

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,  
профессор РАН

М.В. Либанов

«31» января 2021 г.

ОТЧЕТ  
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 2020 год, 2 этап)

ФЦП

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

Г.И. Рубцов  
«31» января 2021 г.

Москва 2021г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

 31.01.2021  
подпись, дата

Г.И. Рубцов  
(введение, заключение,  
раздел 4)

Исполнители:

м.н.с.

 31.01.2021

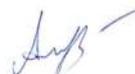
М.Д. Шелепов  
(раздел 1)

м.н.с.

 31.01.2021

В.Г. Чернов  
(раздел 2)

м.н.с.

 31.01.2021

А.В. Мефодьев  
(раздел 3)

м.н.с., к.ф.-м.н.

 31.01.2021

Я.В. Жежер  
(раздел 4)

м.н.с, к.ф.-м.н.

 31.01.2021

А.С. Чудайкин  
(раздел 5)

м.н.с., к.ф.-м.н.

 31.01.2021

В.Е. Волкова  
(раздел 6)

м.н.с., к.ф.-м.н.

 31.01.2021

Ю.А. Меликян  
(раздел 7)

м.н.с.

 31.01.2021

А.И. Шабанов  
(раздел 8)

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 35 с., 17 рис., 0 табл., 11 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 2020 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 высоких энергий астрофизической природы.

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

В работе использован метод измерения зарядов сигналов в диапазоне нелинейного отклика каналов:  $10^2 - 10^5$  ф.э., основанный на сопоставлении сигналов калибруемого канала с сигналами на каналах, удаленных от источника света, для которых выполняется условие линейности. Использован метод разделения мюонных и каскадных срабатываний оптических модулей в событии, использующий времена срабатываний и тот факт, что скорость мюона превышает скорость света в воде.

Результатом работы является разработка нового метода амплитудной калибровки каналов установки в нелинейной области больших амплитуд, и повышение точности восстановления каскадных событий за счет уточнения амплитудной информации. Создана новая база данных мониторинга стабильности триггерных порогов. Впервые из большого набора данных с 2016 по 2019 годы были выделены каскадные события с энергией выше

100 ТэВ – кандидаты на сигнал от астрофизических нейтрино. Был разработан новый метод разделения мюонных и каскадных срабатываний оптических модулей в событии.

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».**

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.

В 2019 году в рамках НИР был построен эффективный алгоритм определения наложений и восстановления амплитудных спектров при наборе событий с большой скоростью счета на основе исследования формы этих событий [1]. Алгоритм впервые позволил проводить эффективное разделение наложенных событий при расстоянии между пиками в 5-6 раз меньше, чем ширина единичного события.

В течение этапа 2020 года на установке Троицк ню-масс осуществлялся набор данных с целью поиска стерильного нейтрино. Были оптимизированы и использованы для анализа данных разработанные на первом этапе проекта алгоритмы для разделения наложений по форме сигнала. Для повышения эффективности сбора увеличенного потока данных был разработан новый сервис набора данных с детекторов установки Троицк ню-масс.

На основе созданных на установке Троицк ню-масс алгоритмов, разработана система контроля для детекторной подсистемы эксперимента babyIAXO в DESY.

## **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.

В 2020 году был закончен первый физический набор данных детектора Baby MIND. В результате анализа первого набора данных детектора Baby MIND получены спектры регистрируемых нейтрино и улучшен программный комплекс Монте-Карло для моделирования событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI.

#### **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».**

Объектом исследования являются космические лучи с энергиями выше  $10^{18}$  эВ.

Цель работы – изучение пространственного распределения массы событий наземной решетки эксперимента Telescope Array по наблюдаемой части неба. Наиболее интересным с точки зрения источников и механизмов рождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) является исследование пространственного распределения протонных событий, поскольку протоны с энергиями выше  $10^{19.5}$  эВ, не приходящие из Галактического центра, слабо отклоняются в магнитных полях и могут указывать на источники космических лучей. Для классификации событий используется метод усиленных деревьев решений [3], который позволяет выделить протонные события в наборе.

Результатом работы являются полные карты неба, описывающие кластеризацию протонных событий в данных наземной решетки эксперимента Telescope Array при помощи статистики Ли-Ма.

Результаты могут быть использованы для поиска источников КЛУВЭ и исследования механизмов их рождения.

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

На этапе 2019 года были разработаны методы оценки массы нейтрино и нейтринной иерархии масс по данным крупномасштабной структуры [4]. На данном этапе НИР, разработанные методы получили дальнейшее развитие и возможности новых применений. Объектом исследования являются модели модифицированной темной энергии и пространственная кривизна Вселенной.

Цель работы – получение ограничений на параметры моделей модифицированной темной энергии и пространственную кривизну Вселенной из данных крупномасштабной структуры Вселенной.

Разработан новый модуль CLASS-PT, реализующий теоретические вычисления на базе космологической теории возмущений наиболее эффективным образом. Помимо однопетлевого вычисления двухточечных корреляционных функций новый код использует самосогласованную теоретическую модель для аккуратного описания нелинейной эволюции барионных акустических колебаний, а также задействует методы

эффективной теории поля для описания сложных процессов на космологически малых масштабах.

Получены новые сильные ограничения на пространство параметров моделей с модифицированной темной энергией и пространственную кривизну Вселенной по данным крупномасштабной структуры Вселенной. Измерения были произведены без привлечения данных по микроволновому излучению, однако точности измерения космологических параметров этими двумя независимыми методами оказались сопоставимыми. Результаты исследования свидетельствуют о справедливости стандартной космологической модели.

## **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 сценарием 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 космологического решения наиболее общего вида в рамках расширенных теорий Хорндески с добавлением дополнительной материи. В результате были получены условия устойчивости космологического фона в такого типа мультикомпонентных системах, а также отдельно исследован вопрос о возможном наличии возмущений, распространяющихся со скоростями, превышающими скорость света.

Было впервые показано что, если в качестве дополнительной материи выбрать скалярное поле, чья скорость звука, равна скорости света, скорость распространения одной из скалярных мод системы неизбежно превысит скорость света. Указанный результат справедлив для любого стабильного космологического фона, а также расширенной теории Хорндески наиболее общего вида.

Полученный результат может быть применен за рамками задач, касающихся несингулярных космологических сценариев типа «отскока» или «генезиса» в скалярно-тензорных теориях, и подразумевает новые ограничения на лагранжиан теории при условии требования субсветовых скоростей для всех возмущений.

## **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.

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

В результате НИР измерено отклонение уровня насыщения в магнитном поле индукцией 0,2 и 0,5 Т МКП-ФЭУ для использования в подсистеме FT0-A детектора FIT. Обнаружена корреляция между отклонением уровня насыщения и положением максимума зависимости усиления МКП-ФЭУ от угла наклона в магнитном поле. Продемонстрирована стабильность быстродействия МКП-ФЭУ в магнитном поле при любом уровне загрузки вне области глубокого насыщения. Полученные результаты позволили оптимизировать расположение МКП-ФЭУ в матрице южного плеча детектора FIT для наилучшей чувствительности детектора в условиях высоких нагрузок свинец-свинцовых столкновений в эксперименте ALICE.

#### **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 Escal, созданный в сотрудничестве ИЯИ с чешской группой.

В рамках НИР была произведена более точная амплитудная калибровка детектора Escal по данным 2019 года, и с новой калибровкой построен спектр инвариантной массы дифотонов. Более точная калибровка не дала объяснения наблюдаемому ранее избытку пар фотонов в области инвариантных масс менее 100 МэВ.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ .....	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
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.....	14
2. Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке.....	17
3. Разработка реконструкции событий, восстановления энергии и заряда частицы в эксперименте Baby MIND для J-PARK и T2K.....	17
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.....	19
5. Исследование массы нейтрино и нейтринной иерархии масс из крупномасштабной структуры в нелинейном режиме по данным планируемых экспериментов по измерению крупномасштабной структуры Вселенной.....	21
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.....	25
8. Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов.....	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	33
ПУБЛИКАЦИИ.....	34
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	35
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	35

## **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. В апреле 2020 года развернуты и введены в эксплуатацию шестой и седьмой кластеры. С их вводом эффективный объем телескопа достиг значения 0.35 км<sup>3</sup> в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Установка содержит в своем составе 2016 глубоководных детекторов черенковского света и работает в режиме постоянной регистрации и накопления данных.

### **2. Задача «Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке.»**

Одной из основных сложностей при поиске стерильных нейтрино с массой до 5 кэВ в эксперименте Троицк ню-масс 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.

В 2019 году в рамках НИР был построен эффективный алгоритм определения наложений и восстановления амплитудных спектров при наборе событий с большой скоростью счета на основе исследования формы этих событий [1]. Алгоритм впервые позволил проводить эффективное разделение наложенных событий при расстоянии между пиками в 5-6 раз меньше, чем ширина единичного события.

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

В 2020 году завершен первый физический набор данных эксперимента Baby MIND [2] 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 Baby MIND 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 событий эксперимент Baby MIND и проведения Монте-Карло моделирования.

### **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».**

Ряд астрофизических моделей рождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) предсказывает наличие анизотропии распределения массового состава первичных частиц.

