

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

УДК 524.1, 524.8, 539.12, 004.67

Рег. № АААА-А19-119052090068-9

Рег. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЯИ РАН,

чл.-корр. РАН



Л.В. Кравчук

«31» января 2020 г.

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АААА-А19-119052090068-9

СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ И МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОБЛАСТИ НЕЙТРИННОЙ
АСТРОФИЗИКИ, ГАММА- АСТРОНОМИИ, ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ
ЛУЧЕЙ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

(промежуточный за 2019 год)

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

 Г.И. Рубцов
«31» января 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



31.01.2020

подпись, дата

Г.И. Рубцов

(введение, заключение,
раздел 4)

Исполнители:

М.Н.С.



31.01.2020

подпись, дата

М.Д. Шелепов

(раздел 1)

М.Н.С.



31.01.2020

подпись, дата

В.Г. Чернов

(раздел 2)

М.Н.С.



31.01.2020

подпись, дата

А.В. Мефодьев

(раздел 3)

М.Н.С., К.Ф.-М.Н.



31.01.2020

подпись, дата

Я.В. Жежер

(раздел 4)

М.Н.С., К.Ф.-М.Н.



31.01.2020

подпись, дата

А.С. Чудайкин

(раздел 5)

М.Н.С., К.Ф.-М.Н.



31.01.2020

подпись, дата

В.Е. Волкова

(раздел 6)

М.Н.С., К.Ф.-М.Н.



31.01.2020

подпись, дата

Ю.А. Меликян

(раздел 7)

М.Н.С.



31.01.2020

подпись, дата

А.И. Шабанов

(раздел 8)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 37 с., 1 кн., 13 рис., 0 табл., 23 источн., 1 прил.

Ключевые слова: ФИЗИКА НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ НЕЙТРИНО, ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ДАННЫХ, МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ СОБЫТИЙ, СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ, МАССА НЕЙТРИНО, КОСМОЛОГИЯ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2019 год.

Выполнены работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

1. Задача «Повышение точности методов реконструкции событий от взаимодействия нейтрино в эффективном объеме детектора Baikal-GVD. Применение методов машинного обучения для повышения эффективности выделения каскадных событий».

Объектом исследования являются нейтрино с энергией выше 100 ТэВ.

Цель работы — повышение точности методов исследования потоков нейтрино высоких и сверхвысоких энергий от астрофизических источников на глубоководном Байкальском нейтринном телескопе.

В работе использованы два метода временной калибровки каналов. Первый метод основан на прямом измерении задержек фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Для этого контроллер оптического модуля (ОМ) формирует специальный тестовый импульс, синхронизированный с запуском светодиода. Для второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ каналов установки.

Результатом работы является разработка нового метода временной калибровки, и улучшение точности временной калибровки до 2 нс. Получена оценка фона при выделении нейтринных событий с использованием оповещений от нейтринного телескопа ANTARES. Выполнено Монте-Карло моделирование каскадных событий в условиях телескопа Baikal-GVD и проведена реконструкция данного набора. Разработаны алгоритмы автоматической статистической обработки амплитудных спектров.

Результаты будут использованы коллаборацией Baikal-GVD для поиска нейтрино астрофизического происхождения и для исследований в рамках многоканальной астрономии.

2. Задача «Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке. Разработка алгоритма автоматического поиска искажений в амплитудном спектре, зарегистрированном на установке Троицк ню-масс».

Объектом исследования являются акты радиоактивного распада трития в экспериментах по определению массы нейтрино и поиску стерильного нейтрино.

Цель работы — повышение чувствительности поиска стерильного нейтрино на установке Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке.

Для решения задачи построены три алгоритма определения наложений. Первый, наиболее простой, основан на поиске локальных максимумов сигнала АЦП. Второй метод расширяет первый в том, что поиск локальных максимумов осуществляется последовательно с вычитанием обнаруженного сигнала после каждого шага. Третий метод включает в себя преимущества второго метода, с тем отличием, что последовательный поиск сигналов осуществляется в нем путем аппроксимации фронта сигнала.

Результатом работы является эффективный алгоритм определения наложений и восстановления амплитудных спектров при наборе событий с большой скоростью счета на основе исследования формы этих событий. Алгоритм впервые позволил проводить эффективное разделение наложенных событий при расстоянии между пиками в 5-6 раз меньше, чем ширина единичного события.

Разработанный алгоритм будет использован коллаборацией Троицк ню-масс для прецизионного поиска стерильного нейтрино.

3. Задача «Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K».

Объектом исследования являются сечения взаимодействия нейтрино с водой и пластиковым сцинтиллятором.

Цель работы — получение информации о различии сечений взаимодействия нейтрино с водой и пластиковым сцинтиллятором в эксперименте Baby MIND.

Для реконструкции импульса регистрируемых мюонов используется метод «lever-arm» и метод «range». В основу указанных методов входит определение отклонения мюонного трека при прохождении магнетизированных стальных модулей детектора Baby MIND и определения «energy deposit» энергии, выделенной мюоном при прохождении модулей детектора.

Результатом работы является разработка программного комплекса Монте-Карло для симуляций событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI (Water Grid Scintillator Detector). Эффективность реконструкции импульса регистрируемых мюонов в детекторе Baby MIND, согласно результатам моделирования достигает 99% для мюонов с энергией от 1 до 10 ГэВ.

Разработанный в рамках работ по НИР программный комплекс «Unpacking» используется в настоящее время для обработки данных для других экспериментов, таких как SuperFGD.

4. Задача «Построение уточненного алгоритма оценки массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки Telescope Array. Исследование параметров мюонного избытка по данным наземной решетки Telescope Array».

Объектами исследования являются космические лучи ультравысоких энергий и модели адронного взаимодействия на высоких энергиях.

Цель работы — повышение точности определения состава космических лучей ультравысоких энергий в эксперименте Telescope Array.

Для анализа массового состава космических лучей построен метод, основанный на использовании усиленных деревьев решений. Впервые разработан метод, который использует только данные наземной решетки эксперимента Telescope Array, дающие преимущество в статистике регистрируемых событий по сравнению с традиционным методом, использующим данные флуоресцентных телескопов. Разработана программа для ЭВМ «Программа определения масс первичных частиц космических лучей, регистрируемых в эксперименте Telescope Array (mva_pFe_ds8)».

В результате НИР по данным наземной решетки Обсерватории Telescope Array получена оценка средней массы космических лучей ультравысоких энергий в диапазоне от 10^{18} до 10^{20} эВ. Средняя масса в пределах ошибок не зависит от энергии первичных частиц, и ее среднее значение составляет $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$. Средняя масса космических лучей впервые измерена с помощью наземной решетки Telescope Array в более широком диапазоне энергий, чем результат традиционного флуоресцентного метода. Выполнено Монте-Карло моделирование ШАЛ, вызванных первичными протонами и ядрами в условиях установки Telescope Array для трех различных высокоэнергетических адронных моделей (QGSJET II-03, QGSJET II-04, EPOS-LHC).

Разработанные методы могут быть использованы при проектировании установок следующего поколения для регистрации космических лучей, для которых точность восстановления состава является ключевой характеристикой.

5. Задача «Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной».

Объектом исследования являются массы нейтрино.

Цель работы — детальное изучение возможности точного определения масс нейтрино из крупномасштабной структуры Вселенной в нелинейном режиме.

Разработан новый метод вычисления теоретических предсказаний для корреляционных функций распределения галактик в слабо-нелинейном режиме, построенный на базе теории возмущений на временных расслоениях. Особенностью данного метода является высокая его точность на уровне 0.5-1%, что сравнимо с точностью предстоящих глубоких обзоров неба, таких как «Евклид». Сделан прогноз точности изменения космологических параметров и масс нейтрино, которые могут быть достигнуты при использовании предложенного метода для обработки данных по крупномасштабной структуре Вселенной будущих глубоких обзоров неба. Разработан программный пакет, позволяющий реализовать теоретические вычисления наиболее эффективным способом.

В результате НИР показано, что совместный анализ данных космических обсерваторий «Планк» и «Евклид» с использованием разработанного метода позволит измерить сумму масс нейтрино с точностью 0.013 электронвольт, что гарантирует детектирование даже минимальной абсолютной массы нейтрино на уровне 5σ .

Полученный результат имеет большое значение для фундаментальной физики в целом, так как определение масс нейтрино из космологических наблюдений будет иметь существенное влияние на экспериментальные и теоретические работы в области физики частиц. Разработанный метод анализа данных не имеет мировых аналогов и намного превосходит алгоритмы обработки данных, использованные ранее. Он может быть использован ведущими международными коллективами для анализа данных крупномасштабной структуры Вселенной уже в ближайшие годы.

6. Задача «Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT».

Объектом исследования являются модели происхождения Вселенной типа отскока и генезиса.

Цель работы — построение конкретных примеров моделей с космологическим сценариям типа отскока и генезиса, а также решений, соответствующих сферически-симметричной кротовой норе, удовлетворяющих требованию отсутствия патологий на

линеаризованном уровне на протяжении всей эволюции и согласующихся с предсказаниями экспериментов Planck и SPT.

Было проведено исследование поведения малых возмущений на фоне решения в виде статической, сферически-симметричной кротовой норы в рамках расширенных теорий Хорндески четвертого порядка. Для того же класса скалярно-тензорных теорий были получены аналитические выражения для недостающих критериев устойчивости сферически-симметричного решения по отношению к угловым градиентам, а также тахионам.

Были впервые получены критерии устойчивости статических, сферически-симметричных решений в расширенной теории Хорндески четвертого порядка. Построен конкретный пример решения в виде кротовой норы в некотором подклассе расширенной теории Хорндески, которое удовлетворяет части условий устойчивости.

Разработанные методы могут быть использованы для построения конкретных космологических моделей, соответствующих сферически-симметричной кротовой норе.

7. Задача «Оптимизация точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE».

