков мюонов и определены профили толщин пород над детекторами.

Улучшен анализ сигналов ФЭУ и получены дополнительные каналы уменьшения фона детекторов.

Во время остановки двух реакторов измерен выход ^9Li от проходящих мюонов. Фон от ^8He оказался пренебрежимо мал. Можно предсказывать фон от космогенных изотопов в других подземных установках.

Уменьшена систематическая ошибка в определении $\sin^2 2\theta_{13}$.

Ведется расчет спектра от дополнительного источника антинейтрино – бассейна-отстойника передержки топлива.

Сотрудники ИЯИ РАН участвовали в создании фотоэлектронных умножителей и сцинтиллятора для детектора JUNO (Китай).

11. Задача «Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ^{124}Xe . Продолжение измерений с образцом ^{124}Xe . Обработка данных измерений 2014-2018гг».

Основными результатами эксперимента ^{124}Xe в 2018 году являются:

- Установление предела на период полураспада изотопа ксенона ^{124}Xe относительно 2К-захвата,

- Измерение вероятности образования двойной К-вакансии в ^{81}Br в результате К-захвата ^{81}Kr

- Измерение периода полураспада изотопа криптона ^{78}Kr .

12. Задача «Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии, астрофизика космических лучей. В том числе теоретическое исследование приливного разрушения аксионных сгустков темной материи в гало Галактики и поиск возможных наблюдательных эффектов от шлейфов разрушенных аксионных сгустков наземными и орбитальными детекторами».

План работ на 2018 год выполнен полностью. Основным результатом является приближенное аналитическое решение для метрики черной дыры, а также соответствующего распределения плотности и скоростей материи в расширяющейся радиационно-доминированной Вселенной.

13. Задача «Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо. Обработка новых экспериментальных данных с установок LVD».

План работ на 2018 год выполнен полностью.

Основным результатом по данной задаче стало измерение сезонной вариации интенсивности потока атмосферных мюонов основанное на обработке данных эксперимента LVD за 25 лет (с 1992 по 2018 годы).

ПУБЛИКАЦИИ

1. Публикации по задаче «Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Развитие аналитических методов пертурбативной КХД. Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели».

1. S.N. Gninenko and N.V.Krasnikov / Probing the muon $g_{\mu}-2$ anomaly, $L_{\mu}-L_{\tau}$ gauge boson and Dark Matter in dark photon experiments // Phys.Lett. B 783, (2018), 24.
2. S.N. Gninenko, N. V. Krasnikov, M. M. Kirsanov and D. V. Kirpichnikov / The exact tree-level calculation of the dark photon production in high-energy electron scattering at the CERN SPS // Phys. Lett. B 782 (2018) 406.
3. S. A. Larin / Higher derivative relativistic quantum gravity // Mod.Phys.Lett. A3 (2018) no.05, 1850028.
4. S.A. Larin / Fourth-derivative relativistic quantum gravity // EPJ Web Conf. 191 (2018) 07002.
5. S. Mironov, V. Volkova / Properties of perturbations in beyond Horndeski theories // Int.J.Mod.Phys. A33 (2018) no.27, 1850155
6. V. Volkova / On perturbations in Horndeski theories // EPJ Web Conf. 182 (2018) 02127
7. R. Kolevatos, S. Mironov, V. Rubakov, N. Sukhov, V. Volkova / Cosmological bounce in Horndeski theory and beyond // EPJ Web Conf. 191 (2018) 07013
8. D. Gorbunov, A.Tokareva / Sclaron the healer: removing the strong-coupling in the Higgs- and Higgs-dilaton inflations // Phys. Lett. B 788, 37 (2019)
9. A. Kovtun, E. Nugaev, A. Shkerin / Vibrational modes of Q-balls // Phys.Rev. D98 (2018) no.9, 096016
10. A. Kovtun, E. Nugaev, A. Shkerin / Characteristic modes of vibration of Q-balls // EPJ Web Conf. 191 (2018) 06018
11. E. Nugaev / Metastable Q-balls // EPJ Web Conf. 191 (2018) 06017
12. S.V. Demidov / Non-standard interactions and neutrinos from dark matter annihilation in the Sun // JCAP 1802 (2018) no.02, 001
13. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov / Gravitational waves from phase transition in split NMSSM // Phys.Lett. B779 (2018) 191-194
14. S.V. Demidov, B.R. Farkhtdinov / Numerical study of multiparticle scattering in $\lambda\phi^4$ theory // JHEP 11 (2018) 068
15. I.O. Goriachuk, A.L. Kataev, K.V. Stepanyantz / A class of the NSVZ renormalization schemes for $N=1$ SQED $N=1$ SQED // Phys.Lett. B785 (2018) 561-566
16. Maxim Fitkevich / Failure of mean-field approximation in weakly coupled dilaton gravity //