Массовый состав является одной из измеряемых характеристик для регистрируемых широких атмосферных ливней (ШАЛ), однако, в силу больших флуктуаций ШАЛ и неопределенностей адронных моделей, которые используются в моделировании и интерпретации экспериментальных данных, невозможно определить массу первичной частицы для каждого ШАЛ, а лишь усредненное значение по ансамблю событий. Усреднение проводится по некоторому параметру, чувствительному к массе первичных частиц, который также может быть использован напрямую для исследования

его пространственного распределения по наблюдаемой части неба на предмет “пятен”, которые указывают на преобладание легких или тяжелых КЛ в определенном направлении.

**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. Кроме того, метод позволяет получить ограничения на параметры моделей модифицированной темной энергии и пространственную кривизну Вселенной, не зависящие от данных по реликтовому излучению.

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

Скалярно-тензорные теории модифицированной гравитации, такие как теории Хорндески и их расширения, обладают несомненной эффективностью при изучении и моделировании различных космологических решений, в том числе таких сценариев без начальной сингулярности как, например, Вселенная с «отскоком» или «генезисом». В литературе широко обсуждался и получил свое разрешение вопрос устойчивости моделируемых решений по отношению к таким патологическим степеням свободы как духи и градиентные неустойчивости. Однако, отдельного анализа требует случай, когда

помимо скалярного поля галилеона в системе есть дополнительная материя, например, радиация или пыль. Учет влияния такой дополнительной материи на устойчивость конструируемого космологического решения позволит использовать уже разработанные космологические модели для описания реалистичных сценариев в ранней Вселенной. Основной целью исследования являлся анализ поведения малых возмущений над произвольным космологическим фоном в системе расширенной теории Хорндески и стандартного скалярного поля, чья скорость звука равна скорости света. В качестве результата исследования планировалось получить критерии устойчивости космологического фона в наиболее общем случае таких скалярно-тензорных теорий, а также сформулировать условия отсутствия возмущений, распространяющихся со скоростями, превышающими скорость света.

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

В ходе третьего и четвертого 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.

Регистрация свинец-свинцовых столкновений с энергией  $\sqrt{s}=14$  ТэВ и частотой до 50 кГц может привести к работе МКП-ФЭУ черенковской подсистемы южного плеча детектора FIT (FT0-A) со средними анодными токами до 2 мкА/квадрант. Согласно проведённым ранее исследованиям (отражены в отчёте за прошлый год), эта величина – в 1,5-3 раза ниже предела насыщения МКП-ФЭУ, закупленных для использования в детекторе FIT. Однако, реальный режим работы эксперимента ALICE предусматривает использование сильного магнитного поля индукцией до 0,5 Т. Данные о влиянии сильного магнитного поля на предел насыщения МКП-ФЭУ в литературе отсутствуют, но могут быть получены в ходе специализированных измерений. Оптимизация чувствительности и быстродействия детектора FIT, в особенности подсистемы FT0-A, подверженной более высоким нагрузкам, невозможна без информации об отклонении предела насыщения и изменении временных характеристик МКП-ФЭУ в сильном магнитном поле. Поэтому, такие измерения были проведены для 34 МКП-ФЭУ Planacon XP85002/FIT-Q, 24 из которых будут установлены в FT0-A.

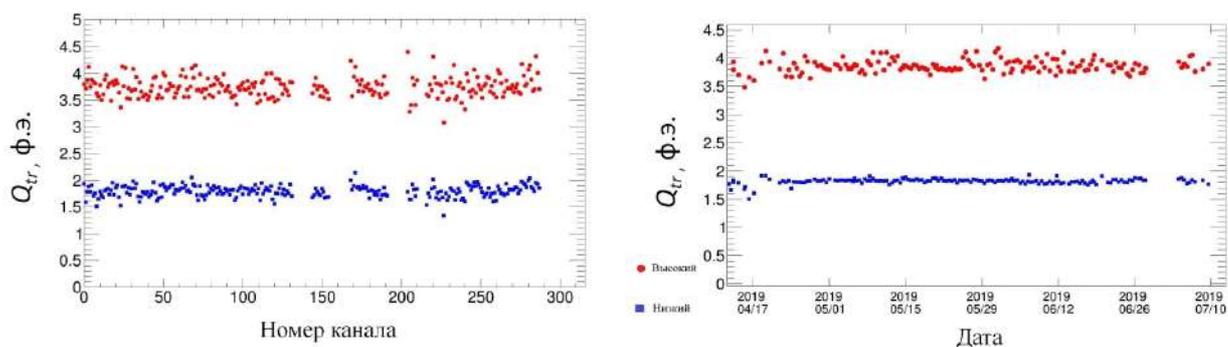
#### **8. Задача «Разработка методов анализа данных эксперимента HADES с целью определения выхода нейтральных мезонов».**

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  $\gamma$ -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.

В марте 2019 г. состоялся первый запуск установки HADES с новым детектором ECal, в результате которого получены данные для столкновений ядер Ag+Ag при энергии пучка 1.58 ГэВ и 1.23 ГэВ.

# 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.

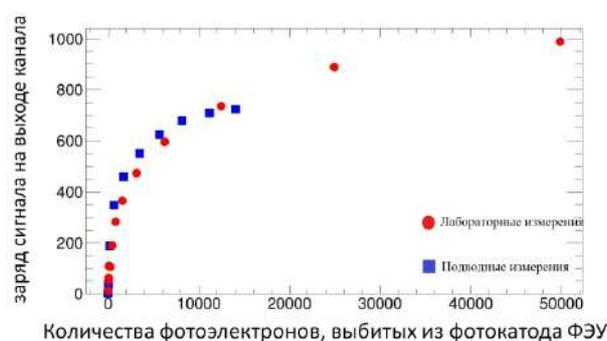
Ключевыми параметрами системы сбора данных установки являются триггерные пороги каналов, которые определяют эффективность регистрации физических событий. Триггерным условием является срабатывание пары соседних каналов с “высоким”  $\sim 4$  фотоэлектрона (ф.э.) и “низким”  $\sim 2$  ф.э. порогами. При выполнении этого условия производится считывание данных со всех каналов кластера. Для контроля стабильности порогов была создана база данных, в которую входят значения высокого и низкого порогов для каждого канала и каждого сеанса набора данных. В левой части рисунка 1 представлены значения порогов  $Q_{tr}$  для всех каналов одного кластера, полученных по данным одного сеанса набора данных. В правой части рисунка 1 показана зависимость порога от времени для одного измерительного канала.



*Рис.1 Значения высокого и низкого триггерных порогов каналов одного кластера (слева), и пример зависимости порогов для одного канала от времени (справа)*

Для восстановления энергии каскадных ливней высокой энергии требуется измерять заряды сигналов в диапазоне нелинейного отклика каналов:  $10^2 - 10^5$  ф.э. Для градуировки каналов в нелинейной области применяются два различных метода. Первый метод, основанный на использовании двух светодиодов для последовательного удвоения светового потока и регистрации соответствующего отклика ОМ, применяется в лабораторных условиях, однако он не позволяет проводить проверку градуировки во время работы установки. Поэтому был разработан второй метод, позволяющий проводить зарядовую градуировку в режиме подводного функционирования установки. Второй метод основан на сопоставлении сигналов калибруемого канала с сигналами на каналах,

удаленных от источника света, для которых выполняется условие линейности. Для реализации данного метода был разработан программный алгоритм. В условиях подводного эксперимента проводится специальный калибровочный сеанс. Во время сеанса на каждом оптическом модуле светодиоды запускаются с различными интенсивностями излучения, засвечивая вышестоящие модули. Таким образом формируется набор зарядов – откликов каналов в области нелинейности на близком к светодиоду модуле и соответствующий ему набор в области линейности на удаленных модулях. Информация о том, во сколько раз повысился заряд в области линейности позволяет рассчитать коэффициент увеличения заряда в нелинейной области и сопоставить с регистрируемым сигналом. На рисунке 2 представлены примеры градуировки выборочных каналов установки, полученных обоими методами.



*Рис.2 Примеры зарядовых градуировочных кривых каналов, измеренных в лаборатории (красный) и под водой (синий)*

В течение 1364 дней эффективного набора данных в период с 2016 по 2019 годы на нейтринном телескопе Baikal-GVD было зарегистрировано  $6,34 \cdot 10^9$  событий. После процедуры восстановления ливневых событий и наложения ограничений на количество сработавших каналов в событии больше 10 и на энергию ливня больше 10 ТэВ, была создана база данных, в которую вошли 2704 восстановленных события. Для подавления фона от групп мюонов, засветка от которых может быть похожа на засветку от ливня при небольшом количестве сработавших модулей, было наложено ограничение на количество сработавших модулей больше 20 (рисунок 3 слева). Учитывая два экспериментальных факта: 1) спектр атмосферных мюонов падает с энергией как  $E^{-2.7}$ ; 2) измеренный на телескопе IceCube спектр астрофизических событий с энергией выше 60 ТэВ имеет меньший наклон (индекс  $-2.46$ ); в выделенных нами событиях в качестве кандидатов на астрофизические нейтринные события выбирались те, энергия которых выше 100 ТэВ. Из

рисунка 3 справа видно, что спектр событий Baikal-GVD находится в хорошем согласии со спектром IceCube для энергий выше 100 ТэВ.