Объектом исследования является сильно взаимодействующая материя при высоких плотностях энергии.

создание быстродействующего детектора FIT (Fast Interaction Trigger) для обновлённого эксперимента ALICE.

Цель работы — повышение точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE.

В результате НИР разработана обновлённая версия плат формирования и съёма сигнала с данных фотоумножителей, а также разработана спецификация на многоканальные пластины (МКП) пониженного сопротивления. Обновленная версия плат соответствует требованиям к гранулярности, временному разрешению, пределу линейности и габаритам FT0.

Полученные результаты необходимы для обеспечения корректного набора физических данных модернизированным экспериментом ALICE, в который входит детектор FIT, что позволит уточнить механизм партон-адронного перехода и прояснить природу конфайнмента и ядерной материи при высоких значениях температуры.

8. Задача «Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов».

Объектом исследования является горячая и плотная ядерная материя, образующаяся в столкновениях тяжелых ионов при энергиях пучка 1-2 ГэВ/нуклон.

Цель работы — определение выхода нейтральных мезонов, а также спектроскопия $\Lambda(1405)$ и $\Sigma(1385)$ резонансов в столкновениях тяжелых ионов в эксперименте HADES. Для решения данной задачи к существующему экспериментальному комплексу был добавлен новый электромагнитный калориметр ECal, созданный в сотрудничестве ИЯИ с чешской группой.

В рамках НИР выполнена калибровка детектора. Для этого “сырая” амплитуда выходного сигнала каждой ячейки сопоставлялась с энергией электрона, попавшего в эту ячейку. Полученная зависимость аппроксимировалась квадратичной функцией. Для трекинга электронов и определения их энергии был разработан код с использованием пакета HYDRA. Для событийной визуализации работы детектора была разработана программа ECal Event Display. С ее помощью отлажен алгоритм поиска кластеров, соответствующих попаданию γ -квантов в детектор.

В марте 2019 г. состоялся первый запуск установки HADES с новым детектором ECal. Получены данные для столкновений ядер $\text{Ag}+\text{Ag}$ при энергии пучка 1.58 ГэВ и 1.23 ГэВ. Произведена временная и амплитудная калибровка детектора по электронам и позитронам.

Разработанные методы могут быть использованы для измерения выхода нейтральных мезонов и странных гиперонов, а также значительного улучшения идентификации электронов и заряженных пионов при энергии выше 400 МэВ.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. Повышение точности методов реконструкции событий от взаимодействия нейтрино в эффективном объеме детектора Baikal-GVD. Применение методов машинного обучения для повышения эффективности выделения каскадных событий.....	15
2. Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке. Разработка алгоритма автоматического поиска искажений в амплитудном спектре, зарегистрированном на установке Троицк ню-масс.....	18
3. Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K.....	20
4. Построение уточненного алгоритма оценки массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки Telescope Array. Исследование параметров мюонного избытка по данным наземной решетки Telescope Array.....	21
5. Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной.....	23
6. Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT.....	24
7. Оптимизация точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE.....	26
8. Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов.....	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	34
ПУБЛИКАЦИИ.....	35
ПРИЛОЖЕНИЯ	37
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	37

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Повышение точности методов реконструкции событий от взаимодействия нейтрино в эффективном объеме детектора Baikal-GVD. Применение методов машинного обучения для повышения эффективности выделения каскадных событий»

Детектирование нейтрино высоких энергий астрофизического происхождения является целевой задачей нейтринного эксперимента на глубоководном телескопе Baikal-GVD, который является крупнейшим глубоководным нейтринным телескопом Северного полушария. Основными регистрирующими элементами Baikal-GVD являются ФЭУ, размещенные в глубоководных стеклянных корпусах, образуя оптические модули (ОМ). Оптические модули монтируются на вертикальных грузонесущих кабельных линиях, формируя гирлянды. Длина гирлянды 525 метров. Вдоль нее через каждые 15 метров размещены 36 ОМ. Структура из восьми гирлянд составляет один кластер радиусом 60 метров с одной центральной гирляндой и семью по окружности. С апреля 2019 года конфигурация установки Baikal-GVD включает пять действующих кластеров на расстоянии 300 метров между собой с 1440 оптическими модулями. При этом эффективный объем детектора соответствует 0.25 км^3 для регистрации каскадных событий от нейтрино с энергией выше 100 ТэВ. Количество поступающих с телескопа данных в 2019 году достигло терабайтов, что требует разработки современных методов обработки данных.

2. Задача «Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке. Разработка алгоритма автоматического поиска искажений в амплитудном спектре, зарегистрированном на установке Троицк ню-масс»

Одной из основных сложностей при поиске стерильных нейтрино с массой до 5 кэВ в эксперименте Троицк ню-масс ([1]) является высокая скорость счета на основном детекторе. Согласно проекту, он должен обрабатывать частоту счета до 40-50 кГц с хорошей дискриминацией накопления и очень точной оценкой мертвого времени (с точностью до 100 нс или выше). При ширине формы сигнала около 4 мкс трудно реализовать аппаратное разделение сигналов. Поэтому было решено использовать непрерывную оцифровку и выполнять разделение сигналов в режиме онлайн. Текущая настройка включает в себя недорогую плату АЦП RudShel Lan10-12PCI, которая имеет максимальную точность 20 нс. Из-за особенностей режима осциллографа на плате оказалось, что на высоких скоростях счета не может использоваться режим одиночного события. Вместо этого мы записываем непрерывные блоки фиксированной длины,

проводим быстрое подавление нуля в режиме онлайн, а все остальные операции оставляем для оффлайн-анализа. Такой режим сбора данных позволяет частично обойти ограничения аппаратного обеспечения платы и исключить время простоя оборудования, но требует программного обеспечения для разделения импульсов. Существует несколько способов провести разделение наложенных событий. Например, восстановление формы спектра с помощью нейронной сети. Алгоритм, описанный в [2], использует смоделированные спектры в качестве обучающей выборки и требует знания формы исходного неискаженного спектра. Другой способ описан в [3]. Он основан на аналитической модели, которая предсказывает мертвое время и искажения спектра, вызванные наложением сигналов. Несмотря на хорошие результаты, модель жестко привязана к формуле аналитического импульса и поэтому не применима в других системах без существенной модификации.

Предложенный в рамках НИР алгоритм коррекции также основан на форме отдельных событий. Однако, вместо использования информации, полученной извне, такой как форма спектра или формула аналитического сигнала, он опирается только на данные непрерывного сигнала, собранные с АЦП, и извлекает все необходимые параметры из самих данных. Это делает алгоритм применимым для различных задач оцифровки сигнала без значительных изменений.

В процессе анализа данных «Троицк ню-масс» были обнаружены неопределенные искажения в форме спектров на интересующих участках. Для исследования природы и параметров искажений требуется разработка алгоритмов автоматической статистической обработки амплитудных спектров.

3. Задача «Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K».

Современные достижения в области электроники позволяют оптимизировать уже существующие детекторы в экспериментах по осцилляции нейтрино с длинной базой и создать новые с лучшим разрешением. Это должно позволить увеличить точность определения параметров нейтринных осцилляций. В 2019 году состоялся первый физический набор данных для эксперимента Baby MIND [4] в качестве намагниченного сегментированного детектора нейтрино для эксперимента WAGASCI. Основной целью эксперимента WAGASCI является уменьшение систематической ошибки в эксперименте T2K с помощью определения отношения сечения взаимодействия нейтрино с водой и с пластиковым сцинтиллятором. Повышение чувствительности анализа данных эксперимента BabyMIND позволит увеличить точность определения параметров нейтринных осцилляций в нейтринных осцилляционных экспериментах с длинной базой. В

рамках НИР проводится разработка программных комплексов и соответствующих алгоритмов для реконструкции и Монте-Карло моделирования событий.

4. Задача «Построение уточненного алгоритма оценки массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки Telescope Array. Исследование параметров мюонного избытка по данным наземной решетки Telescope Array».

Массовый состав космических лучей, наблюдаемых на Земле – одна из характеристик, которую возможно установить непосредственно по наблюдаемым экспериментально широким атмосферным ливням. Исследование массового состава необходимо для анализа моделей рождения, ускорения и распространения космических лучей, ни одна из которых до сих пор не признана общепринятой.

Результаты экспериментального исследования космических лучей ультравысоких энергий во многом основаны на сравнении с предсказаниями моделирования, при этом все современные высокоэнергетические адронные модели представляют собой те или иные феноменологические подходы к описанию взаимодействий в квантовой хромодинамике. Результаты обсерватории им. Пьера Оже показали несоответствие между мюонным сигналом, предсказанным адронными моделями и реальным, наблюдаемым экспериментально. Аналогичный результат был получен в экспериментах HiRes/MIA, KASCADE-Grande, NEBOД, SUGAR, а также в эксперименте Telescope Array по данным наземной решетки.

5. Задача «Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной».

Крупномасштабная структура Вселенной представляет собой трехмерное распределение материи, которое состоит из галактик, скоплений галактик, филаментов и других массивных образований. Данная трехмерная картина содержит большое количество информации, которая в будущем станет источником самых сильных ограничений на космологические параметры. Однако, эффект от массивных нейтрино закодирован в распределении структур на достаточно малых масштабах, где теоретическое описание осложнено нелинейным скручиванием материи. По причине гравитационной неустойчивости поле плотности материи при достижении определенного значения формирует компактные объекты, образование которых не описывается в рамках линейной теории. Несмотря на сильно нелинейную природу этих сгустков, их эффект на больших пространственных масштабах удастся систематически описать в рамках космологической теории возмущений. Этот метод был развит сравнительно недавно, а в рамках НИР он

впервые применен для анализа данных. Использование данного метода позволяет аналитически вычислить первые нетривиальные нелинейные поправки к спектру мощности галактик, что позволяет продвинуться в слабо-нелинейную область формирования структур, где эффект от массивных нейтрино наиболее выражен.