17. A. L. Kataev, V. S. Molokoedov / On the relation between pole and running heavy quark masses beyond the four-loop approximation // EPJ Web Conf. 191 (2018) 04005

18. A.L. Kataev, V.S. Molokoedov / Dependence of Five and Six-loop Estimated QCD Corrections to the Relation between Pole and Running Masses of Heavy Quarks on the Number of Light Flavours // JETP Lett. (2018); <https://doi.org/10.1134/S0021364018240050>

2. Публикации по задаче «Участие в экспериментах, проводимых в ЦЕРН, в том числе CMS, NA61, NA62, NA64 и др. Подготовка эксперимента SHiP: уточнение чувствительности эксперимента SHiP к тяжёлым нейтральным лептонам (стерильные нейтрино)».

19. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration) / Search for a heavy right-handed W boson and a heavy neutrino in events with two same-flavor leptons and two jets at $\sqrt{s}=13$ TeV // JHEP 1805: no.05, 148, 2018.

20. Banerjee D. et al. (NA64 Collaboration) / Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode // Phys.Rev.D97: no.7, 072002, 2018.

21. Banerjee D. et al. (NA64 Collaboration) / Search for a Hypothetical 16.7 MeV Gauge Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN // Phys.Rev.Lett. 120: no.23, 231802, 2018.

22. Banerjee D. et al. (NA64 Collaboration) / Performance of Multiplexed XY Resistive Micromegas detectors in a high intensity beam // Nucl. Inst. Meth. A881, 72–81, 2018.

23. Heering A., Musienko Yu. et al. / Low temperature characteristics of SiPMs after very high neutron irradiation // Nucl.Instrum.Meth., 2018. DOI: 10.1016/j.nima.2018.09.111

24. A. Aduszkiewicz et al. / Measurements of total production cross sections for π^+C , π^+Al , K^+C , and K^+Al at 60 GeV/c and π^+C and π^+Al at 31 GeV/c // Phys.Rev. D98 (2018) no.5, 052001

25. V. Mikhaylov et al. / Radiation hardness of Silicon Photomultipliers for CBM@FAIR, NA61@CERN and BM@N experiments // Nucl.Instrum.Meth. A912 (2018) 241-244

26. M. Golubeva et al. / Hadron calorimeter (Projectile Spectator Detector - PSD) of NA61/SHINE experiment at CERN // KnE Energ.Phys. 3 (2018) 379-384

27. V. Mikhaylov et al. / Tests of the NA61 and the CBM PSD module response with irradiated SiPMs at CERN beams. // CBM Progress Report 2017, GSI-2018-00485, p.116

28. Kyrlyo Bondarenko et al. / Phenomenology of GeV-scale Heavy Neutral Leptons // JHEP 1811 (2018) 032

29. David Curtin et al. / Long-Lived Particles at the Energy Frontier: The MATHUSLA Physics Case // arXiv:1806.07396

3. Публикации по задаче «Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb. Набор статистики и обработка физических данных».

30. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Study of Υ production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV // JHEP 1811 (2018) 194; DOI:10.1007/JHEP11(2018)194.
31. Roel Aaij et al. / Measurement of the charm-mixing parameter y_{CP} . Phys.Rev.Lett. 122 (2019) no.1, 011802; DOI:10.1103/PhysRevLett.122.011802.
32. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of two resonances in the $\Lambda_b^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ systems and precise measurement of $\Sigma_b^+ \rightarrow \pi^+ \pi^-$ and $\Sigma_b^{*+} \rightarrow \pi^+ \pi^-$ properties // Phys.Rev.Lett. 122 (2019) 012001; DOI:10.1103/PhysRevLett.122.012001.
33. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Evidence for an $\eta_c(1S) \rightarrow \pi^+ \pi^-$ resonance in $B^0 \rightarrow \eta_c(1S) K^+ \pi^-$ decays // Eur.Phys.J. C78 (2018) no.12, 1019; DOI:10.1140/epjc/s10052-018-6447-z.
34. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for lepton-flavour-violating decays of Higgs-like bosons // Eur.Phys.J. C78 (2018) no.12, 1008; DOI:10.1140/epjc/s10052-018-6386-8.
35. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of Antiproton Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=110$ GeV // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.22, 222001; DOI:10.1103/PhysRevLett.121.222001.
36. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Angular moments of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$ at low hadronic recoil // JHEP 1809 (2018) 146; DOI:10.1007/JHEP09(2018)146.
37. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for $C\!/\!P$ violation in $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^-$ and $\Lambda_b^0 \rightarrow p \pi^-$ decays // Phys.Lett. B787 (2018) 124-133; DOI:10.1016/j.physletb.2018.10.039.
38. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of $B_s^0 \rightarrow \overline{D}^{*0} \phi$ and search for $B^0 \rightarrow \overline{D}^0 \phi$ decays // Phys.Rev. D98 (2018) no.7, 071103; DOI:10.1103/PhysRevD.98.071103.
39. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of the decay $B_s^0 \rightarrow \overline{D}^{*0} K^+ K^-$ // Phys.Rev. D98 (2018) no.7, 072006; DOI:10.1103/PhysRevD.98.072006.
40. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the Ω_c^0 baryon lifetime // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.9, 092003; DOI:10.1103/PhysRevLett.121.092003.

41. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / First Observation of the Doubly Charmed Baryon Decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.16, 162002; DOI:10.1103/PhysRevLett.121.162002.
42. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of Angular and CP Asymmetries in $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ and $D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$ decays // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.9, 091801; DOI:10.1103/PhysRevLett.121.091801.
43. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of the decay $\overline{B}_s^0 \rightarrow \chi_{c2} K^+ K^-$ in the ϕ mass region // JHEP 1808 (2018) 191; DOI:10.1007/JHEP08(2018)191.
44. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for beautiful tetraquarks in the $\Upsilon(1S) \mu^+ \mu^-$ invariant-mass spectrum // JHEP 1810 (2018) 086; DOI:10.1007/JHEP10(2018)086.
45. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-$ // JHEP 1808 (2018) 131; DOI:10.1007/JHEP08(2018)131.
46. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1809 (2018) 159; DOI:10.1007/JHEP09(2018)159.
47. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Central exclusive production of J/ψ and $\psi(2S)$ mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{--}14$ TeV // JHEP 1810 (2018) 167; DOI:10.1007/JHEP10(2018)167.
48. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the Lifetime of the Doubly Charmed Baryon Ξ_{cc}^{++} // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.5, 052002; DOI:10.1103/PhysRevLett.121.052002.
49. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the time-integrated CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ decays // JHEP 1811 (2018) 048; DOI:10.1007/JHEP11(2018)048.
50. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the CKM angle γ using $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$ with $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, $K_S^0 K^+ K^-$ decays // JHEP 1808 (2018) 176, Erratum: JHEP 1810 (2018) 107; DOI:10.1007/JHEP10(2018)107, DOI:10.1007/JHEP08(2018)176.
51. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of $D_{s1}^{\pm}$ production asymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // JHEP 1808 (2018) 008; DOI:10.1007/JHEP08(2018)008.

52. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for a dimuon resonance in the Υ mass region // JHEP 1809 (2018) 147; DOI:10.1007/JHEP09(2018)147.
53. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of a new Ξ_b^- resonance // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.7, 072002; DOI:10.1103/PhysRevLett.121.072002.
54. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of CP asymmetries in two-body $B_{(s)}^0$ -meson decays to charged pions and kaons // Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 032004; DOI:10.1103/PhysRevD.98.032004.
55. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for CP violation using triple product asymmetries in $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$, $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- K^+ K^-$ and $\Xi_b^0 \rightarrow p K^- K^- \pi^+$ decays // JHEP 1808 (2018) 039; DOI:10.1007/JHEP08(2018)039.
56. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of CP violation in $B^0 \rightarrow D^{\mp} \pi^{\pm}$ decays // JHEP 1806 (2018) 084; DOI:10.1007/JHEP06(2018)084.
57. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Observation of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ p \overline{p} \pi^-$ // Phys.Lett. B784 (2018) 101-111; DOI:10.1016/j.physletb.2018.07.033.
58. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of Υ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP 1807 (2018) 134; DOI:10.1007/JHEP07(2018)134.
59. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Evidence for the decay $B_S^0 \rightarrow \overline{K}^0 \mu^+ \mu^-$ // JHEP 1807 (2018) 020; DOI:10.1007/JHEP07(2018)020.
60. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the CP asymmetry in $B^0 \rightarrow D_s^- D^0$ and $B^0 \rightarrow D^+ D^-$ decays // JHEP 1805 (2018) 160; DOI:10.1007/JHEP05(2018)160.
61. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the inelastic pp cross-section at a centre-of-mass energy of 13 TeV // JHEP 1806 (2018) 100; DOI:10.1007/JHEP06(2018)100.
62. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of forward top pair production in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP 1808 (2018) 174; DOI:10.1007/JHEP08(2018)174.
63. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Amplitude analysis of the decay $\overline{B}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ and first observation of the CP asymmetry in $\overline{B}^0 \rightarrow K^{*0} \pi^+ \pi^-$ // Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.26, 261801; DOI:10.1103/PhysRevLett.120.261801.

64. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / First measurement of the CP -violating phase $\phi_{\text{d}\overline{\text{d}}}$ in $B_s^0 \rightarrow (K^+ \pi^-)(K^- \pi^+)$ decays // JHEP 1803 (2018) 140; DOI:10.1007/JHEP03(2018)140.
65. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Studies of the resonance structure in $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ decays // Eur.Phys.J. C78 (2018) no.6, 443; DOI:10.1140/epjc/s10052-018-5758-4.
66. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Evidence for the rare decay $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$ // Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.22, 221803; DOI:10.1103/PhysRevLett.120.221803.
67. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for weakly decaying b -flavored pentaquarks // Phys.Rev. D97 (2018) no.3, 032010; DOI:10.1103/PhysRevD.97.032010.
68. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for the rare decay $\Lambda_c^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$ // Phys.Rev. D97 (2018) no.9, 091101; DOI:10.1103/PhysRevD.97.091101.
69. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of CP asymmetry in $B_s^0 \rightarrow D_s^+ K^-$ decays // JHEP 1803 (2018) 059; DOI:10.1007/JHEP03(2018)059.
70. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / A measurement of the CP asymmetry difference in $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- K^+$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow p \pi^- \pi^+$ decays // JHEP 1803 (2018) 182; DOI:10.1007/JHEP03(2018)182.
71. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for B_c^+ decays to two charm mesons // Nucl.Phys. B930 (2018) 563-582; DOI:10.1016/j.nuclphysb.2018.03.015.
72. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for excited B_c^+ states // JHEP 1801 (2018) 138; DOI:10.1007/JHEP01(2018)138.
73. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Updated determination of D^0 - $\overline{D}^0$ mixing and CP violation parameters with $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ decays // Phys.Rev. D97 (2018) no.3, 031101; DOI:10.1103/PhysRevD.97.031101.
74. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / First observation of $B^+ \rightarrow D_s^+ K^+ K^-$ decays and a search for $B^+ \rightarrow D_s^+ \phi$ decays // JHEP 1801 (2018) 131; DOI:10.1007/JHEP01(2018)131.
75. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the ratio of branching fractions $\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau) / \mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu)$ // Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.12, 121801; DOI:10.1103/PhysRevLett.120.121801.
76. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of branching fractions of charmless four-body Λ_b^0 and Ξ_b^0 decays // JHEP 1802 (2018) 098; DOI:10.1007/JHEP02(2018)098.

77. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Test of Lepton Flavor Universality by the measurement of the $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_{\tau}$ branching fraction using three-prong τ decays // Phys.Rev. D97 (2018) no.7, 072013; DOI:10.1103/PhysRevD.97.072013.
78. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurements of the branching fractions of $\Lambda_c^+ \rightarrow p \pi^- \pi^+$, $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- K^+$, and $\Lambda_c^+ \rightarrow p \pi^- K^+$ // JHEP 1803 (2018) 043; DOI:10.1007/JHEP03(2018)043.
79. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for the lepton-flavour violating decays $B_{(s)} \rightarrow e^{\pm} \mu^{\mp}$ // JHEP 1803 (2018) 078; DOI:10.1007/JHEP03(2018)078.
80. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Search for Dark Photons Produced in 13 TeV pp Collisions // Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.6, 061801; DOI:10.1103/PhysRevLett.120.061801.
81. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of CP observables in $B^{\pm} \rightarrow D K^{\pm}$ decays using two- and four-body DD final states // JHEP 1711 (2017) 156, Erratum: JHEP 1805 (2018) 067; DOI:10.1007/JHEP11(2017)156, 10.1007/JHEP05(2018)067.
82. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / First observation of forward $Z \rightarrow b \bar{b}$ production in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett. B776 (2018) 430-439; DOI:10.1016/j.physletb.2017.11.066.
83. A.S. Sadovsky et al. (OKA Collaboration) / Search for heavy neutrino in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ decay // Eur.Phys.J. C78 (2018) no.2, 92; DOI:10.1140/epjc/s10052-018-5566-x.
84. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of the ratio of the $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_{\tau}$ and $B^0 \rightarrow D^{*-} \mu^+ \nu_{\mu}$ branching fractions using three-prong τ -lepton decays // Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.17, 171802; DOI:10.1103/PhysRevLett.120.171802.
85. Roel Aaij et al. (LHCb Collaboration) / Measurement of CP observables in $B^{\pm} \rightarrow D^{(*)} K^{\pm}$ and $B^{\pm} \rightarrow D^{(*)} \pi^{\pm}$ decays // Phys.Lett. B777 (2018) 16-30; DOI:10.1016/j.physletb.2017.11.070.

4. Публикации по задаче «Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов».

86. E.C. Gil et al. (NA62 Collaboration) / Search for heavy neutral lepton production in K^+ decays // Phys.Lett. B778 (2018) 137-145

87. S. Fedotov, A. Kleymenova, A. Khotjantsev / New CHOD Detector for the NA62 experiment at CERN // Phys. Part. Nucl. 49 (2018) no. 1, 26-29

88. V.I. Nazaruk / New model of kaon regeneration // Chinese Physics C Vol.42, No.2 (2018) 023108

5. Публикации по задаче «Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонном ускорительном комплексе J-PARC.