После наложения ограничения на энергию, в качестве кандидатов осталось 13 событий. На последнем этапе проверялась гипотеза рождения каскада не в процессе реакции астрофизического нейтрино, а в процессе реакции атмосферного мюона. В данном случае излучение от каскада и трека мюона распространяются одновременно. Поскольку скорость мюона превышает скорость света в воде, излучение от мюона может быть зарегистрировано раньше излучения от каскада при условии достаточного удаления точки рождения каскада от сработавших модулей.

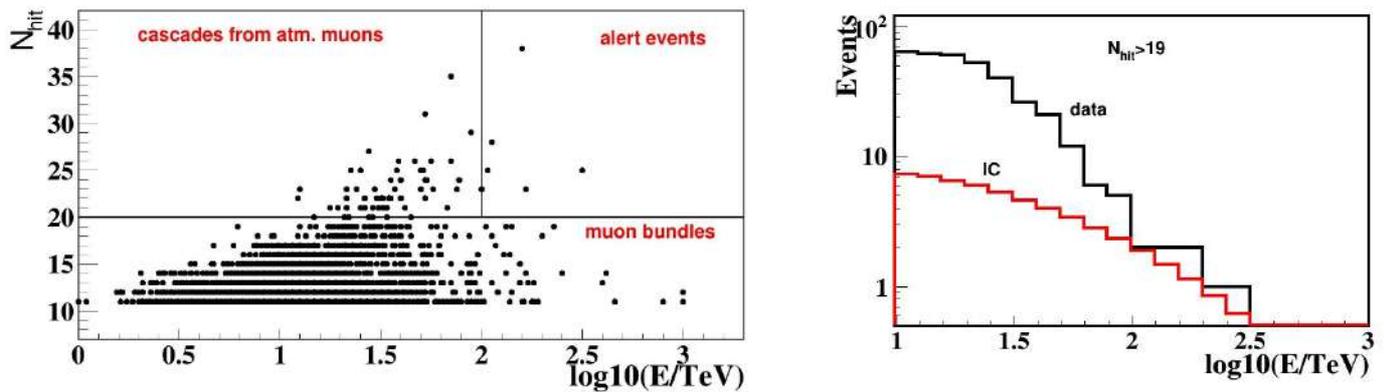


Рис. 3 Распределение восстановленных событий по количеству сработавших каналов и по энергии (слева). Спектры событий Baikal-GVD и IceCube (справа).

Для проверки отобранных кандидатов на наличие сопутствующего мюона был разработан программный алгоритм. Для каждого сработавшего канала проводится расчет ожидаемого времени засветки от каскада и от трека мюона. Затем время каждого импульса на канале сравнивается с ожидаемыми. Если для какого-нибудь импульса разница между зарегистрированным и ожидаемым временем от каскада превышает 20 нс, а между зарегистрированным и ожидаемым от мюона менее 20 нс, то такой импульс свидетельствует о наличии мюона в событии. В результате данного анализа в семи событиях были обнаружены импульсы, удовлетворяющие мюонному условию. Таким образом, в качестве кандидатов на события от астрофизических нейтрино из 13 событий было выделено 6.

По результатам работы опубликована статья №1 в списке публикаций.

## **2. Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк ню-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке.**

На первом этапе выполнения НИР в 2019 году выполнено Монте-Карло моделирование сигнала и шума установки Троицк ню-масс. Был построен эффективный алгоритм определения наложений и восстановления амплитудных спектров при наборе событий с большой скоростью счета на основе исследования формы этих событий [1]. Алгоритм впервые позволил проводить эффективное разделение наложенных событий при расстоянии между пиками в 5-6 раз меньше, чем ширина единичного события.

В течение этапа 2020 года на установке Троицк ню-масс осуществлялся набор данных с целью поиска стерильного нейтрино. Были оптимизированы и использованы для анализа данных разработанные на первом этапе проекта алгоритмы для разделения наложений по форме сигнала. Для повышения эффективности сбора увеличенного потока данных был разработан новый сервис набора данных с детекторов установки Троицк ню-масс.

На основе созданных на установке Троицк ню-масс алгоритмов, разработана система контроля для детекторной подсистемы эксперимента babyIAXO в DESY, включающая в себя средства записи данных, администрирования и визуализации. Проведено успешное тестирование системы в локальном режиме работы.

В 2020 году была защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (В.Г. Чернов).

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

В 2020 году был завершен первый физический набор данных для детектора Baby MIND. Восстановление событий детектора Baby MIND позволило определить заряд и импульсы частиц, исходящих из мишени WAGASCI. В рамках работ по анализу данных, полученных в ходе первого физического набора данных, была произведена синхронизация детекторов Baby MIND, WallMRDs (wall muon range detectors) и мишени WAGASCI. Анализ данных подтвердил эффективность набора данных детектором Baby MIND на уровне 99%, что является результатом применения ряда разработанных алгоритмов. На рисунке 4 показана схема размещения мишени WAGASCI и детекторов Baby MIND, WallMRD, а на рисунке 5 пример события, зарегистрированного этими детекторами.

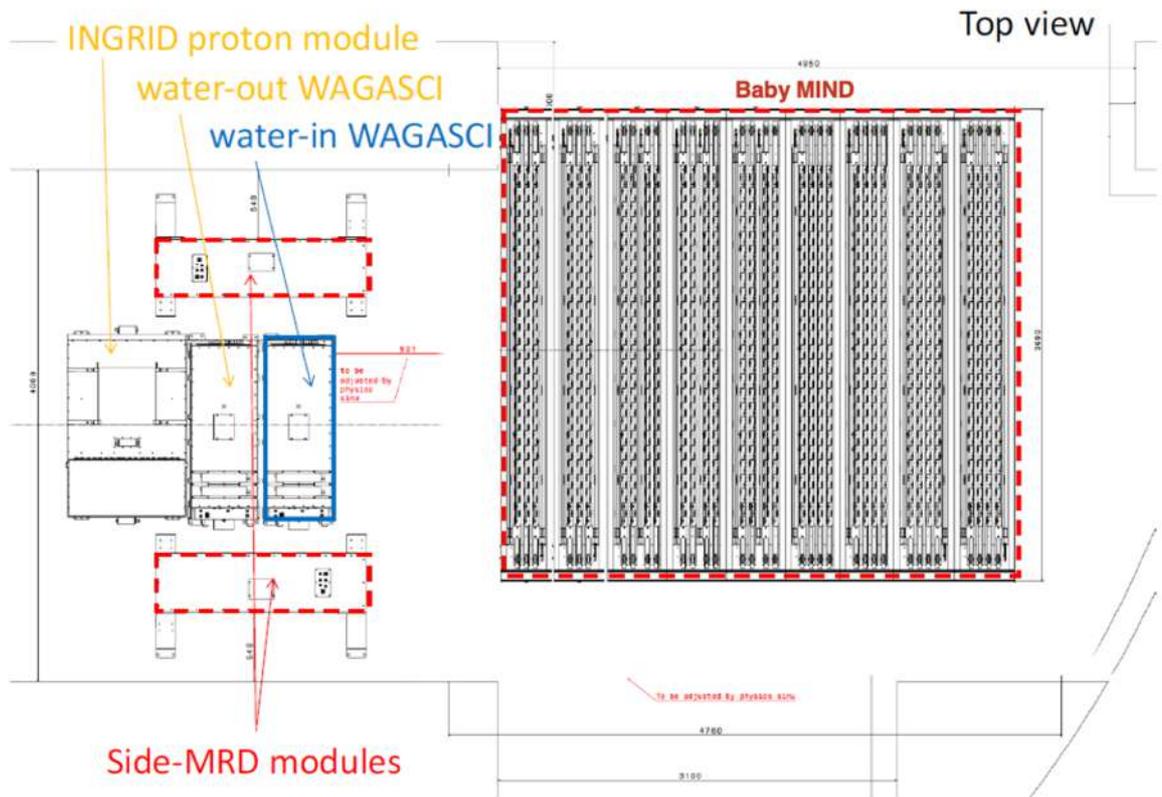
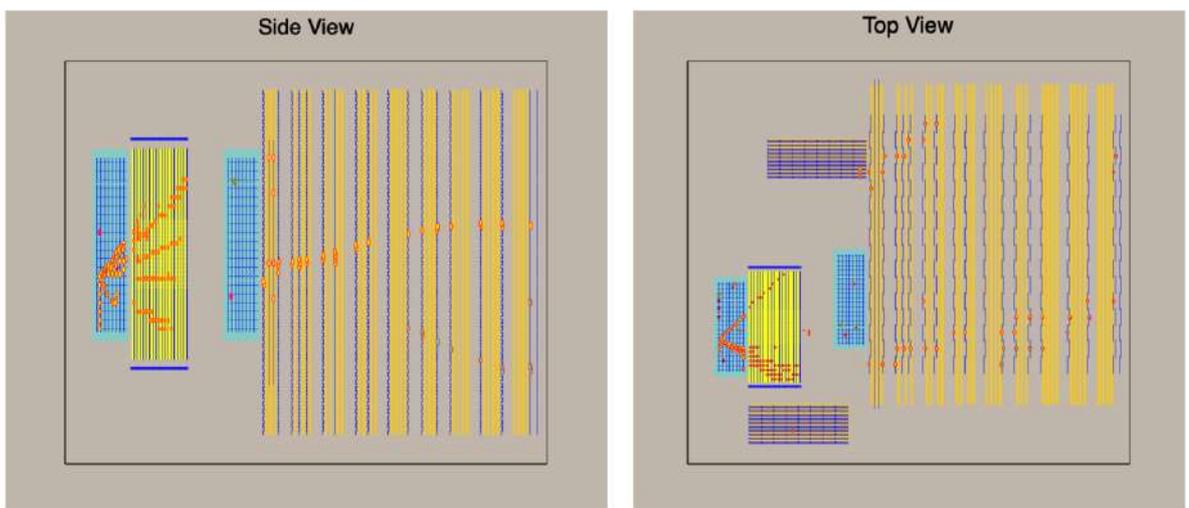


Рис. 4. Схема расположения детекторов WallMRDs, Baby MIND, Proton module и мишени WAGASCI на этаже B2 шахты ND280.