6. Задача «Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT».

Существующие результаты исследований показывают, что скалярно-тензорные теории модифицированной гравитации, такие как теории Хорндески и их расширения, позволяют эффективно исследовать не только космологические сценарии без начальной сингулярности (например, Вселенная с «отскоком» или «генезисом»), но также конструировать компактные сферически-симметричные гравитационные объекты типа черных дыр и кротовых нор. Существенной особенностью указанного класса скалярно-тензорных теорий является потенциальная возможность построения статической, сферически-симметричной кротовой норы с конечным размером горловины. Принципиальной сложностью при построении таких проходимых кротовых нор является их неустойчивость на линеаризованном уровне, а именно стандартная проблема с возникновением духовых степеней свободы. Основной целью исследования статической, сферически-симметричной кротовой норы в рамках расширенной теории Хорндески являлось построение конкретного примера модели, которая была бы полностью свободна от духовых неустойчивостей.

7. Задача «Оптимизация точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE».

В ходе третьего и четвёртого сеансов работы LHC, в качестве основного люминометра и источника триггерных сигналов обновлённого эксперимента ALICE будет использоваться детектор FIT (Fast Interaction Trigger). FIT состоит из черенковской (FT0) и сцинтилляционных (FV0, FDD) подсистем. Основным исполнителем проекта по разработке и созданию FT0 является ИЯИ РАН.

Основными регистрирующими элементами FT0 являются 52 фотоумножителя на микроканальных пластинах (МКП-ФЭУ). В качестве наиболее подходящего и коммерчески-доступного типа МКП-ФЭУ был определён Planacon XP85002/A1-Q, который, однако, имеет ряд недостатков, вызванных использованием в данных приборах специфичных плат формирования и съёма сигнала и МКП высокого сопротивления. Для выполнения требований к гранулярности, временному разрешению, пределу линейности и

габаритам FT0 требуется разработка обновленной версии плат формирования и съёма сигнала с данных фотоумножителей и спецификации на МКП пониженного сопротивления.

8. Задача «Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов».

Эксперимент HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) нацелен на исследование свойств плотной горячей материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов при энергии пучка до 2 ГэВ. Для регистрации γ -квантов и измерения их энергии был создан черенковский электромагнитный калориметр ECal. В 2018 г. были собраны и протестированы на космических лучах 4 из планируемых 6 секций, по 163 модуля каждая. Используя данные детектора ECal, можно измерить выход нейтральных мезонов и странных гиперонов, а также значительно улучшить идентификацию электронов и заряженных пионов при энергии выше 400 МэВ.

1. Повышение точности методов реконструкции событий от взаимодействия нейтрино в эффективном объеме детектора Baikal-GVD. Применение методов машинного обучения для повышения эффективности выделения каскадных событий.

Одной из основных характеристик нейтринного телескопа является его угловое разрешение направлений регистрируемых релятивистских частиц, которое зависит от оптических свойств среды, то есть от рассеяния и поглощения света, а так же от точности измерения времени регистрации черенковских фотонов, испускаемых продуктами взаимодействия нейтрино со средой внутри эффективного объема детектора. Этим обусловлена необходимость проведения точной временной калибровки измерительных каналов установки. Для повышения эффективности выделения нейтринных событий от электромагнитных каскадов необходимо выявлять такие события среди шумовых срабатываний телескопа от атмосферных мюонов. Используя данные о направлении событий от других детекторов в системе «multi-messenger» и восстанавливая события на Baikal-GVD в этих направлениях, можно значительно понизить долю шумовых событий.

Временная калибровка каналов заключается в измерении их относительных временных сдвижек. Величина сдвижек каналов определяется двумя основными факторами: задержками сигналов в кабелях оптических модулей и задержкой импульсов в фотоэлектронном умножителе. Кабельные задержки измеряются в лаборатории и не меняются во времени. Задержки ФЭУ зависят от высоковольтного напряжения на делителе и требуют постоянного контроля в процессе работы. Применяются два метода временной калибровки каналов. Первый метод основан на прямом измерении задержек ФЭУ. Для этого контроллер ОМ формирует специальный тестовый импульс, синхронизованный с запуском светодиода. Разница времен dT между сигналом с ФЭУ, генерированным светодиодом, и тестовым импульсом позволяет определить задержку фотоэлектронного умножителя. Для второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ каналов установки. Для оценки точности временной калибровки были сопоставлены результаты, полученные двумя указанными выше методами (рис.1 слева). Различие между временными сдвижками, измеренными независимыми методами, составляет величину ~ 2 нс. Это значение дает верхнюю оценку точности временной калибровки каналов.

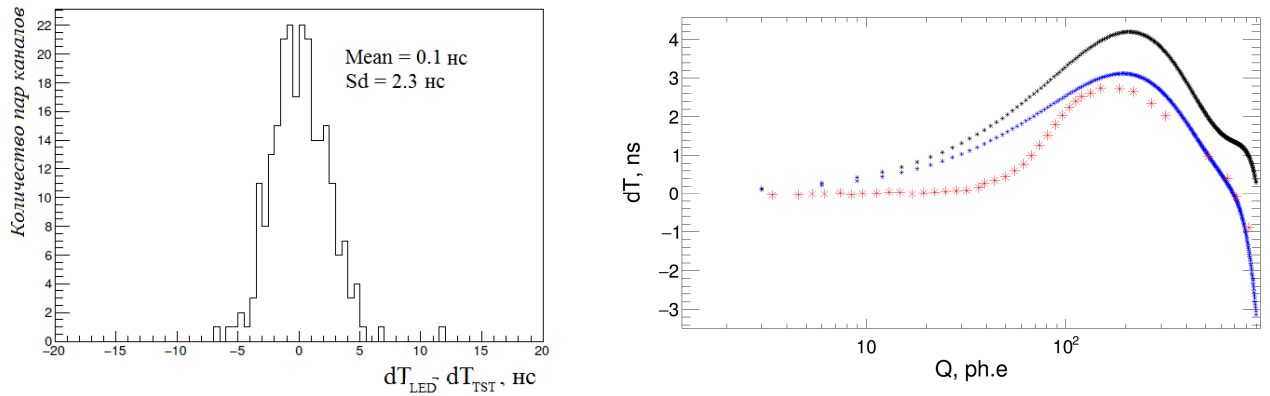


Рис.1 Распределение по разности между временными сдвигками каналов, полученными при помощи светодиодной калибровки и с использованием тестового импульса (слева), примеры время-амплитудных зависимостей для трех выборочных каналов (справа).

Важным фактором, влияющим на точность измерения времени регистрации каналов, является зависимость этого параметра от амплитуды сигнала. Эта зависимость обусловлена тем, что в “области насыщения” канала (~ 100 ф.э. и выше), меняются характеристики переднего фронта сигнала, в то время как временная отметка вычисляется на половине высоты импульса. Для вычисления время-амплитудных зависимостей на каждом канале, было проведено измерение заряда и времени сигнала от светодиода, который находится внутри ОМ, при различных интенсивностях свечения (рис.1 справа). Такие измерения позволили для каждого канала (всего для 1440) ввести индивидуальную поправку ко времени регистрации сигнала, в зависимости от его амплитуды. После введения корректировки максимальную разность между временными сдвигками при разных амплитудах удалось уменьшить на 1.5 нс.

В ходе анализа экспериментальных данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, применяются критерии отбора на энергию каскада выше 10 ТэВ и множественность числа сработавших каналов детектора – более десяти. Такие критерии нужны для выделения нейтринных событий из фона событий от атмосферных мюонов, однако при этом могут теряться нейтринные события с более низкими энергиями. Для эффективной регистрации событий с низкими энергиями, использовались данные, полученные при обмене информацией с нейтринным телескопом ANTARES. Всего в 2019 году было получено 26 оповещений (алертов) от ANTARES. Проводилась обработка данных Baikal-GVD за времена $\pm$ сутки от времени алертов. Всего было выделено порядка 2.8 миллиона событий. Затем вводились ограничения на значения функционалов хи квадрат и функцию максимального правдоподобия, на количество сработавших каналов больше 7, и на разность восстановленного угла с направлением алерта меньше 5° (при угловом разрешении

для каскадов 4.5^0). В результате было выделено три события, которые удовлетворяют заданным ограничениям. Однако, их времена регистрации не совпадают со временем алерта в окне 500 секунд. Для этих событий была проведена оценка фона от атмосферных мюонов. Для этого были обработаны данные за 16 дней работы установки, вблизи времени алерта. На рис. 2 показано распределение восстановленных событий за этот период по разности углов между направлением каскада и направлением алерта. Полученная оценка темпа счета шумовых событий в конусе угла 5^0 составляет 0.04 события в сутки на кластер, при этом измеренный темп счета составляет 0.5 события в сутки на кластер. Значимость таких событий составляет меньше трех сигма. Требуется большая статистика обработанных данных.

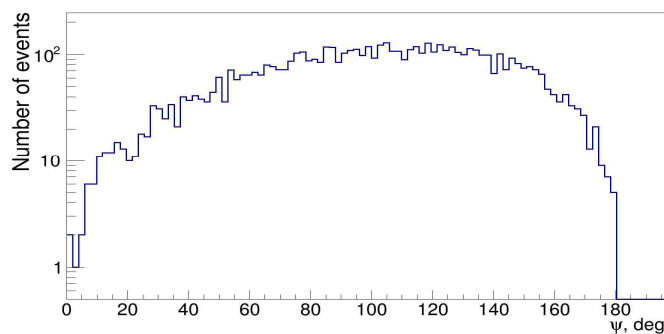


Рис.2 Распределение восстановленных событий за 16 суток по разности углов между направлением каскада и направлением алерта.