89. K. Abe et al. (T2K Collaboration) / Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with $2.2 \cdot 10^{21}$ Protons on Target. // Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.17, 171802, DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.171802

90. K. Abe et al. (T2K Collaboration) / Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K // Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 032003, DOI: 10.1103/PhysRevD.98.032003

91. K. Abe et al. (T2K Collaboration) / Measurement of inclusive double-differential ν_μ charged-current cross section with improved acceptance in the T2K off-axis near detector // Phys.Rev. D98 (2018) 012004, DOI: 10.1103/PhysRevD.98.012004

92. K. Abe et al. (T2K Collaboration) / Measurement of the single π^0 -production rate in neutral current neutrino interactions on water // Phys.Rev. D97 (2018) no.3, 032002; DOI: 10.1103/PhysRevD.97.032002

93. K. Abe et al. (T2K Collaboration) / First measurement of the ν_μ charged-current cross section on a water target without pions in the final state // Phys.Rev. D97 (2018) no.1, 012001; DOI: 10.1103/PhysRevD.97.012001

94. K. Abe et al. (T2K Collaboration) / Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea // PTEP 2018 (2018) no. 6, 063C01, DOI: 10.1093/ptep/pty044

95. Yury Kudenko / Study of oscillations with accelerator and reactor neutrinos // EPJ Web Conf. 191 (2018) 01001

96. Yu.G.Kudenko / Neutrino oscillations: recent results and future prospects // Phys.Usp. 61 (2018) no.8, 739-747, Usp.Fiz.Nauk 188 (2018) no.8, 821-830

97. A. Blondel et al. / A fully active fine grained detector with three readout views // JINST 13 (2018) no.02, P02006, DOI: 10.1088/1748-0221/13/02/P02006

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

98. M.A. Acero et al. / New constraints on oscillation parameters from ν_e appearance and ν_μ disappearance in the NOvA experiment // Phys.Rev. D98, 032012 (2018)
99. A.V. Butkevich, S.V. Luchuk / Quasi-elastic neutrino charged-current scattering off ^{12}C : Effects of the meson exchange currents and large nucleon axial mass // Phys.Rev. C97, no. 4, 045502 (2018)

7. Публикации по задаче «Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс в бета-распаде газообразного трития в области масс 0,1–8 кэВ, как кандидатов на роль частиц тёплой тёмной материи».

100. Tim Brunst et al. / Detector Development for a Sterile Neutrino Search with the KATRIN Experiment // arXiv:1801.08182
101. A. Nozik / Statistical time analysis for regular events with high count rate // arXiv:1810.070243.

8. Публикации по задаче «Участие в проведении измерений массы нейтрино на установке КАТРИН в диапазоне 1 эВ».

102. M. Arenz et al. / Reduction of stored-particle background by a magnetic pulse method at the KATRIN experiment // European Physical Journal C 78, 778, 2018
103. M. Arenz et al. / The KATRIN Superconducting Magnets: Overview and First Performance Results // Journal for Instrumentation, 13(8), T08005, 2018
104. M. Arenz et al. / Calibration of high voltages at the ppm level by the difference of 83m Kr conversion electron lines at the KATRIN experiment // European Physical Journal C, 78, 368, 2018
105. M. Arenz et al. / First transmission of electrons and ions through the KATRIN beamline // JINST 13, P04020, 2018

9. Публикации по задаче «Исследование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Разработка методики регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с помощью низкофонового газового детектора. Поиск массивных «скрытых» фотонов с помощью мультикатодного счётчика».

106. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. / A multi-cathode counter in a single-electron counting mode // Nucl.Instrum.Meth. A910 (2018) 164-167

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

107. M. Agostini et al. / New Data Release of GERDA Phase II: Search for $0\nu\beta\beta$ decay of ^{76}Ge // *KnE Energ.Phys.* 3 (2018) 202-209, DOI: 10.18502/ken.v3i1.1745
108. M. Agostini et al. / GERDA results and the future perspectives for the neutrinoless double beta decay search using ^{76}Ge // *Int.J.Mod.Phys. A* 33 (2018) no.09, 1843004, DOI: 10.1142/S0217751X18430042
109. M. Agostini et al. / Improved Limit on Neutrinoless Double- β Decay of ^{76}Ge from GERDA Phase II. GERDA Collaboration // *Phys.Rev.Lett.* 120 (2018) no.13, 132503, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.132503
110. T. Abrahao et al. / Novel event classification based on spectral analysis of scintillation waveforms in Double Chooz // *JINST*, 13, 01031 (2018).
111. H. de Kerret et al. / Yields and production rates of ^9Li and ^8He measured with the Double Chooz near and far detectors // *JHEP* 11 (2018) 053

11. Публикации по задаче «Новый этап эксперимента по поиску 2K-захвата в ^{124}Xe . Продолжение измерений с образцом ^{124}Xe . Обработка данных измерений 2014-2018 гг.».

112. Yu.M. Gavriluk et al. / 2K-Capture in ^{124}Xe : Results of Data Processing for an Exposure of 37.7 kg day // *Physics of Particles and Nuclei* 49 (2018) №4. pp. 563-568.
113. Yu.M. Gavriluk et al. / Results of In-Depth Analysis of Data Obtained in the Experimental Search for 2K(2ν)-Capture in ^{78}Kr // *Physics of Particles and Nuclei* 49 (2018) № 4. pp. 540-546.
114. Yu.M. Gavriluk et al. / Search for two-neutrino 2K capture in ^{124}Xe : the method and preliminary results // *Physics of Particles and Nuclei* 49 (2018) №1. pp. 563-568.

12. Публикации по задаче «Исследование свойств тёмной материи и тёмной энергии, астрофизика космических лучей. В том числе теоретическое исследование приливного разрушения аксионных сгустков темной материи в гало Галактики и поиск возможных наблюдательных эффектов от шлейфов разрушенных аксионных сгустков наземными и орбитальными детекторами».

115. E.O.Babichev, V. I. Dokuchaev, Yu. N. Eroshenko / Black Hole in a Radiation-Dominated Universe // *Astron. Lett.* 44, 491-499 (2018), DOI: 10.1134/S1063773718090013.

13. Публикации по задаче «Изучение фона при поиске частиц тёмной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо. Обработка новых экспериментальных данных с установок LVD.

Публикации:

116. Н.Ю. Агафонова и др. / Изучение вариаций низкоэнергетического фона с помощью подземного эксперимента LVD // Известия РАН Серия физическая, 2019 (принято в печать)

Доклады:

1. A. S. Malgin "Variations in the cosmogenic neutron flux and the cosmic ray muon energy underground" The International Seminar "Quarks-2018", May 27 - June 2, 2018, Valday, Russia
2. И.Р. Шакирьянова «Мюонная физика в эксперименте OPERA» 9-ые Зацепинские чтения, 8 июня 2018 г, Москва, ФИАН;
3. V. Ashikhmin "Study of low-energy background variations in the LVD underground experiment" (oral) 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul - Belokurikha - Altai Mountains on July 6 - 10, 2018;
4. N. Agafonova "Measurement of variations in the flux of atmospheric muons using underground LVD detector" (oral) IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2018), Moscow, MEPhI, 22-26 October 2018;
5. Н. Агафонова от имени Коллаборации LVD "Измерение вариаций потока атмосферных мюонов с помощью подземного детектора LVD", 1161-й семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина, 02 ноября 2018;
6. C. Vigorito (LVD Collaboration) "Measurement of the underground flux of atmospheric muons with 24 years of data of the LVD detector" (oral) 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul - Belokurikha - Altai Mountains on July 6 - 10, 2018.