**2020/01/30 Thu 02:35:01**  
**WAGASCI spill number 3978**

Рис. 5. Пример события, зарегистрированного в мишени WAGASCI, WallMRDs и Baby MIND.

В результате анализа данных были получены спектры регистрируемых нейтрино и улучшен программный комплекс Монте-Карло для моделирования событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI. Произведено сопоставление временных вычислений на электронике Baby MIND с амплитудными. Данное сопоставление позволило оптимизировать калибровку времени над порогом и амплитуды.

Полученные данные и программные коды позволили произвести оптимизацию прошивки электроники Baby MIND, что используется и было использовано в ходе разработки электроники следующего поколения на базе чипа CITIROC.

По результатам работы опубликована статья №2 в списке публикаций.

#### **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 анизотропии пространственного распределения космических лучей (КЛ) является важным инструментом для поиска источников и механизмов рождения КЛ. Однако, помимо этого, ряд астрофизических моделей рождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) предсказывает также и наличие анизотропии распределения массового состава первичных частиц.

Массовый состав является одной из измеряемых характеристик для регистрируемых широких атмосферных ливней (ШАЛ), однако, в силу больших флуктуаций ШАЛ и неопределенностей адронных моделей, которые используются в моделировании и интерпретации экспериментальных данных, невозможно определить массу первичной частицы для каждого ШАЛ, а лишь усредненное значение по ансамблю событий.

В коллаборации Telescope Array разработан метод исследования массового состава, основанный на анализе данных наземной решетки эксперимента [4]. В нем набор из 16 переменных, чувствительных к составу первичных частиц, преобразуется в переменную  $\xi$ , которая непосредственно используется для усреднения по ансамблю событий и определения средней атомной массы  $\langle \ln A \rangle$ .

В рамках НИР предложен метод исследования анизотропии массового состава КЛ, использующий параметр  $\xi$  как массовую характеристику широких атмосферных ливней (ШАЛ) и изучающий его распределение по наблюдаемой части неба.

Проведено изучение чувствительности параметра  $\xi$  к анизотропии массового состава первичных частиц. Для этого были созданы наборы модельных Монте-Карло событий:

набор, соответствующий изотропному распределению событий со средней атомной массой, определенной в предыдущих работах коллаборации [4], и наборы, имеющие “легкое” или “тяжелое” пятно на высоких энергиях, аналогичное “горячему пятну”, наблюдаемому в эксперименте Telescope Array.

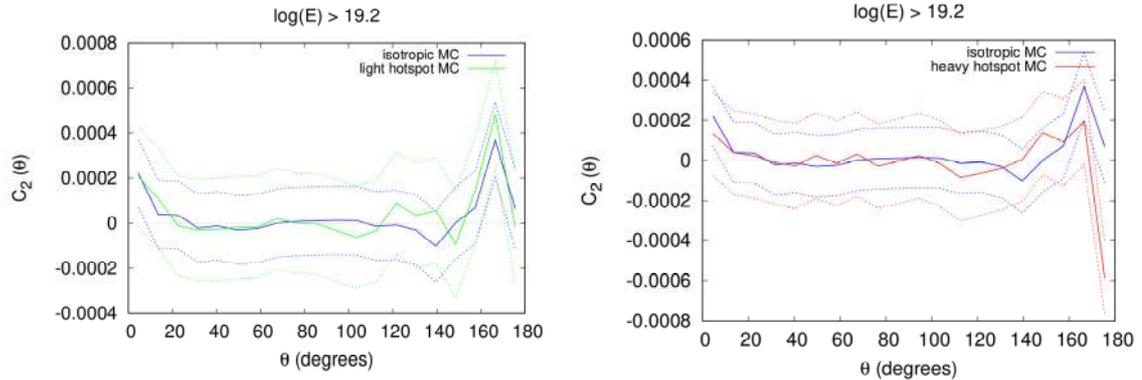


Рис. 6. Сравнение двухточечной корреляционной функции для изотропного распределения событий (синяя линия) с набором событий с “легким” пятном (зеленая линия, слева) и с “тяжелым” пятном (красная линия, справа).

Сравнение проводилось одномерным способом, по распределению среднего параметра  $\xi$  по прямому восхождению, а также двумерными методами — путем сравнения двухточечных корреляционных функций и параметра  $\xi$ , усредненного по ограниченным участкам неба в пикселизации HEALPix (рисунок 6). Было показано, что сравнение пикселизованных карт является чувствительным к наличию “пятен” в распределении событий.

Также, в рамках НИР было исследовано пространственное распределение “протоноподобных” событий в данных наземной решетки эксперимента Telescope Array. Распределение параметра  $\xi$  позволяет найти значение  $\xi_{\text{cut}}$ , которое отделяет события, наиболее вероятным происхождением которых являются первичные протоны, в предположении, что фон состоит из событий, инициированных ядрами железа. События со значениями  $\xi < \xi_{\text{cut}}$  будем называть протоноподобными.

Наличие “пятен” в распределении протоноподобных событий с различными энергиями изучалось при помощи усреднения по областям неба радиусом  $20^\circ$  и сравнением с изотропным распределением с использованием статистики Ли-Ма, которая является общепринято используемым методом в изучении анизотропии пространственного распределения космических лучей (рисунок 7).

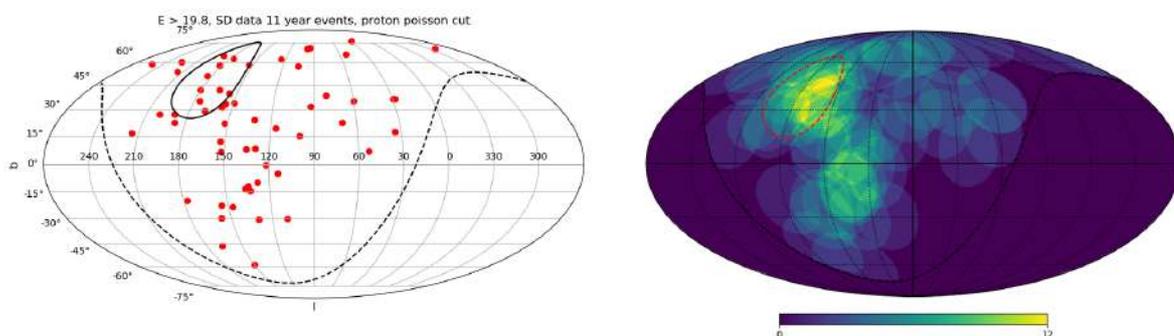


Рис. 7. Распределение протонных событий, выделенных в данных наземной решетки эксперимента Telescope Array с энергиями выше  $10^{19.8}$  эВ. Слева: распределение событий, каждое событие показано красной точкой. Справа: усреднение количества событий по области неба радиусом  $20^\circ$ .

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

Разработан программный код CLASS-PT, позволяющий систематически производить вычисления в рамках космологической теории возмущений. Данный модуль использует самосогласованную теоретическую модель для описания формирования структур в слабо-нелинейном режиме. В первую очередь, реализовано вычисление однопетлевой двухточечной корреляционной функции материи/галактик в рамках эйлеровой стандартной теории возмущений. Во-вторых, используются методы эффективной теории поля для описания отклонений от динамики идеальной жидкости на малых масштабах. В-третьих, точное описание нелинейной эволюции барионных акустических осцилляций осуществлено посредством процедуры инфракрасного пересуммирования приливных эффектов крупномасштабных потоков. В-четвертых, теоретическая модель включает в себя самосогласованное вычисление эффектов искажений пространства красных смещений и Алко-Пачинского, которые необходимы

для обработки данных крупномасштабной структуры.