Одной из задач обработки данных телескопа является повышение эффективности выделения ливневых событий из исходных данных, регистрируемых телескопом, и повышение точности восстановления параметров ливня, включая оценку его энергии. Основным фоном при восстановлении ливней являются события, генерируемые атмосферными мюонами (в основном группами мюонов) при их распространении в воде. Фоновые события требуется эффективно распознать и исключить при восстановлении ливней.

Для более эффективного разделения сигнальных каскадных событий и шумовых событий, вызванных мюонными группами, в рамках НИР разрабатывается методика применения машинного обучения в процессе обработки данных на основе использования усиленных деревьев решений (Boosted Decision Trees, BDT). В результате обучения деревьев решений создается модель, которая предсказывает значение целевой переменной, основываясь на ряде входных переменных. Целевой переменной дерева в данном случае является признак классификации сигнал-шум. Входные данные – параметры восстановленного события, полученные в результате процедуры реконструкции и предварительного анализа. Обучение проводится с помощью библиотеки TMVA (Toolkit

for Multivariate Data Analysis) в среде обработки данных ROOT. Для качественного обучения необходимы большая статистика данных моделирования Монте-Карло в области высоких энергий, где события от каскадов и мюонных групп будут заведомо разделены.

На первом этапе для проверки эффективности метода восстановления параметров каскадных событий был подготовлен набор искусственных событий Монте-Карло. В наборе содержится 1632 разыгранных события с энергиями от 1 Тэв до 1 Пэв, из которых условиям отбора удовлетворяют 916 событий. Положения каскадов распределены по установке в пределах от -300 м до 300 м от центра установки по каждой оси. В данный набор не входят шумы от групп атмосферных мюонов. Построенный набор успешно восстановлен с помощью стандартной процедуры реконструкции коллаборации Baikal-GVD.

2. Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке. Разработка алгоритма автоматического поиска искажений в амплитудном спектре, зарегистрированном на установке Троицк ню-масс.

Для оптимизации разрабатываемых алгоритмов выполнено Монте-Карло моделирование сигнала и шума. Моделирование шума выполнено в предположении, что он состоит из большого количества событий с низкой амплитудой, равномерно распределенных по времени и имеющих ту же форму, что и форма полезного события. Для того, чтобы смоделировать событие, нужно знать его чистую форму без шума. Формы событий могут быть извлечены из данных путем группировки событий по значению амплитуды и последующего усреднения форм по группам. Усредненные формы сигналов для массива данных Троицка, показаны на рисунке 3. На основании усредненных форм построена аналитическая формула для моделирования сигнальных событий.

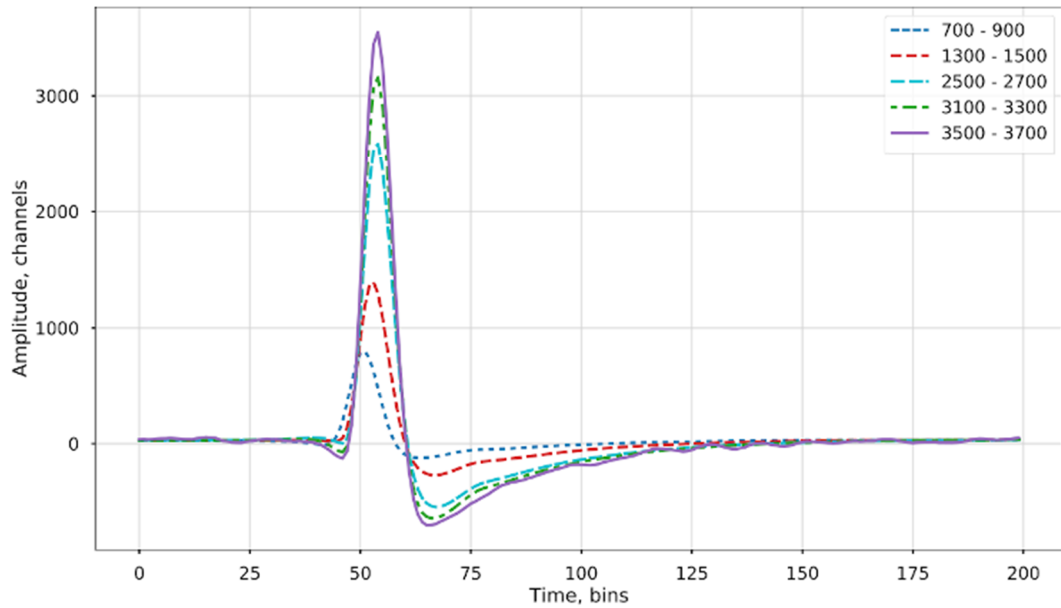


Рис.3 Усредненная форма событий Троицк ню-масс для сигналов различной амплитуды (каждая линия соответствует своему диапазону амплитуд).

Для решения основной задачи раздела построены три алгоритма определения наложений. Первый, наиболее простой, основан на поиске локальных максимумов сигнала АЦП. Второй метод расширяет первый в том, что поиск локальных максимумов осуществляется последовательно с вычитанием обнаруженного сигнала после каждого шага. Третий метод включает в себя преимущества второго метода, с тем отличием, что последовательный поиск сигналов осуществляется в нем путем аппроксимации фронта сигнала. Точность третьего метода оказалась наиболее высокой среди рассмотренных. Алгоритм впервые позволил проводить эффективное разделение наложенных событий при расстоянии между пиками в 5-6 раз меньше, чем ширина единичного события.

Разработанный алгоритм будет использован коллаборацией Троицк ню-масс для прецизионного поиска стерильного нейтрино. Использование данного алгоритма также возможно в эксперименте KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) в Карлсруэ.

Разработка алгоритма поиска искажений в форме амплитудных спектрах основана на предположении о том, что небольшая часть спектров является аномальными и отличается по своим характеристикам от большинства спектров. В этом случае для спектров с однотипными искажениями будут существовать параметры, по которым можно провести кластеризацию. Аномальные спектры будут определяться по отклонению от центров кластеризации. На данном этапе НИР были рассмотрены следующие параметры спектров: положение пика, хи-квадрат отклонение средней формы для различных участков

спектра. Анализ данных показал, что по рассмотренным на данном этапе параметрам не происходит кластеризации спектров. В настоящее время разрабатывается алгоритм поиска аномальных спектров, использующий сверточные нейронные сети.

3. Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K.

В 2019 году проведен первый физический набор данных для эксперимента Baby MIND в качестве намагниченного сегментированного детектора нейтрино для эксперимента WAGASCI, задачей которого является уменьшение систематической ошибки в эксперименте T2K с помощью определения отношения сечения взаимодействия нейтрино с водой и с пластиковым сцинтиллятором.

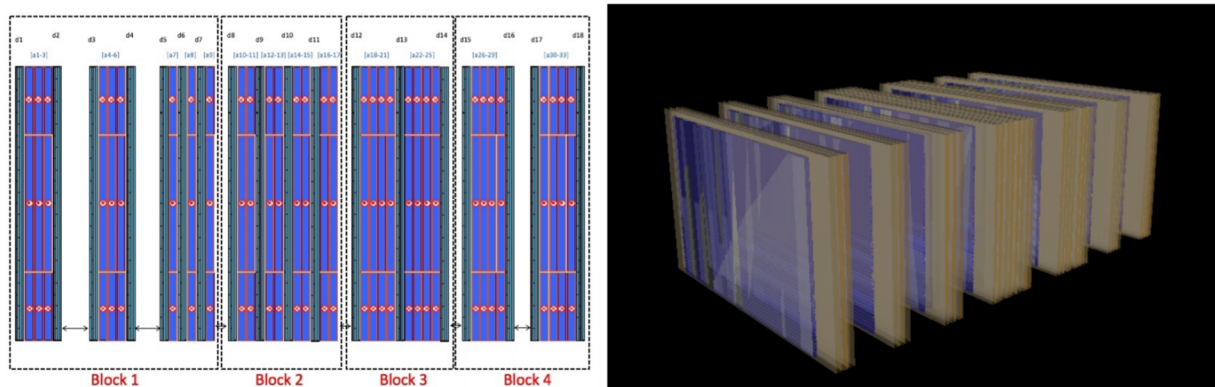


Рис. 4. Схема эксперимента Baby MIND.

В рамках НИР в 2019 году был разработан программный комплекс Монте-Карло для симуляций событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI, основной составной частью которой является детектор Baby MIND, см. рис. 4.

Для реконструкции импульса регистрируемых мюонов используется метод «lever-arm» и метод «range». В основу указанных методов входит определение отклонения мюонного трека при прохождении магнетизированных стальных модулей детектора Baby MIND и определения «energy deposit» – энергии, выделенной мюоном при прохождении модулей детектора.

В рамках работ по созданию и разработки реконструкции событий детектора Baby MIND был разработан программный комплекс «Unpacking», который в данный момент используется для обработки данных для других экспериментов, таких как SuperFGD. Данный программный комплекс позволяет перевод бинарных данных с электроники Baby

MIND FEB в goot, калибровку кремневых фотодиодов, калибровку сигналов сильного и слабого усиления, а также калибровку времени над порогом.

Результатом работы по НИР является разработка программного комплекса Монте-Карло для моделирования событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI. Эффективность реконструкции импульса регистрируемых мюонов в детекторе Baby MIND, согласно результатам моделирования достигает 99% для мюонов с энергией от 1 до 10 ГэВ.

4. Построение уточненного алгоритма оценки массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки Telescope Array. Исследование параметров мюонного избытка по данным наземной решетки Telescope Array.

Исследование массового состава необходимо для анализа моделей рождения, ускорения и распространения космических лучей. Для этих целей требуется высокая точность определения состава в диапазоне энергий, включающих самые высокие энергии, статистика регистрируемых событий на которых достаточно мала. В рамках НИР для исследования массового состава используются данные наземной решетки Telescope Array, собирающей данные более 95% времени. Как следствие, статистика данных наземной решетки выше, чем статистика флуоресцентных и гибридных данных.