Уникальность разработанного кода заключается в высокой скорости вычислений. Это стало возможным благодаря реализации передовой технологии, которая позволяет вычислять все петлевые интегралы всего один раз. Суть метода заключается в разложении линейного спектра мощности по степеням  $k$  с помощью пакета быстрого преобразования Фурье (FFTL<sub>og</sub>) с последующим перемножением единожды посчитанной матрицы на столбцы Фурье-разложения с помощью библиотеки OpenBLAS. В результате все петлевые интегралы для заданного набора космологических параметров вычисляются в среднем за 1 секунду (рисунок 8). Данный результат впервые позволил применить анализ Монте-Карло марковских цепей для исследования многомерного распределения космологических параметров.

Код CLASS-PT может быть использован ведущими коллаборациями для исследования предстоящих данных крупномасштабной структуры Вселенной (DESI, Euclid) уже в ближайшее время.

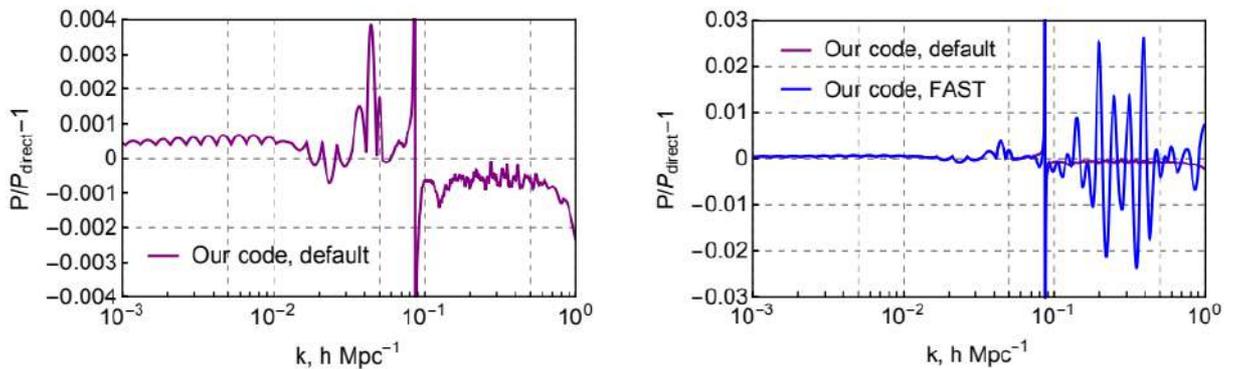


Рис. 8. Относительная ошибка вычисления однопетлевого спектра мощности материи с помощью модуля CLASS-PT в обычном режиме (default) и ускоренном режиме (FAST).

Получены новые независимые от реликтового излучения ограничения на параметры динамической темной энергии и пространственную кривизну Вселенной (рисунок 9). В качестве космологических данных использовался полный каталог галактик Слоановского цифрового обзора неба, каталог сверхновых, а также карты с распределением квазаров и облаков нейтрального водорода. Проведенный анализ полностью независим от данных реликтового излучения. В то же время ограничения на параметры модифицированной темной энергии оказались сопоставимыми с соответствующими измерениями обсерватории Планк. В результате исследования была подтверждена справедливость стандартной космологической модели. Однако амплитуда

линейных возмущений плотностей материи оказалось меньше соответствующего оценки обсерватории Планк, что в целом согласуется с другими измерениями крупномасштабной структуры Вселенной (слабое линзирование, функция масс скоплений галактик).

Новые независимые ограничения на параметр Хаббла могут пролить свет на природу Хаббловского кризиса в космологии (несоответствие между измерениями параметра Хаббла в локальной Вселенной и по данным реликтового излучения).

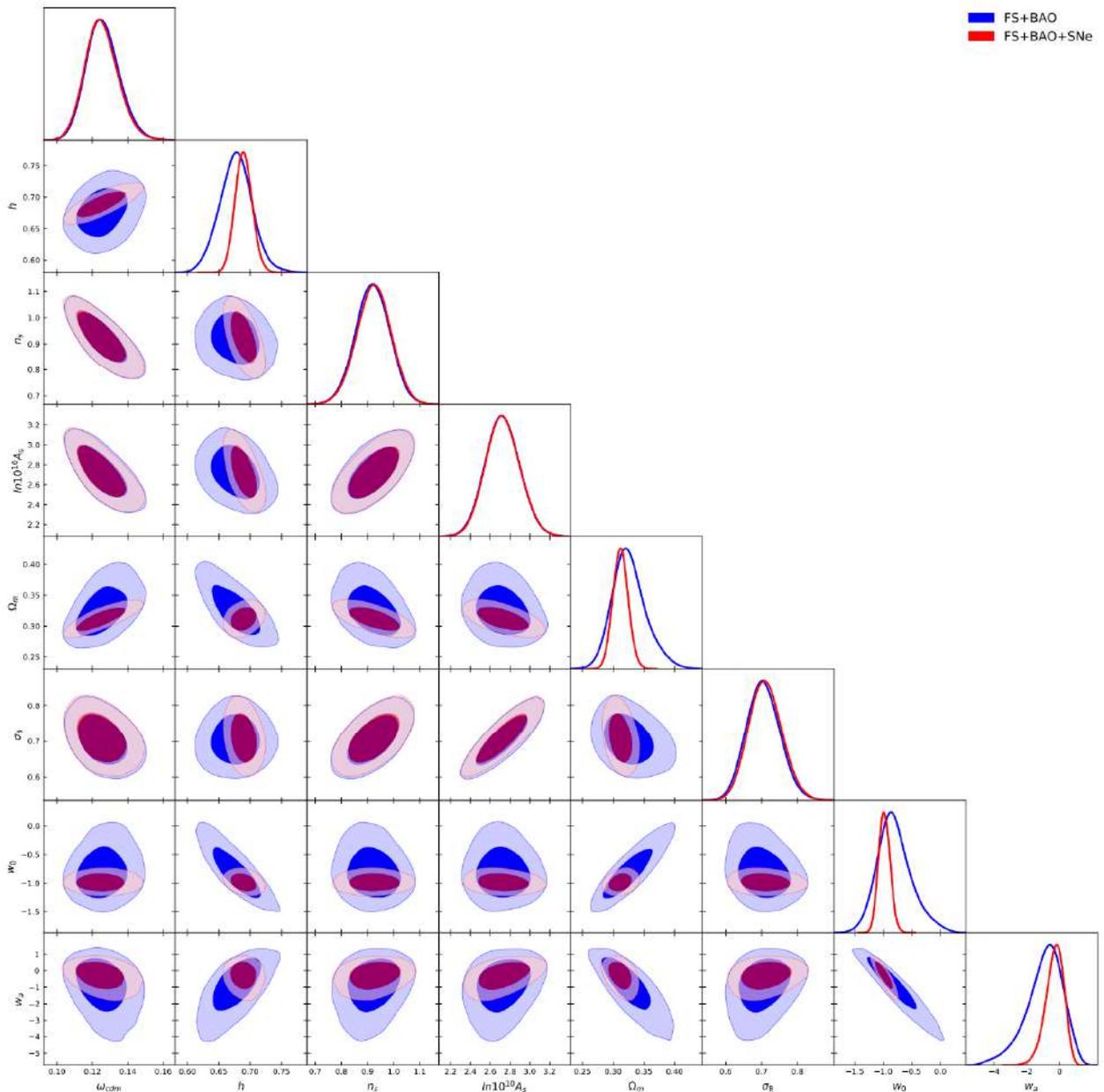


Рис. 9. Космологические ограничения в модели модифицированной темной энергии  $w_0w_a\Lambda\text{CDM}$  по данным крупномасштабной структуры Вселенной (FS+BAO) и сверхновым (SN). В анализе не использовались данные анизотропии реликтового излучения.

По результатам работы опубликованы статьи №3-4 в списке публикаций.

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

Проведено исследование поведения малых возмущений на фоне произвольного космологического решения в рамках расширенных теорий Хорндески с дополнительным скалярным полем, минимально взаимодействующим с гравитацией. Был явно получен вид квадратичного действия для возмущений над однородным, изотропным фоном, сформулированы критерии устойчивости системы по отношению к духам и градиентным неустойчивостям, а также получены выражения для скоростей распространения мод возмущений всех типов.

Анализ полученных критериев устойчивости показал, что существенным параметром модели становится скорость звука дополнительного скалярного поля: чем ближе скорость звука дополнительного скалярного к скорости света, тем выше максимальное значение скорости распространения одной из скалярных мод (см. рисунок 10).

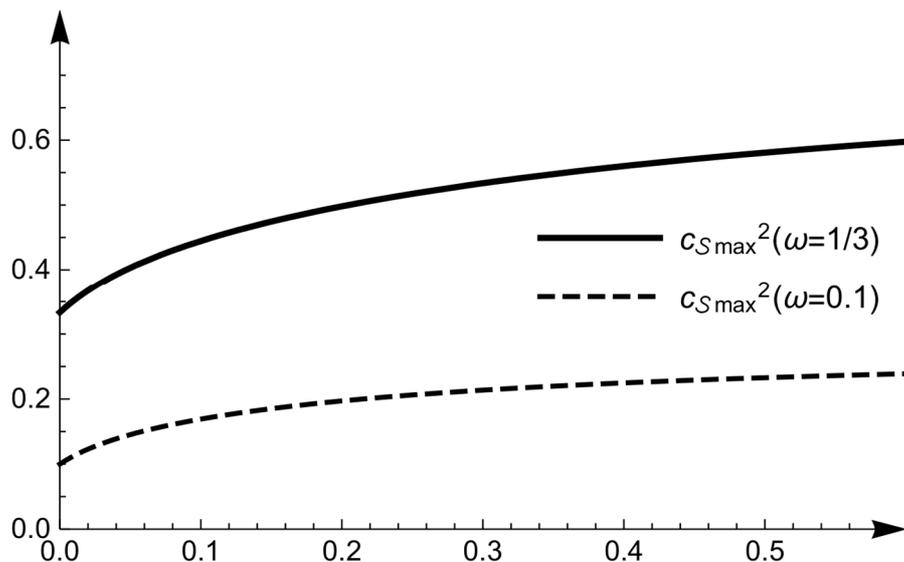


Рис. 10. Максимальное значение большего из квадратов скоростей скалярных мод как функция плотности энергии дополнительной материи со скоростью звука  $w=u_s^2=1/3$  (радиация) и  $w=u_s^2=0.1$ .

Иными словами, существует некоторое предельное значение скорости звука дополнительной материи, превышение которой приводит к возникновению сверхсветовой скалярной моды. В частности, в случае дополнительного скалярного поля, чья скорость звука равна скорости света, одна из скалярных мод неизбежно распространяется со скоростью, превышающей скорость света. Указанный результат справедлив для случая

дополнительного скалярного поля, катящегося сколь угодно медленно, а также для любой теории из класса расширенных теорий Хорндески. Таким образом, требование отсутствия сверхсветовых мод на фоне устойчивого космологического решения в многокомпонентном случае расширенной теории Хорндески накладывает нетривиальные ограничения на лагранжиан теории. А именно, если предполагать, что рассматриваемая теория допускает стандартное ультрафиолетовое пополнение, которое Лоренц-инвариантно, то описанный результат исследования скоростей распространения возмущений над космологическим фоном приводит к новым ограничениям, дополняющим существующие и следующие из ограничений на скорость распространения гравитона.

Полученные результаты могут найти свое применение за пределами заявленной задачи, и носят существенно общий характер для класса скалярно-тензорных теорий типа расширенных теорий Хорндески.

По результатам работы опубликована статья №5 в списке публикаций.

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

В рамках НИР было проведено измерение предела насыщения МКП-ФЭУ Planacon XR85002/FIT-Q с помощью дипольного электромагнита MNP-17 в ЦЕРН. МКП-ФЭУ поочерёдно устанавливались в светоизолированный короб и производилась их импульсная засветка с помощью генератора пикосекундных лазерных импульсов. Для регистрации сигналов использовался цифровой осциллограф LeCroy WR 8104. Измерения производились в соответствии с методикой, представленной в публикации [5].

На рисунке 11 представлены зависимости амплитуды сигнала, времени распространения сигнала, временного разрешения и тока питания одного МКП-ФЭУ от среднего анодного тока. Также обозначены референсные точки, актуальные для эксперимента ALICE: ожидаемая загрузка центральных каналов FT0-A в p-p столкновениях с частотой 200 кГц и Pb-Pb столкновениях с частотой 50 кГц, а также в обсуждаемом режиме p-Pb столкновений с частотой 1 МГц. Предел насыщения прибора на демонстрируемых графиках находится на границе его ожидаемой загрузки в свинец-свинцовом режиме. При этом имеется двукратный запас по среднему анодному току до работы ФЭУ в нежелательном режиме глубокого насыщения, в котором наблюдается падение амплитуды сигнала более, чем на треть, а время распространения сигнала переходит к экспоненциальному росту.

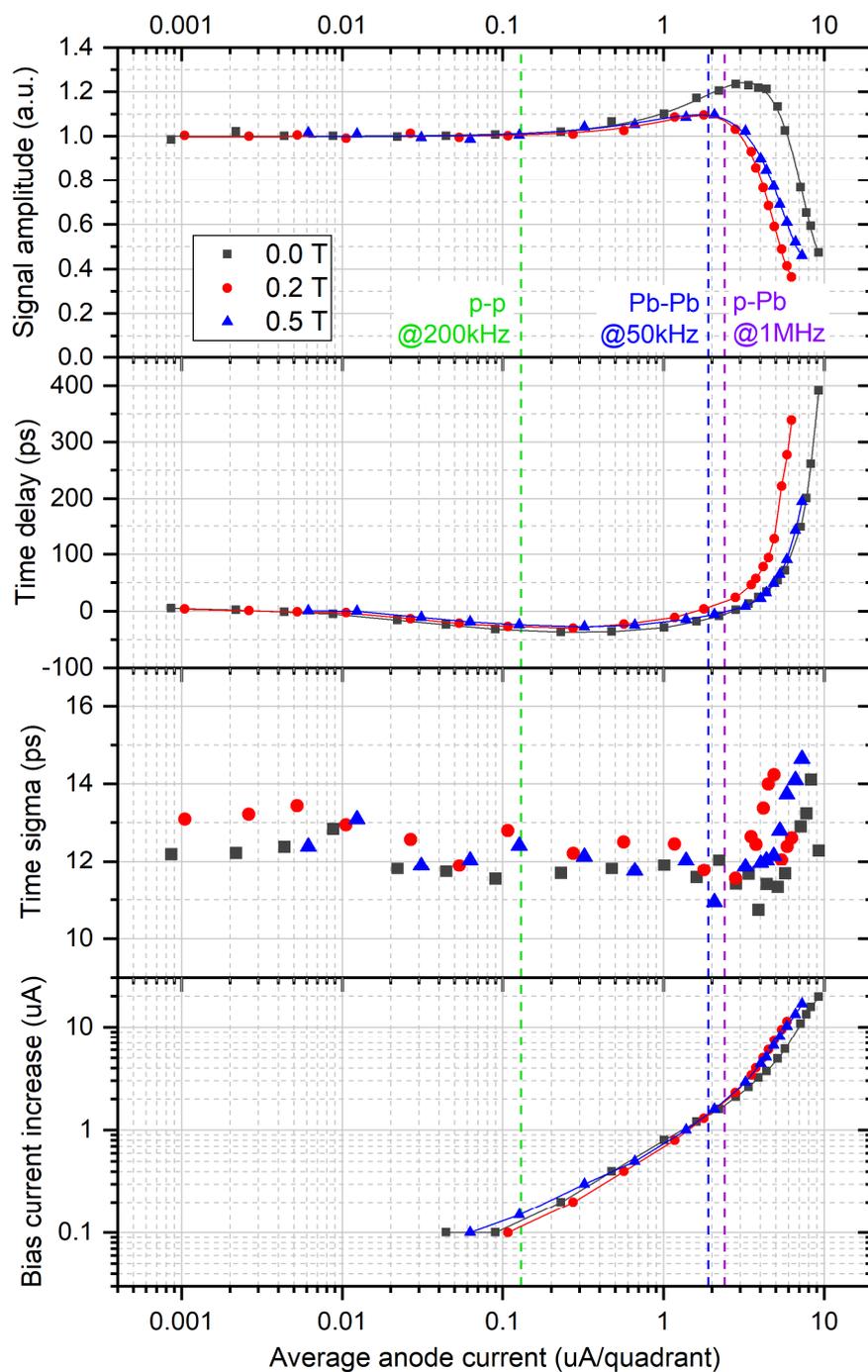


Рисунок 11. Зависимость амплитудных и временных параметров МКП-ФЭУ, а также параметров питания, от среднего анодного тока в магнитном поле индукцией 0,2 и 0,5 Т.

Аналогичные величины были измерены для всех 34 МКП-ФЭУ. Основные результаты по отклонению предела насыщения в магнитном поле представлены на рисунке 12. На рисунке 13 также представлена зависимость этой величины от положения максимума зависимости усиления МКП-ФЭУ от угла наклона в магнитном поле. Подробности процедуры измерения усиления МКП-ФЭУ в зависимости от угла наклона в магнитном поле представлены в отчёте за прошлый год.