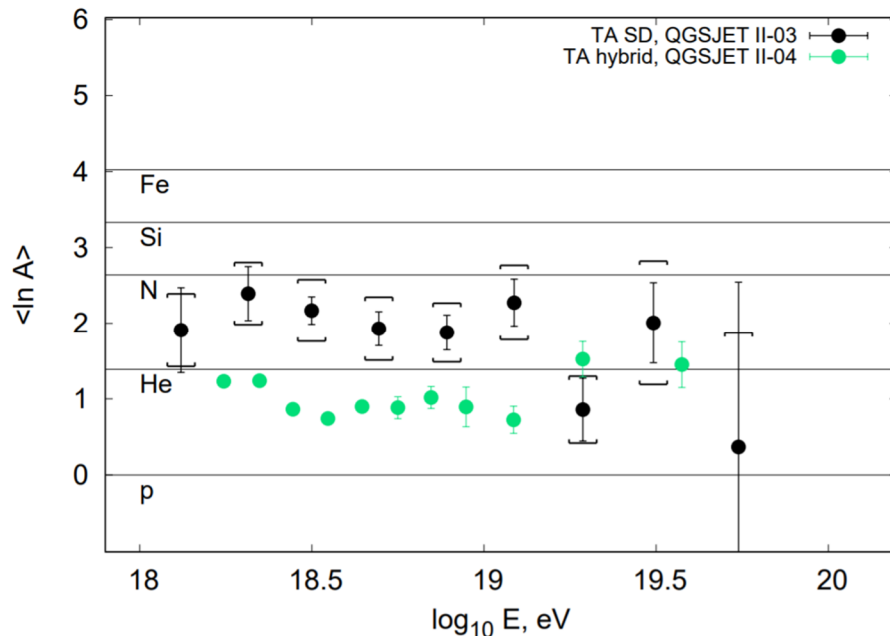


Рис. 5. Средняя атомная масса космических лучей ультравысоких энергий в сравнении с результатами измерений в гибридном режиме. Систематические ошибки показаны квадратными скобками.

В рамках НИР для анализа массового состава космических лучей построен метод, основанный на использовании усиленных деревьев решений. Метод впервые использует исключительно данные наземной решетки эксперимента Telescope Array. Разработана программа для ЭВМ «Программа определения масс первичных частиц космических лучей, регистрируемых в эксперименте Telescope Array (mva_pFe_ds8)».

В результате НИР по данным наземной решетки Обсерватории Telescope Array получена оценка средней массы космических лучей ультравысоких энергий в диапазоне от 10^{18} до 10^{20} эВ. Средняя масса космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array в пределах ошибок не зависит от энергии первичных частиц, и ее среднее значение составляет $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$, рисунок 5.

Результаты обсерватории им. Пьера Оже показали несоответствие между мюонным сигналом, предсказанным адронными моделями и реальным, наблюдаемым экспериментально. Аналогичный результат был получен в экспериментах HiRes/MIA, KASCADE-Grande, NEBOД, SUGAR, а также в эксперименте Telescope Array по данным наземной решетки.

Значительный вклад в наблюдаемое несоответствие модельной и экспериментально наблюдаемой мюонной компоненты могут вносить как высокоэнергетические, так и низкоэнергетические модели адронных взаимодействий. Последние дают основной вклад в сигнал на большом расстоянии от оси ливня, для которого в эксперименте Telescope Array наблюдается наибольший мюонный избыток. Выполнено Монте-Карло моделирование ШАЛ, вызванных первичными протонами и ядрами в условиях установки Telescope Array для трех различных высокоэнергетических адронных моделей (QGSJET II-03, QGSJET II-04, EPOS-LHC) и выполняется моделирование с альтернативной низкоэнергетической моделью UrQMD. Разработана архитектура метода поддетекторного сравнения наблюдаемого сигнала с результатами моделирования, который позволит с большей точностью исследовать зависимость мюонного избытка от энергии и расстояния до оси ШАЛ.

5. Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной.

В рамках НИР использованы сразу несколько современных теоретических методов. Во-первых, для учета нелинейных эффектов формирования галактик была использована полная нелинейная модель статистического смещения. Дело в том, что наблюдаемое в телескоп трехмерное распределение галактик отличается от соответствующего распределения темной материи. Для описания этой разницы была использована наиболее полная модель статистического смещения, которая позволяет описать процесс формирования галактик с помощью введения всевозможных локальных операторов, удовлетворяющих принципу эквивалентности и вращательной симметрии. Коэффициенты перед этими операторами, называемые параметрами смещения, плохо измерены и поэтому выступают в качестве свободных параметров теории. Данный подход имеет строгое теоретическое обоснование и не зависит ни от экспериментальных данных, ни от результатов численного моделирования. Во-вторых, для описания эффектов короткомасштабной динамики, которые находятся за рамками теории возмущений, были использованы современные методы эффективной теории поля. В рамках данного подхода удастся самосогласованно учесть воздействие целого ряда процессов, которые не описываются в рамках гидродинамического приближения (вириализация структур, эффекты барионной физики (звздообразование, активные ядра и другие), “пальцы Бога” и другие). Эти эффекты учтены в виде определенных операторов в эффективном вязком тензоре для темной материи. Вклад каждого оператора, ввиду крайнего разнообразия процессов на малых масштабах, априорно неизвестен и поэтому его также следует рассматривать в качестве свободного параметра теории. В-третьих, для описания неопределенности вычислений в заданном порядке теории возмущений был использован новый подход, основанный на применении матрицы ковариации с теоретической ошибкой. Данный метод позволяет моделировать неопределенность вычислений в рамках теории возмущений с помощью гладкой функции на всем интервале импульсов, что позволяет извлечь максимальное количество космологической информации из нелинейной области.

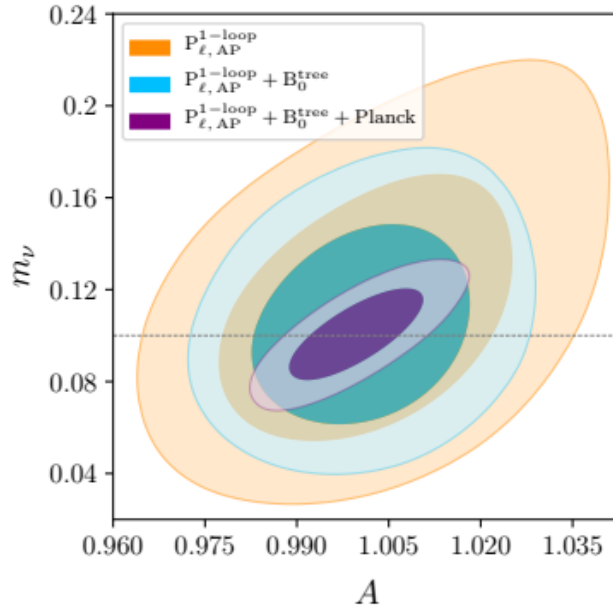


Рис. 6. ограничения в плоскости «масса нейтрино-амплитуда возмущений материи», P1-loop+Btree+Planck – комбинированный анализ «Евклид» и «Планк».

Предложен новый метод обработки данных по крупномасштабной структуре Вселенной будущих глубоких обзоров неба, таких как «Евклид». Сделан прогноз точности изменения космологических параметров и масс нейтрино, которые могут быть достигнуты при использовании предложенного метода. Разработан программный пакет, позволяющий реализовать теоретические вычисления наиболее эффективным способом. Результаты исследования показали, что совместный анализ данных космических обсерваторий «Планк» и «Евклид» с использованием нового метода позволит измерить сумму масс нейтрино с точностью 0.013 электронвольт, что гарантирует детектирование даже минимальной абсолютной массы нейтрино на уровне 5σ , рисунок 6. Полученный результат имеет большое значение для фундаментальной физики в целом, так как определение масс нейтрино из космологических наблюдений будет иметь существенное влияние на экспериментальные и теоретические работы в области физики частиц.

6. Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT.

Было проведено исследование поведения малых возмущений на фоне решения в виде статической, сферически-симметричной кротовой норы в рамках расширенных теорий Хорндески четвертого порядка. В результате получена часть критериев устойчивости для любого статического, сферически-симметричного решения в расширенной теории

Хорндески: условия отсутствия духов и радиальных градиентных неустойчивостей. Для указанного набора критериев предложен явный пример решения в виде проходимой кротовой норы, которое полностью удовлетворяет указанным условиям устойчивости (см. рисунки 7,8).