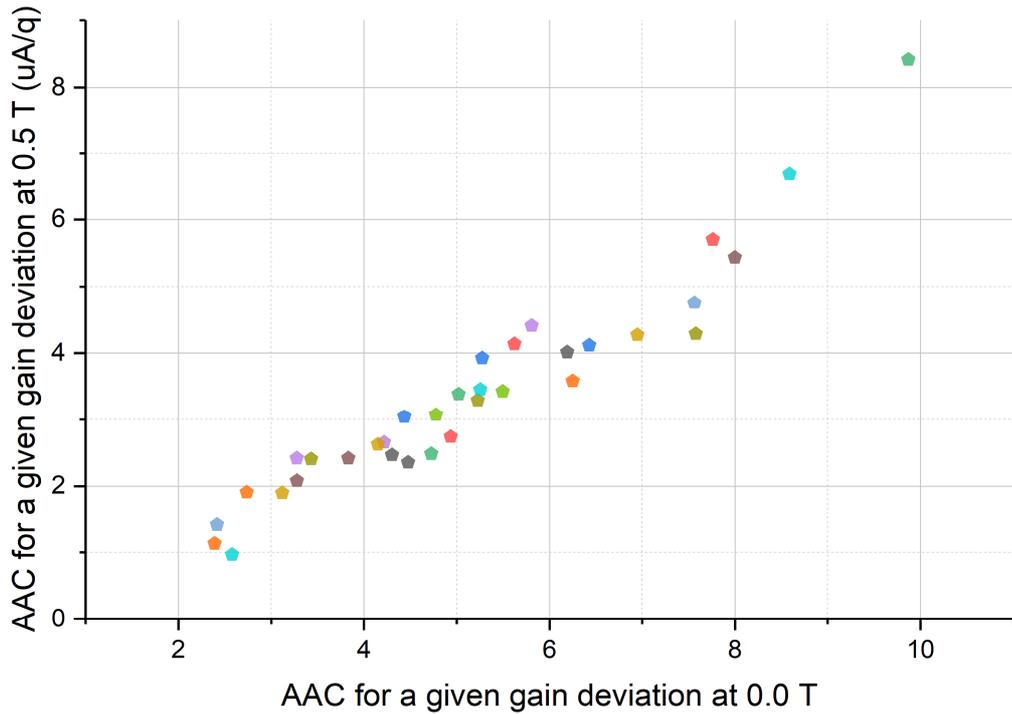


Рисунок 12. Предел насыщения в магнитном поле в зависимости предела насыщения вне магнитного поля.

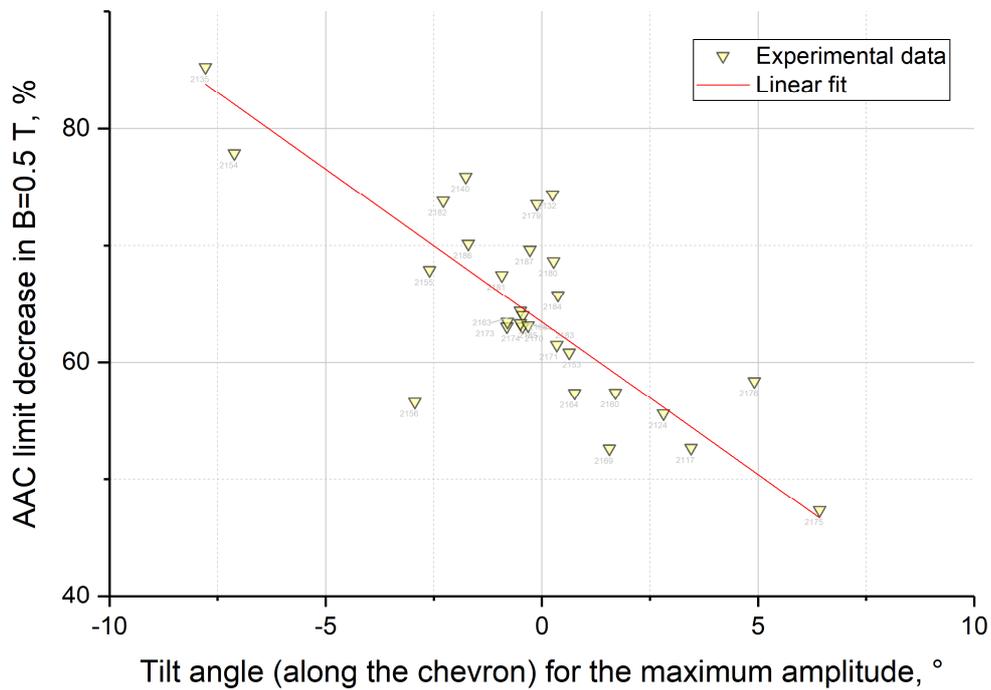


Рисунок 13. Зависимость предела насыщения МКП-ФЭУ от положения максимума зависимости усиления МКП-ФЭУ от угла наклона в магнитном поле.

Вероятно, природа неожиданной корреляция между двумя величинами, представленными на рисунке 13, связана с влиянием дисбаланса между сопротивлениями

двух пластин шевронной сборки МКП на каждый из наблюдаемых параметров. Данный факт не только интересен сам по себе, но и позволяет экстраполировать полученные данные на МКП-ФЭУ северного плеча детектора для оценки отклонения их уровня насыщения в сильном магнитном поле.

Полученные результаты позволили оптимизировать расположение МКП-ФЭУ в матрице южного плеча детектора FIT для наилучшей чувствительности детектора в условиях высоких загрузок свинец-свинцовых столкновений в эксперименте ALICE.

По результатам работы опубликована статья №6 в списке публикаций.

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

В 2020 году продолжилась работа по обработке данных нового электромагнитного калориметра ECal эксперимента HADES.

Для вновь собранного в 2019 году сектора детектора ECal при его первом запуске потребуется провести калибровку. Также, перекалибровка детектора должна производиться при любом изменении таких параметров, как напряжение на ФЭУ или пороги срабатывания. Для удобства проведения этой процедуры было разработано оконное приложение ECal GUI calibrator (см. рисунок 14). Его особенностью является то, что параметры калибровки для каждого модуля подбираются согласованно по двум наборам данных: для сильного магнитного поля (ток в соленоиде 2500 А) и для слабого поля (ток в соленоиде 200 А). При сильном магнитном поле низкоэнергетические электроны разворачиваются и не могут вызвать срабатывание детектора (см. рисунок 14, верхний левый график), в то время как при слабом магнитном поле траектория электрона представляет собой почти прямую линию, и поэтому его импульс определяется трековыми детекторами с большой погрешностью, что не позволяет точно прокалибровать по ним калориметр (см. рисунок 14, нижний левый график). Однако ECal GUI calibrator позволяет построить зависимость отклика детектора от энергии электрона при обоих значениях магнитного поля на одном графике (см. рисунок 14, правый график) и определить параметры калибровки, описывающие отклик детектора во всем диапазоне доступных энергий. С его помощью была произведена более точная амплитудная калибровка детектора по данным 2019 года, и с новой калибровкой построен спектр инвариантной массы дифотонов (см. рисунок 15).

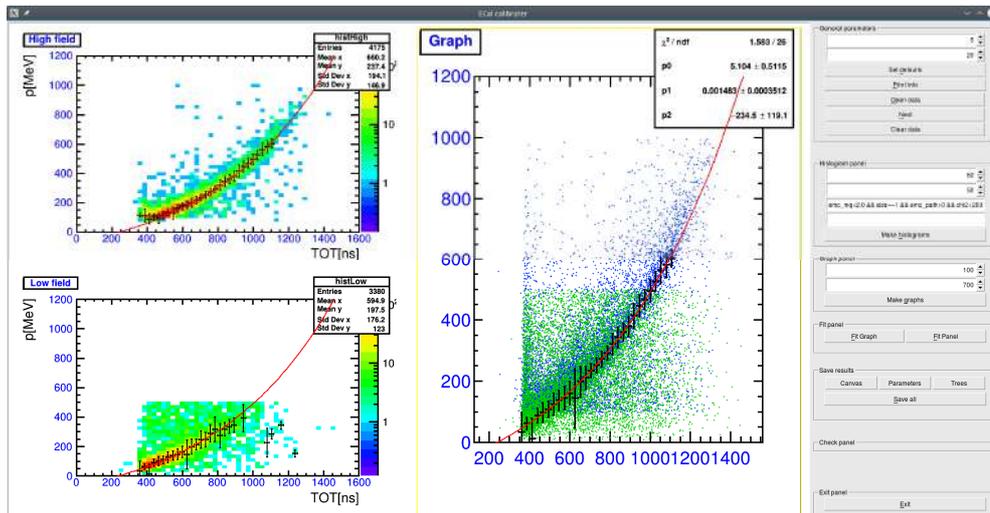


Рисунок 14. Оконное приложение для калибровки детектора ECal GUI calibrator

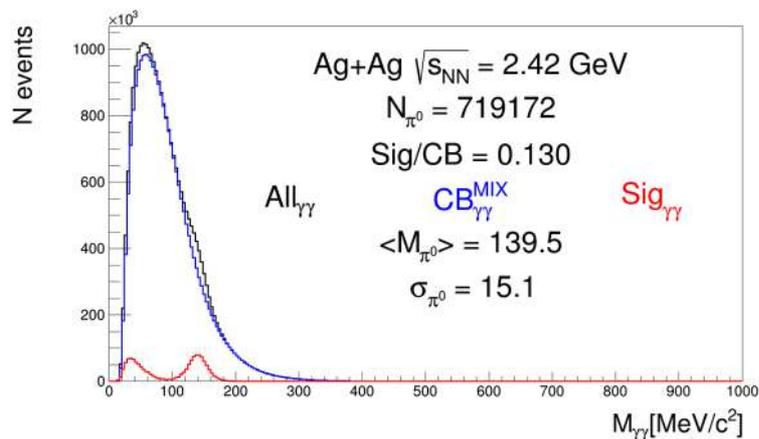


Рисунок 15. Спектр инвариантной массы пары фотонов. Черная линия соответствует всем событиям, синяя — комбинаторному фону, красная — результат вычитания комбинаторного фона из спектра.