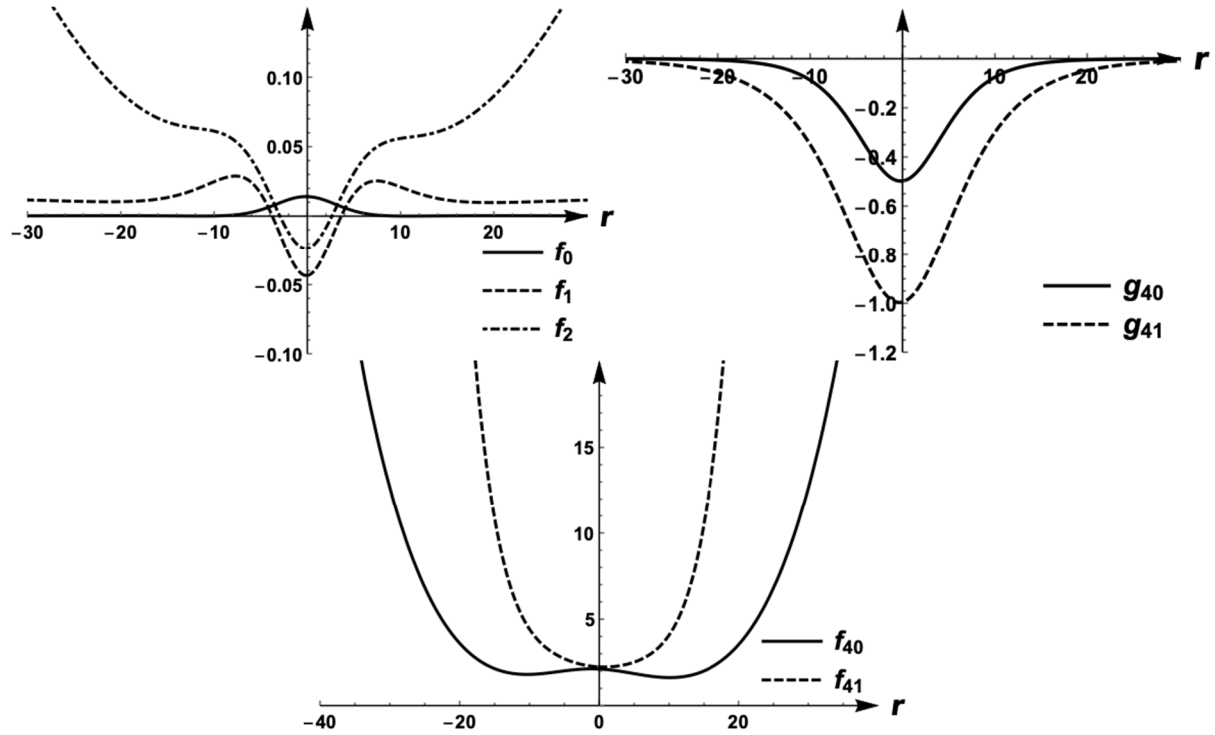


Рис.7. Функции лагранжиана $f_0(r)$, $f_1(r)$, $f_2(r)$, $g_{40}(r)$, $g_{41}(r)$, $f_{40}(r)$ и $f_{41}(r)$, которые допускают решение в виде частично устойчивой статической кротовой норы с горловиной конечного размера.

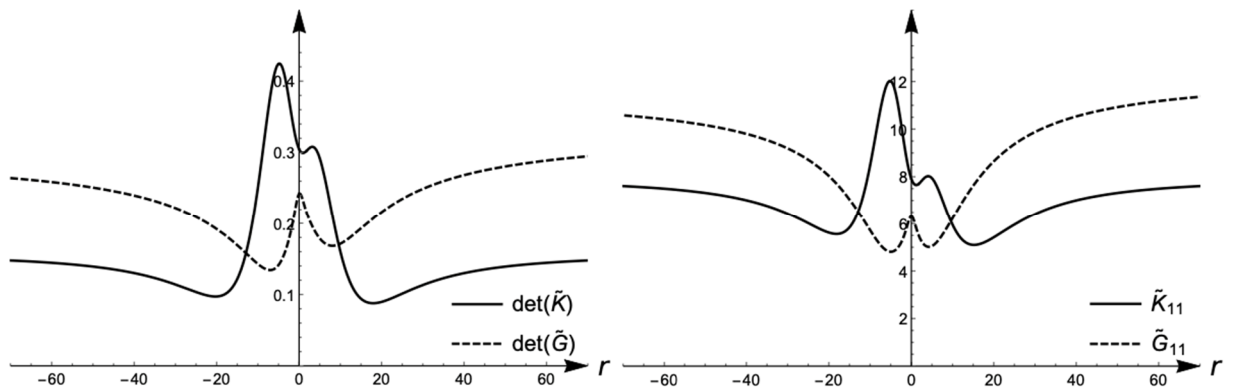


Рис.8. Функции K_{11} , $\det(K)$, G_{11} и $\det(G)$, зависящие от радиальной координаты r и определяющие устойчивость решения в виде кротовой норы в четном секторе возмущений. Графики функций приведены для предложенного примера решения в виде кротовой норы.

Существенной особенностью построенной кротовой норы является ее безмассовость, а также необходимость существенной модификации гравитации асимптотически далеко от горла кротовой норы, что указывает на необходимость дальнейшего усовершенствования предложенного решения.

Кроме этого, для того же класса скалярно-тензорных теорий получены аналитические выражения для недостающих критериев устойчивости сферически-симметричного решения по отношению к угловым градиентам, а также тахионам. Исследование полного набора условий устойчивости является не вполне тривиальным с технической точки зрения, поскольку подразумевает объемные аналитические вычисления. Было явно проверено, удовлетворяет ли уже построенное решение в виде статической кротовой норы данным условиям; показано, что существующее решение подвержено возникновению угловых градиентных неустойчивостей в некоторой области вблизи кротовой норы. Планируется дальнейшее исследование кротовых нор в расширенных теориях Хорндески с учетом полного набора критериев устойчивости, с целью построения конкретного примера решения.

7. Оптимизация точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE.

В детекторе FT0 регистрация сигналов осуществляется 52 фотофотоумножителя на микроканальных пластинах (МКП-ФЭУ). В качестве наиболее подходящего и коммерчески-доступного типа МКП-ФЭУ был определён Planacon XR85002/A1-Q, который, однако, имеет ряд недостатков, вызванных использованием в данных приборах специфичных плат формирования и съёма сигнала и МКП высокого сопротивления. Для выполнения требований к гранулярности, временному разрешению, пределу линейности и габаритам FT0, была разработана обновлённая версия плат формирования и съёма сигнала с данных фотоумножителей, а также разработана спецификация на МКП пониженного сопротивления.

Результаты разработки изменения учтены при производстве партии из 62 (включая 10 запасных) МКП-ФЭУ для использования в FT0, которые получили заводскую модификацию XR85002/FIT-Q. Современная технология производства МКП-ФЭУ не позволяет изготовить такую большую партию приборов с одинаковыми характеристиками, включая такие важные параметры, как коэффициент усиления при заданном напряжении, квантовую эффективность, предел токовой линейности, уровень послеимпульсов и зависимость отклика детектора от величины и направления магнитного поля. Поэтому

данные характеристики были измерены для каждого экземпляра МКП-ФЭУ в специально созданной установке для серийного тестирования.

Для корректной работы МКП-ФЭУ в составе FT0 необходимо определить напряжение питания для достижения заданного ($1,5 \times 10^4$) коэффициента умножения. Кроме того, некоторые параметры МКП-ФЭУ должны быть измерены при более высоком коэффициенте умножения (10^6). Для этого была измерена зависимость заряда сигнала, зарегистрированного каждым МКП-ФЭУ, при его импульсном облучении светом полупроводникового лазера контролируемой интенсивности, от напряжения питания. Затем проводилось измерение среднего числа фотонов в лазерной вспышке однофотоэлектронным методом для пересчёта измеренного ранее заряда сигнала в абсолютную величину коэффициента умножения. В результате, среди всех закупленных ФЭУ был выявлен существенный разброс напряжения питания, необходимого для заданного коэффициента умножения, см. рисунок 9.

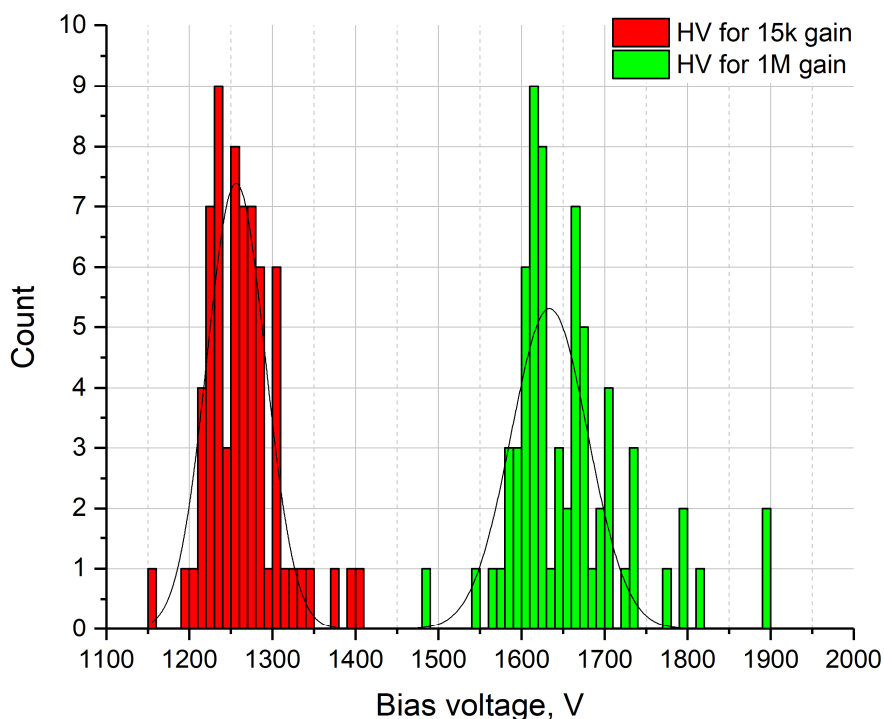


Рисунок 9. Напряжение питания, необходимое для работы каждого протестированного ФЭУ с коэффициентом умножения $1,5 \times 10^4$ и 10^6 .

В наиболее загруженных режимах работы ALICE (например, при свинец-свинцовых столкновениях со средней частотой 50 кГц), загрузка центральных МКП-ФЭУ южного плеча FT0 может достигать 2 мкА/квадрант, что сопоставимо с ожидаемым пределом линейности данных приборов по среднему анодному току. При этом, ожидаемая загрузка МКП-ФЭУ северного плеча – меньше в ~ 3 раза. Поэтому, было проведено измерение предела линейности каждого МКП-ФЭУ по среднему анодному току с целью отбора для

использования в центральной области южного плеча приборов с наиболее широким диапазоном линейности. Типичные кривые насыщения МКП-ФЭУ представлены на рисунке 10 для нескольких МКП-ФЭУ.

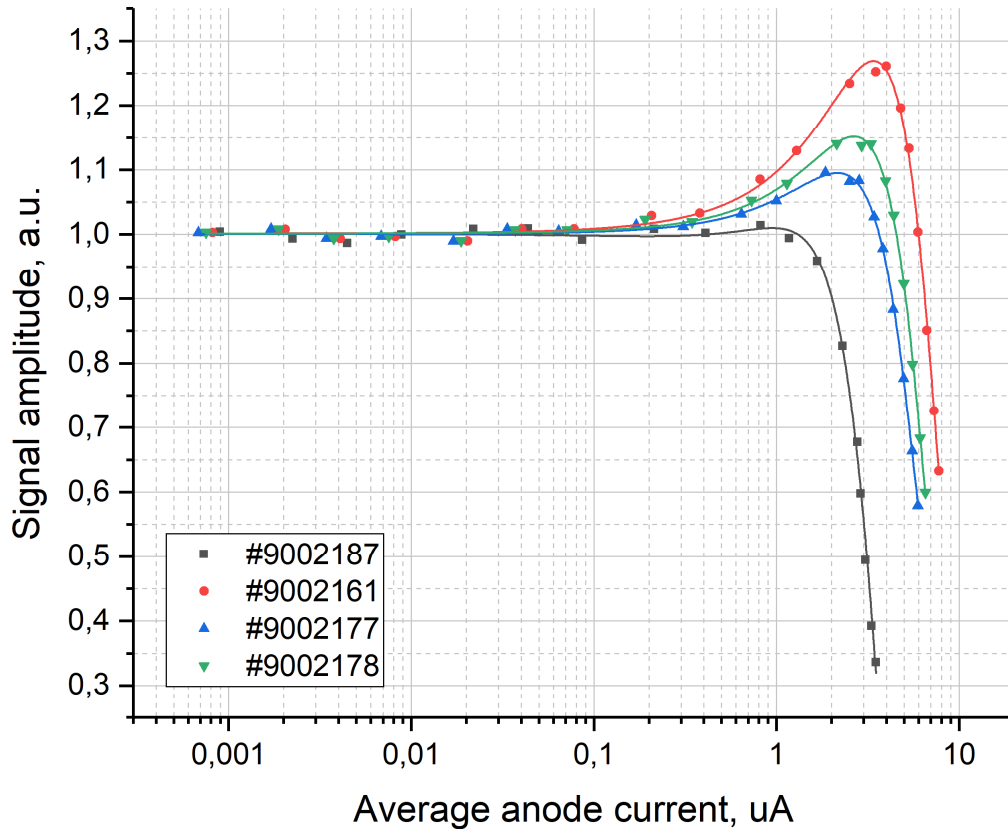


Рисунок 10. Примеры типичных кривых насыщения для четырёх МКП-ФЭУ.

Полученные в рамках НИР результаты были использованы для оптимизации расположения каждого фотоумножителя в составе черенковских сборок, что позволило оптимизировать чувствительность и стабильность работы подсистемы FT0 детектора FIT.

8. Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов.

В рамках НИР выполнена калибровка детектора HADES, см. рисунок 11. Для этого “сырая” амплитуда выходного сигнала каждой ячейки сопоставлялась энергии электрона, попавшего в эту ячейку. Полученная зависимость аппроксимировалась квадратичной функцией. Трекинг электронов и определение их энергии производились с помощью разработанного кода, использующего пакет HYDRA. Положение и ширина пика, соответствующего распаду $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$, определяют энергетическое разрешение детектора ECal, см. рисунок 12. Выход π^0 позволит нормировать сечения рождения других адронов. Использование ECal позволит также регистрировать распады странных гиперонов

с рождением γ -кванта, что расширит возможности всего экспериментального комплекса HADES.

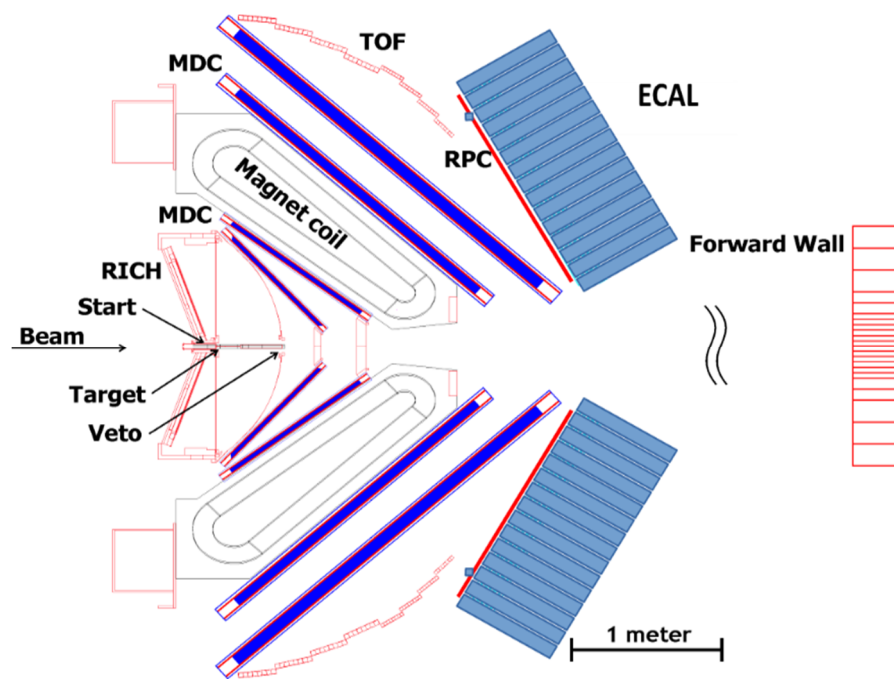


Рис. 11. Схема установки ХАДЕС

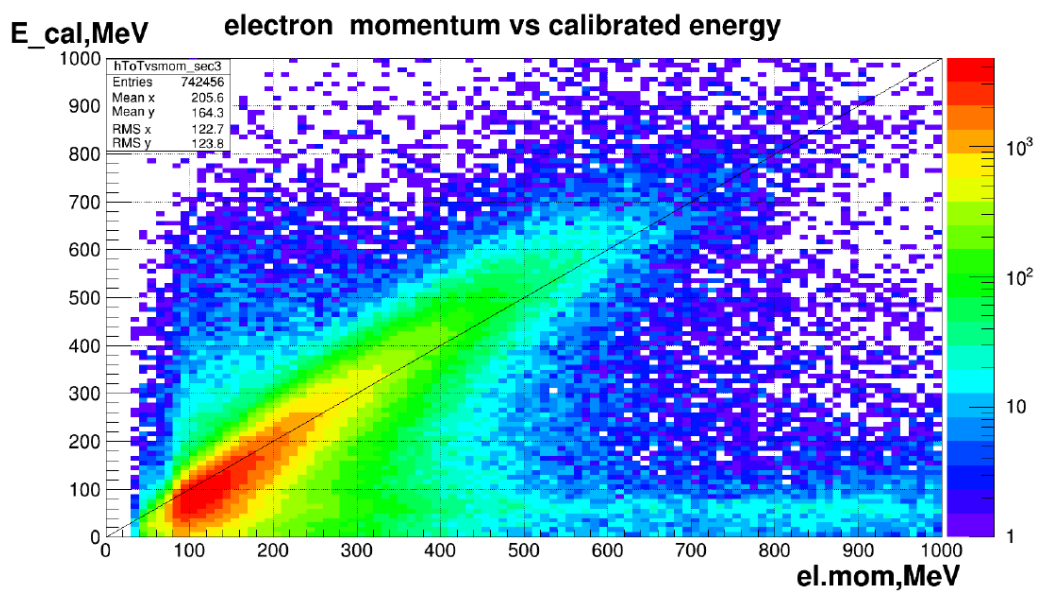


Рис. 12. Амплитудная калибровка детектора ECal.

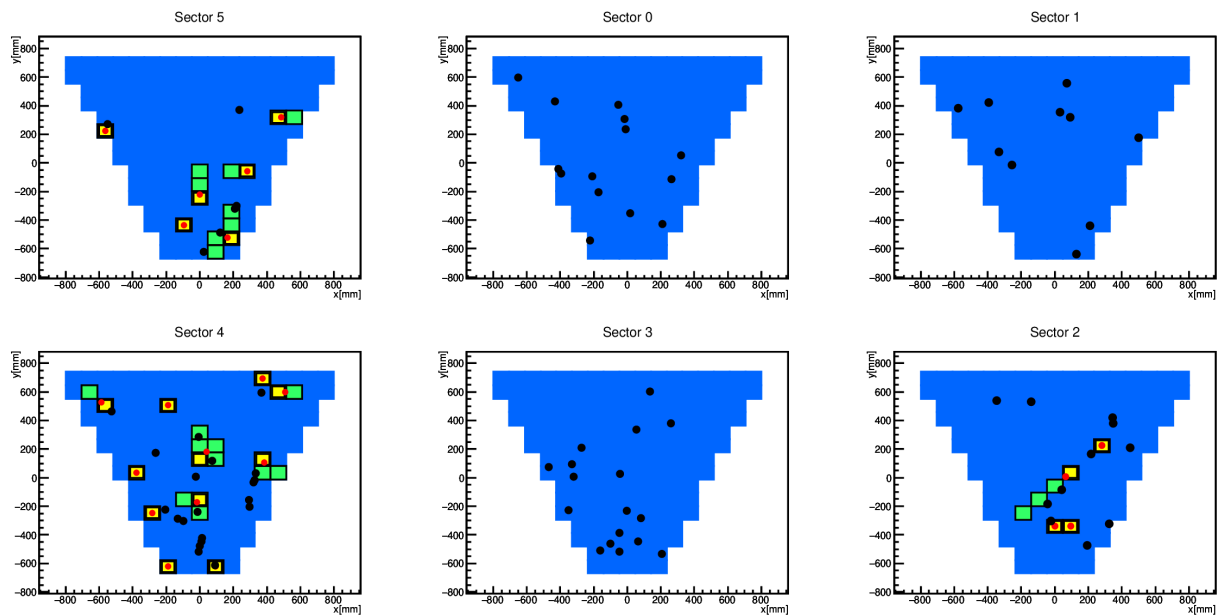


Рис. 13. ECal event display – событийный мониторинг данных с электромагнитного калориметра ECal. Синим фоном обозначена геометрия детектора ECal; черные точки – координаты хитов в детекторе RPC; красные точки – координаты хитов в детекторе ECal; Зеленые квадраты – сработавшие ячейки детектора ECal; желтые квадраты – ячейки с наибольшей амплитудой в кластере.