В 2019 году в спектре было обнаружено повышенное количество пар фотонов в области инвариантных масс менее 100 МэВ (см. рисунок 15), но этому не было дано удовлетворительного объяснения. Надежды на то, что более точная калибровка позволит избавиться от этого фона, не оправдали себя. В качестве возможного объяснения формы спектра рассматривался эффект Хэнбери-Брауна-Твисса (НВТ), однако более детальное исследование показало, что форма спектра не фитируется даже с учетом вклада от НВТ-сигнала (рисунок 16).

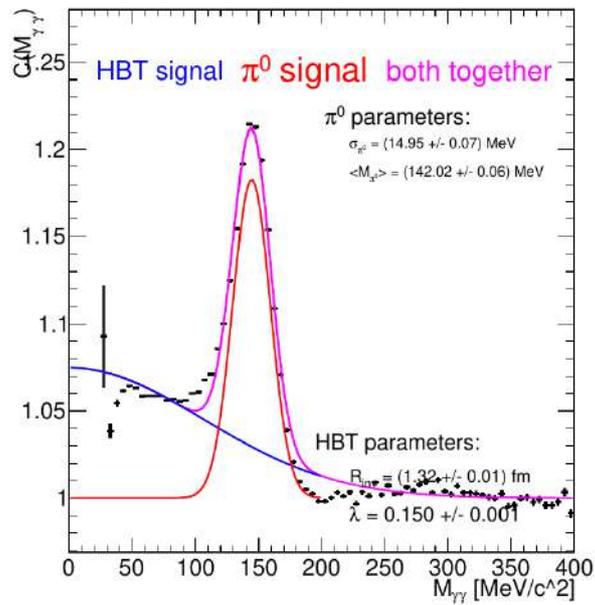


Рисунок 16. Аппроксимация формы спектра с учетом HBT-эффекта.

Проведенное Монте-Карло моделирование показало, что форма фона не может быть объяснена ни шумовыми срабатываниями ФЭУ, ни влиянием акцептанса детектора, ни возможными недостатками калибровки при малых энергиях (см. рисунок 17).

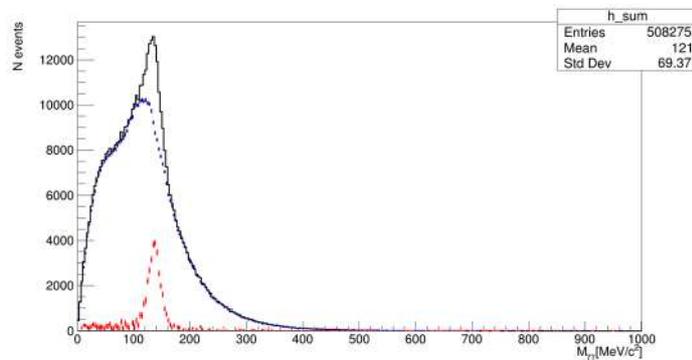


Рисунок 17. Монте-Карло моделирование спектра масс дифотонов с учетом шумовых срабатываний ФЭУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2020 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результат НИР по задаче 5 вошел в число важнейших достижений Института в 2020 году.

Выполнена корректировка амплитуд сигналов ОМ детектора Baikal-GVD с учетом нелинейности ФЭУ для каскадных событий с энергией выше 100 ТэВ. Выполнена обработка набора данных Baikal-GVD с 2016 по 2019 годы. Были выделены каскадные события с энергией выше 100 ТэВ – кандидаты на сигнал от астрофизических нейтрино.

Были оптимизированы и использованы для анализа данных разработанные на первом этапе проекта алгоритмы для разделения наложений по форме сигнала. Для повышения эффективности сбора данных на установке Троицк ню-масс был разработан новый сервис набора данных с детекторов установки Троицк ню-масс.

На основе созданных на установке Троицк ню-масс алгоритмов, разработана система контроля для детекторной подсистемы эксперимента babyIAXO в DESY.

В 2020 году завершен первый физический набор данных детектора Baby MIND. В результате анализа первого набора данных детектора Baby MIND получены спектры регистрируемых нейтрино и улучшен программный комплекс Монте-Карло для моделирования событий регистрации взаимодействий нейтрино в мишени WAGASCI.

Установлена чувствительность распределения параметра усиленных деревьев решений  $\xi$  к анизотропии массового состава космических лучей ультравысоких энергий. Исследовано пространственное распределение протоноподобных событий в наблюдаемой части неба и проведено сравнение с изотропным распределением событий при помощи статистики Ли-Ма.

Разработан новый модуль CLASS-PT, реализующий теоретические вычисления на базе космологической теории возмущений наиболее эффективным образом. Помимо однопетлевого вычисления двухточечных корреляционных функций новый код использует самосогласованную теоретическую модель для аккуратного описания нелинейной эволюции барионных акустических колебаний, а также задействует методы эффективной теории поля для описания сложных процессов на космологически малых масштабах.

Получены новые сильные ограничения на пространство параметров моделей с модифицированной темной энергии и пространственную кривизну Вселенной по данным крупномасштабной структуры Вселенной. Измерения были произведены без привлечения данных по микроволновому излучению, однако точности измерения космологических

параметров этими двумя независимыми методами оказались сопоставимыми. Результаты исследования свидетельствуют о справедливости стандартной космологической модели.

Впервые показано, что в результате добавления в расширенную теорию Хорндески дополнительной материи в виде скалярного поля, чья скорость звука, равна скорости света, скорость распространения одной из скалярных мод системы неизбежно превысит скорость света. Указанный результат справедлив для любого стабильного космологического фона, а также расширенной теории Хорндески наиболее общего вида. Полученный результат может быть применен за рамками задач, касающихся несингулярных космологических сценариев типа «отскока» или «генезиса» в скалярно-тензорных теориях, и подразумевает новые ограничения на лагранжиан теории при условии требования субсветовых скоростей для всех возмущений.

Измерено отклонение уровня насыщения в магнитном поле индукцией 0,2 и 0,5 Т МКП-ФЭУ для использования в подсистеме FT0-A детектора FIT. Обнаружена корреляция между отклонением уровня насыщения и положением максимума зависимости усиления МКП-ФЭУ от угла наклона в магнитном поле. Продемонстрирована стабильность быстрогодействия МКП-ФЭУ в магнитном поле при любом уровне загрузки вне области глубокого насыщения. Полученные результаты позволили оптимизировать расположение МКП-ФЭУ в матрице южного плеча детектора FIT для наилучшей чувствительности детектора в условиях высоких загрузок свинец-свинцовых столкновений в эксперименте ALICE.

Произведена более точная амплитудная калибровка детектора ECal по данным 2019 года, и с новой калибровкой построен спектр инвариантной массы дифотонов. Более точная калибровка не дала объяснения наблюдаемому ранее избытку пар фотонов в области инвариантных масс менее 100 МэВ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vasily Chernov, Alexander Nozik, Shape-based event pileup separation in Troitsk nu-mass experiment, JINST 14 no.08, T08001 (2019).
2. 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
3. R. U. Abbasi et al. [Telescope Array Collaboration]. Mass composition of ultra-high-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector Data, Phys. Rev. D – 2019. – V. 99. – No 2. – P. 022002.
4. 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).
5. E.V. Antamanova et al., 2018 JINST 13 T09001, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/09/T09001>

## ПУБЛИКАЦИИ

1. А.Д. Аврорин, ..., М.Д. Шелепов, ... и др., Калибровка измерительных каналов нейтринного телескопа Baikal-GVD, ПТЭ 2020, №4, с.120-130, (2020).
2. A. Blondel, ..., A. Mefodev, ..., et al. The SuperFGD Prototype Charged Particle Beam Tests. JINST 15 (2020) 12, P12003. DOI: 10.1088/1748-0221/15/12/P12003.  
arXiv:2008.08861
3. Chudaykin, Anton and Ivanov, Mikhail M. and Philcox, Oliver H. E. and Simonović, Marko, Nonlinear perturbation theory extension of the Boltzmann, Phys.Rev. D102 no.6, 063533 (2020).
4. Chudaykin, Anton and Dolgikh, Konstantin and Ivanov, Mikhail M., Constraints on the curvature of the Universe and dynamical dark energy from the Full-shape and BAO data, Phys.Rev. D103 no.2, 023507 (2021).
5. S. Mironov, V. Rubakov, V. Volkova, Superluminality in beyond Horndeski theory with extra scalar field, Phys.Scripta 95 (2020) 8, 084002.
6. Yu.A. Melikyan et al., Performance of the cost-effective Planacon MCP-PMTs in strong magnetic fields, NIM A 983 (2020).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Baikal-GVD – Байкальский глубоководный нейтринный эксперимент кубокилометрового масштаба

FFTLog – программный пакет для вычисления быстрого преобразования Фурье

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

HEALPix – Hierarchical Equal Area Iso Latitude pixelation of the sphere, иерархическая равновеликая пикселизация сферы

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

OpenBLAS – реализация библиотеки подпрограмм линейной алгебры с открытым исходным кодом

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

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

WallMRDs – wall muon range detectors, детекторы мюонов в проекте WAGASCI

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

МКП – многоканальные пластины

ОМ – оптический модуль

ф.э. - фотоэлектрон

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

эВ – электрон-Вольт

эффект НВТ – эффект Хэнбери-Брауна-Твисса