В марте 2019 г. состоялся первый запуск установки HADES с новым детектором ECal. Получены данные для столкновений ядер Ag+Ag при энергии пучка 1.58 ГэВ и 1.23 ГэВ. Произведена временная и амплитудная калибровка детектора по электронам и позитронам. Для событийной визуализации работы детектора была разработана программа ECal Event Display, см. рисунок 13. С ее помощью отлажен алгоритм поиска кластеров, соответствующих попаданию γ -квантов в детектор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2019 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задачам 4, 5 и 6 вошли в число важнейших достижений Института в 2019 году.

1. Задача «Повышение точности методов реконструкции событий от взаимодействия нейтрино в эффективном объеме детектора Baikal-GVD. Применение методов машинного обучения для повышения эффективности выделения каскадных событий».

Результатом работы является улучшение точности временной калибровки до 2 нс. Получены оценка фона при выделении нейтринных событий, с использованием оповещений от нейтринного телескопа ANTARES. Выполнено Монте-Карло моделирование каскадных событий в условиях телескопа Baikal-GVD и проведена реконструкция данного набора.

2. Задача «Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке. Разработка алгоритма автоматического поиска искажений в амплитудном спектре, зарегистрированном на установке Троицк ню-масс».

Разработан эффективный алгоритм определения наложений и восстановления амплитудных спектров при наборе событий в экспериментах по поиску стерильного нейтрино с большой скоростью счета на основе исследования формы этих событий. Алгоритм позволил проводить эффективное разделение наложенных событий при расстоянии между пиками в 5-6 раз меньше, чем ширина единичного события. разработаны алгоритмы автоматической статистической обработки амплитудных спектров.

3. Задача «Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K».

Разработан программный комплекс Монте-Карло для моделирования событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI. В рамках данного комплекса и эксперимента детектор Baby MIND играет основную роль в качестве намагниченного сегментированного детектора нейтрино. Эффективность реконструкции импульса регистрируемых мюонов в детекторе Baby MIND, согласно результатам моделирования достигает 99% для мюонов с энергией от 1 до 10 ГэВ.

4. Задача «Построение уточненного алгоритма оценки массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки Telescope Array. Исследование параметров мюонного избытка по данным наземной решетки Telescope Array».

В результате НИР по данным наземной решетки Обсерватории Telescope Array получена оценка средней массы космических лучей ультравысоких энергий в диапазоне от 10^{18} до 10^{20} эВ. Средняя масса в пределах ошибок не зависит от энергии первичных частиц, и ее среднее значение составляет $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$. Средняя масса космических лучей впервые измерена с помощью наземной решетки Telescope Array в более широком диапазоне энергий, чем результат традиционного флуоресцентного метода. Разработана программа для ЭВМ «Программа определения масс первичных частиц космических лучей регистрируемых в эксперименте Telescope Array (mva_pFe_ds8)». Выполнено Монте-Карло моделирование ШАЛ, вызванных первичными протонами и ядрами в условиях установки Telescope Array для трех различных высокоэнергетических адронных моделей (QGSJET II-03, QGSJET II-04, EPOS-LHC).

5. Задача «Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной».

Разработан новый метод вычисления теоретических предсказаний для корреляционных функций распределения галактик в слабо-нелинейном режиме, построенный на базе теории возмущений на временных расслоениях. Разработан программный пакет, позволяющий реализовать теоретические вычисления наиболее эффективным способом.

Показано, что совместный анализ данных космических обсерваторий «Планк» и «Евклид» с использованием разработанного метода позволит измерить сумму масс нейтрино с точностью 0.013 электронвольт, что гарантирует детектирование даже минимальной абсолютной массы нейтрино на уровне 5σ .

6. Задача «Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT».

Были впервые получены критерии устойчивости статических, сферически-симметричных решений в расширенной теории Хорндески четвертого порядка. Построен

конкретный пример решения в виде кротовой норы в некотором подклассе расширенной теории Хорндески, которое удовлетворяет части условий устойчивости.

7. Задача «Оптимизация точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE».

Разработана обновлённая версия плат формирования и съёма сигнала с данных фотоумножителей, а также разработана спецификация на многоканальные пластины (МКП) пониженного сопротивления. Обновленная версия плат соответствует требованиям к гранулярности, временному разрешению, пределу линейности и габаритам FT0.

8. Задача «Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов».

В марте 2019 г. состоялся первый запуск установки HADES с новым детектором ECal. Получены данные для столкновений ядер Ag+Ag при энергии пучка 1.58 ГэВ и 1.23 ГэВ. Произведена временная и амплитудная калибровка детектора по электронам и позитронам. Разработана программа ECal Event Display для пособытийной визуализации работы детектора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. D. N. Abdurashitov, A. I. Belev, A. I. Berlev, V. G. Chernov, E. V. Geraskin, A. A. Golubev, G. A. Koroteev, N. A. Likhovid, A. A. Lokhov, A. I. Markin, A. A. Nozik, V. I. Parfenov, A. K. Skasyrskaya, V. S. Pantuev, N. A. Titov, I. I. Tkachev, F. V. Tkachov, and S. V. Zadorozhny, The current status of “Troitsk nu-mass” experiment in search for sterile neutrino. *Journal of Instrumentation*, 10:T10005 (2015).
2. P. T. Komiske, E. M. Metodiev, B. Nachman, and M. D. Schwartz, Pileup Mitigation with Machine Learning (PUMML). *Journal of High Energy Physics*, 12:51 (2017).
3. V. Chaplin, N. Bhat, M. S. Briggs, and V. Connaughton, Analytical modeling of pulse-pileup distortion using the true pulse shape; applications to Fermi-GBM. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 717:21–36 (2013).
4. M. Antonova et al., Baby MIND: A Magnetised Spectrometer for the WAGASCI Experiment, *Proceedings of Prospects in Neutrino Physics (NuPhys2016)*, London, UK, December 12-14 (2016), arXiv:1704.08079
5. R. Laureijs et al. [EUCLID collaboration], Euclid Definition Study Report, arXiv:1110.3193 (2011).

ПУБЛИКАЦИИ

Публикации по задаче 2 «Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке. Разработка алгоритма автоматического поиска искажений в амплитудном спектре, зарегистрированном на установке Троицк ню-масс».

1. Vasily Chernov, Alexander Nozik, Shape-based event pileup separation in Troitsk nu-mass experiment, JINST 14 no.08, T08001 (2019).

Публикации по задаче 3 «Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K».

2. O. Basill, ..., A. Mefodev, ..., et al., Baby MIND Readout Electronics Architecture for Accelerator Neutrino Particle Physics Detectors Employing Silicon Photomultipliers. JPS Conf.Proc. 27 (2019) 011011 (2019).

Публикации по задаче 4 «Построение уточненного алгоритма оценки массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки Telescope Array. Исследование параметров мюонного избытка по данным наземной решетки Telescope Array».

3. R. U. Abbasi, ..., G. Rubtsov, ..., Y. Zhezher, ... et al. (Telescope Array Collaboration), Mass composition of ultrahigh-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector data, Phys. Rev. D 99, 022002 (2019).
4. Y. Zhezher, Study of Muons in Ultra-High-Energy Cosmic-Ray Air Showers with the Telescope Array Experiment, Ядерная физика 82, No. 6, pp. 685–688 (2019).
5. Г.И. Рубцов, Я.В. Жежер, Программа определения масс первичных частиц космических лучей регистрируемых в эксперименте Telescope Array (mva_pFe_ds8), свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №219616396 от 22.05.2019

Публикации по задаче 5 «Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной».

6. A. S. Chudaykin, M. M. Ivanov, Measuring neutrino masses with large-scale structure: Euclid forecast with controlled theoretical error, JCAP V. 2019, No 11, p. 034 (2019).

Публикации по задаче 6 «Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT».

7. S. Mironov, V. Rubakov, V. Volkova. More about stable wormholes in beyond Horndeski theory. Classical and Quantum Gravity, vol. 36, no.13, 135008 (2019).
8. V. Volkova. Searching for Wormholes Beyond Horndeski Theories. Universe, vol.5, no.2, 54 (2019).

Публикации по задаче 7 «Оптимизация точности и быстродействия системы сбора данных черенковской подсистемы детектора FIT для эксперимента ALICE».

9. Yu.A. Melikyan on behalf of ALICE collaboration, Performance of Planacon MCP-PMT photosensors under extreme working conditions, NIM A 952, 161689 (2020).

Публикации по задаче 8 «Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов».

10. A. Shabanov et al., “Calibration of the electromagnetic calorimeter ECal of the HADES experiment”, Journal of Physics: Conference Series, FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop (2019), принято в печать.

ПРИЛОЖЕНИЯ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Baikal-GVD – Байкальский глубоководный нейтринный эксперимент кубокилометрового масштаба

HADES – High Acceptance Di-Electron Spectrometer, спектрометр пар электронов с высокой чувствительностью

KATRIN – Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment, тритиевый эксперимент по исследованию нейтрино в Карслруэ

Planck (Планк) – спутник Европейского космического агентства, регистрирующий реликтовое излучение

WAGASCI –Water Grid Scintillator Detector, детектор взаимодействий нейтрино, основной которого является решетка из чередующихся слоев воды и сцинтиллятора

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

МКП – многоканальные пластины

ОМ – оптический модуль

ф.э. - фотоэлектрон

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель