

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

«28» января 2022 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

(заключительный за 2021 год)

ФЦП

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

 Г.И. Рубцов
«28» января 2022 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

 подпись, дата	28.01.2022	Г.И. Рубцов (введение, заключение, раздел 4)
---	------------	--

Исполнители:
М.Н.С.

 подпись, дата	28.01.2022	М.Д. Шелепов (раздел 1)
---	------------	----------------------------

М.Н.С., к.ф.-м.н.

 подпись, дата	28.01.2022	В.Г. Чернов (раздел 2)
---	------------	---------------------------

М.Н.С.

 подпись, дата	28.01.2022	А.В. Мефодьев (раздел 3)
---	------------	-----------------------------

Н.С., к.ф.-м.н.

 подпись, дата	28.01.2022	Я.В. Жежер (раздел 4)
---	------------	--------------------------

Н.С, к.ф.-м.н.

 подпись, дата	28.01.2022	А.С. Чудайкин (раздел 5)
--	------------	-----------------------------

Н.С., к.ф.-м.н.

 подпись, дата	28.01.2022	В.Е. Волкова (раздел 6)
---	------------	----------------------------

М.Н.С., к.ф.-м.н.

 подпись, дата	28.01.2022	Ю.А. Меликян (раздел 7)
---	------------	----------------------------

М.Н.С.

 подпись, дата	28.01.2022	А.И. Шабанов (раздел 8)
---	------------	----------------------------

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 36 с., 1 кн., 19 рис., 0 табл., 9 источн., 0 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 2021 год.

Выполнены работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2021 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 подавления шумовых событий от атмосферных мюонов, основанный на анализе временного распределения сигналов на каждом оптическом модуле и их классификации. Процедура подавления заключается в ограничении числа импульсов от различных источников черенковского излучения (групп мюонов) в событии.

Результатом работы является выделение кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы. Впервые из большого набора данных с 2018 по 2021 годы были выделены 72 события с восстановленной энергией $E > 40$ ТэВ и множественностью сработавших каналов $N_{hit} > 19$. В результате применения процедуры дополнительного подавления фоновых событий, было выделено 10 событий - кандидатов от нейтрино астрофизической природы с энергией выше 60 ТэВ

Полученные результаты могут применяться для изучения диффузного потока 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 2021 году была продолжена работа по совершенствованию системы регистрации событий в эксперименте «Троицк ню-масс». В частности, был интегрирован в систему новый детектор на технологии SDD (Silicon Drift Detector), обладающий рекордным разрешением (до 150 эВ ПШПВ в диапазоне энергий около 18 кэВ), коротким временем релаксации и возможностью параллельного сбора данных с нескольких пикселей.

Было проведен ряд работ для интеграции нового детектора, отладки его работы и интерпретации результатов.

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

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

Цель работы — получение информации об отношении сечения взаимодействия нейтрино с водой и с пластиковым сцинтиллятором в совместном эксперименте с мишенью-детектором WAGASCI и детектором Baby MIND.

Был проведен анализ и реконструкция событий в нейтринном детекторе мишень-детекторе WAGASCI и детекторе Baby MIND. Измерен спектр мюонов, образованных в CCQE взаимодействиях нейтрино, на основе данных, накопленных за первый физический сеанс на нейтринном пучке T2K. Диапазон измеренных импульсов составил 350 - 1600 МэВ/с с пиком в 500 МэВ/с. Полученный спектр согласуется с результатами полученными методом Монте-Карло.

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 массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array, а также ограничение потока космических фотонов. Для классификации событий используются метод усиленных деревьев решений и нейронные сети, которые позволяют выделять протонные и фотонные события.

Результатом работы является оценка массы первичных частиц космических лучей как функция от энергии, а также полные карты неба, описывающие кластеризацию протонных событий в данных наземной решетки эксперимента Telescope Array при помощи статистики Ли-Ма. Также был разработан метод анализа массового спектра ансамбля событий при помощи нейронных сетей и получены предварительные ограничения на регистрируемый поток космических фотонов.

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

За предыдущие годы выполнения НИР были разработаны методы оценки массы нейтрино и нейтринной иерархии масс по данным крупномасштабной структуры Вселенной [3]. В 2021 году на их основе были разработаны новые методы и подходы, позволяющие изучать смежные актуальные вопросы. Объектами исследований являлась модель ранней (до эпохи образования водорода) темной энергией.

Цель работы – исследовать модель ранней темной энергии на предмет разрешения Хаббловского кризиса в космологии с использованием новых данных Южного полярного телескопа (SPT), космической обсерватории Планк и данных крупномасштабной структуры Вселенной.

В результате исследования было показано, что ранняя темная энергия является предпочтительным сценарием, в рамках которого удастся согласовать значение постоянной Хаббла с наблюдениями в локальной Вселенной. Другим важным результатом явилось то, что учет измерений параметра Хаббла в локальной Вселенной незначительно сказывается на амплитуде линейных возмущений плотностей материи. Предыдущие исследования указывали на несовместность модели ранней темной энергии с наблюдениями крупномасштабной структуры Вселенной. Это объясняется избыточным линзирующим сигналом в картах обсерватории Планк на малых угловых масштабах. В настоящем исследовании на малых угловых масштабах были использованы данные телескопа SPT, которые не имеют подобной аномалии, что способствует более надежному измерению параметров.

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 эволюции ранней 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 широком классе скалярно-тензорных теорий со старшими производными (англ. DHOST theories) в присутствии дополнительной материи. В результате был получен набор критериев устойчивости, применимый для космологических сценариев общего вида в таких скалярно-тензорных теориях с дополнительным скалярным полем с нестандартным кинетическим членом. Особое внимание уделялось исследованию вопроса о возможном наличии возмущений, распространяющихся со скоростями, превышающими скорость света.

В результате было показано, что в общем случае на фоне космологического решения в таких скалярно-тензорных теориях с дополнительной материей возникают сверхсветовые моды. Однако, были получены ограничения на параметры модели, позволившие выделить подкласс DHOST теорий, в котором проблема сверхсветовых скоростей не возникает. Полученные ограничения являются принципиально новыми в области, и могут найти свое применение за пределами задачи, касающейся несингулярных космологических сценариев типа «отскока» или «генезиса» в скалярно-тензорных теориях.

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 рамках НИР была проведена калибровка амплитудных и временных параметров детектора FIT, включая параметры фотосенсоров, считывающей электроники и каналов лазерной системы калибровки детектора. В результате, детектор FIT успешно участвовал в

наборе технических данных во время пробного запуска LHC. Также, было увеличено быстродействие лазерной системы калибровки детектора за счёт увеличения динамического диапазона её работы.

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 в столкновениях тяжелых ионов в эксперименте HADES.

В результате НИР проведена работа по анализу данных с электромагнитного калориметра в столкновениях ядер серебра при энергии пучка 1.23 АГэВ. Получены первые экспериментальные результаты по выходу нейтральных пионов в этой реакции.

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.	13
2. Разработка алгоритма эффективного разделения сигналов на основе формы импульса в детекторах Троицк нью-масс и прототипе детектора TRISTAN в Троицке.....	16
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.....	22
6. Анализ предсказаний космологических сценариев типа отскока и генезиса в теории Хорндески в контексте данных экспериментов по измерению реликтового излучения Planck и SPT.	25
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.....	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	34
ПУБЛИКАЦИИ.....	35
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	36

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 2021 года развернут и введен в эксплуатацию восьмой кластер. С его вводом эффективный объем телескопа достиг значения 0.4 км³ в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Установка содержит в своем составе 2304 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».

В 2021 году была продолжена работа по совершенствованию системы регистрации событий в эксперименте «Троицк ню-масс», нацеленного на поиск стерильных нейтрино с массой до 5 кэВ. Одной из основных сложностей является высокая скорость счета на основном детекторе. Для улучшения качества эксперимента, требуется дальнейшее усовершенствование считывающего оборудования.

В рамках НИР был проведен сеанс измерений с использованием многопиксельного детектора, разработанного в рамках проекта TRISTAN. Для интеграции данного детектора в систему сбора данных была проведена модификация системы сбора данных и разработка нового сервиса детектора, поддерживающий уже существующий протокол.

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

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.

В 2021 году был проведен второй физический сеанс на нейтринном пучке эксперимента T2K. Для улучшения точности получаемых результатов был разработан и протестирован алгоритм восстановления треков заряженных частиц и алгоритм восстановления импульсов мюонов, образованных от взаимодействия нейтрино с пластиком и водой 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».

Определение массового спектра космических лучей важно для астрономии: без знания типа первичной частицы невозможно восстановить её источник (в силу различного поведения частиц в межгалактическом магнитном поле). Также, массовый спектр является ключевой наблюдаемой величиной для определения истинной модели образования космических лучей. В силу указанных причин, определение первичных частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ) является одной из важнейших астрофизических задач.

Сложность решения данной задачи обусловлена тем, что в силу высокой стохастичности ШАЛ и неопределённости адронных моделей, определяемая масса первичной частицы имеет большую ошибку. Для достижения заметного улучшения точности предсказаний, можно перейти к использованию нейронных сетей для анализа как индивидуальных событий, так и их ансамблей.

Также актуальной задачей является обновление имеющихся результатов с учетом накопившейся за последние годы статистики событий.

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

Одной из наиболее актуальных проблем космологии является разрешение Хаббловского кризиса, вызванного наличием аномальных данных в ряде экспериментов. Для изучения данного вопроса можно использовать данные Южного полярного телескопа (SPT) и крупномасштабную структуру Вселенной. Последняя представляет собой трехмерное распределение материи, которое состоит из галактик, скоплений галактик, филаментов и других массивных образований. Данная трехмерная картина содержит

большое количество информации, которая может быть использована для получения самых сильных ограничений на космологические параметры. В частности, на основе этих данных можно получить независимую оценку значения параметра Хаббла, а также других космологических параметров.

Используемая аналитическая модель для описания сгущения галактик в слабо-нелинейном режиме основана на космологической теории возмущений. Для получения наиболее сильных ограничений необходимо использовать развитую за предыдущие годы выполнения НИР технику учета нелинейных эффектов. Также для получения достоверной оценки значений космологических параметров необходимо учитывать неопределенность теоретических вычислений (на базе космологической теории возмущений).

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 со старшими производными типа DHOST теорий (англ. Degenerate Higher Order Scalar-Tensor), 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, так называемого 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 теории DHOST (а также различных ее подклассов) и дополнительного скалярного поля, лагранжиан которого нетривиально зависит от стандартного кинетического слагаемого. 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 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. Каждая из подсистем – многоканальна, и отклик всех каналов должен быть выравнен на каждом из перечисленных ниже уровней (помимо оптического отклика рабочего вещества, выравненного на прошлых этапах НИР):

- электрический отклик фотосенсоров;
- временная метка и показания АЦП, формируемые в считывающей электронике;
- интенсивность засветки калибровочными импульсами.

В рамках НИР была проведена калибровка амплитудных и временных параметров детектора FIT на перечисленных уровнях.

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 марте 2019 г. состоялся первый запуск установки HADES с новым детектором ECal, в ходе которого были получены данные для столкновений ядер Ag+Ag при энергии пучка 1.58 ГэВ и 1.23 ГэВ. В результате анализа этих данных был определен выход нейтральных пионов по их распаду на два гамма-кванта.

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.

В течение 2915 дней эффективного набора данных телескопом Baikal-GVD, за период с апреля 2019 года по февраль 2021 года, было зарегистрировано 14.9×10^9 событий по базовому триггеру телескопа. Для дальнейшего анализа были отобраны события, содержащие не менее 8 оптических модулей с импульсами выше 1.5 фотоэлектронов расположенные на трех и более гирляндах. Далее из анализа времен импульсов разных ОМ отбирались ОМ удовлетворяющие требованиям условия причинности. Для дальнейшего анализа отбирались события, в которых число ОМ, удовлетворяющих условиям причинности, было больше 7. После процедуры восстановления координаты, направления и энергии ливневых событий было отобрано 72 события с восстановленной энергией $E > 40$ ТэВ и множественностью сработавших каналов $N_{hit}^t > 19$ ОМ, из них 10 событий с $E > 100$ ТэВ. На рисунке 1 показаны распределения выделенных событий по восстановленной энергии ливней, а также ожидаемые распределения от атмосферных мюонов (красная гистограмма) и от астрофизического потока, измеренного в эксперименте IceCube со спектром $E^{-2.46}$ (зеленая гистограмма). На рисунке 2 представлено распределение экспериментальных событий по косинусу зенитного угла направления ливня (точки), а также ожидаемое распределение событий от атмосферных мюонов (красная гистограмма). Угловое распределение экспериментальных событий согласуется с ожидаемым распределением от атмосферных мюонов. Следует отметить, что в наборе экспериментальных данных присутствует одно событие с зенитным углом $\theta = 109^\circ$ и энергией каскада $E_{sh} = 91$ ТэВ, являющееся надежным кандидатом на событие от нейтрино из-под горизонта.

Число выделенных экспериментальных событий и их пространственно-угловое распределение и распределение по энергии сопоставимо с ожидаемыми от потока атмосферных мюонов. Для дополнительного подавления фона от атмосферных мюонов был предложен метод, основанный на анализе временного распределения сигналов на каждом ОМ и их классификации, что позволило повысить эффективность выделения каскадных событий от нейтрино астрофизической природы. Аналоговые импульсы ОМ оцифровываются в системных модулях секций с временным шагом 5 нс. Ширина импульса ФЭУ после оцифровки, в среднем, составляет 20 нс. Это позволяет разделить импульсы разной природы на отдельных ОМ.

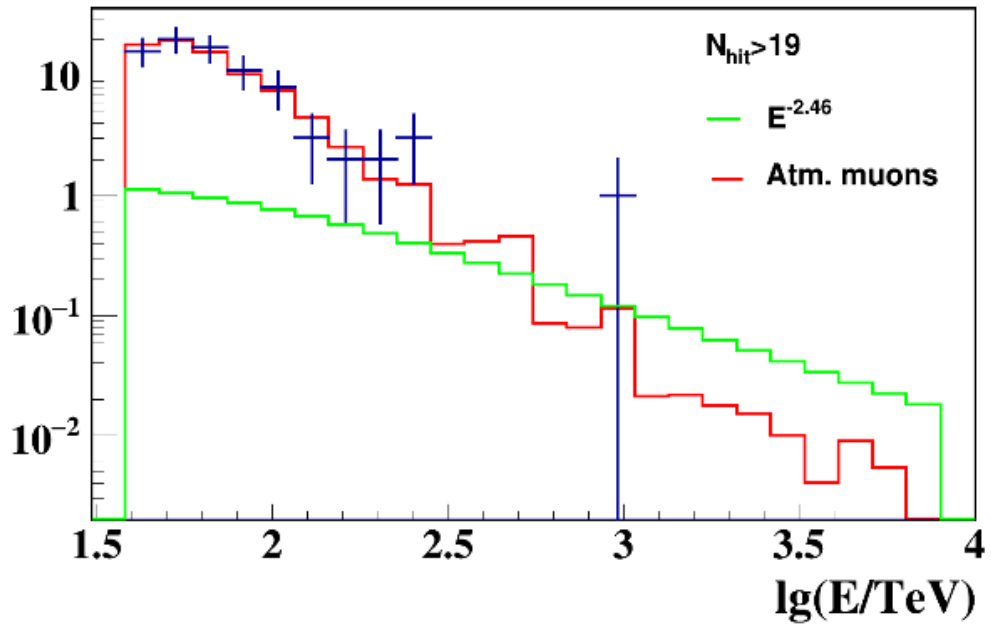


Рисунок 1. Распределения событий по энергии: данные (крестики), атмосферные мюоны (красная гистограмма), астрофизические нейтрино (зеленая гистограмма)

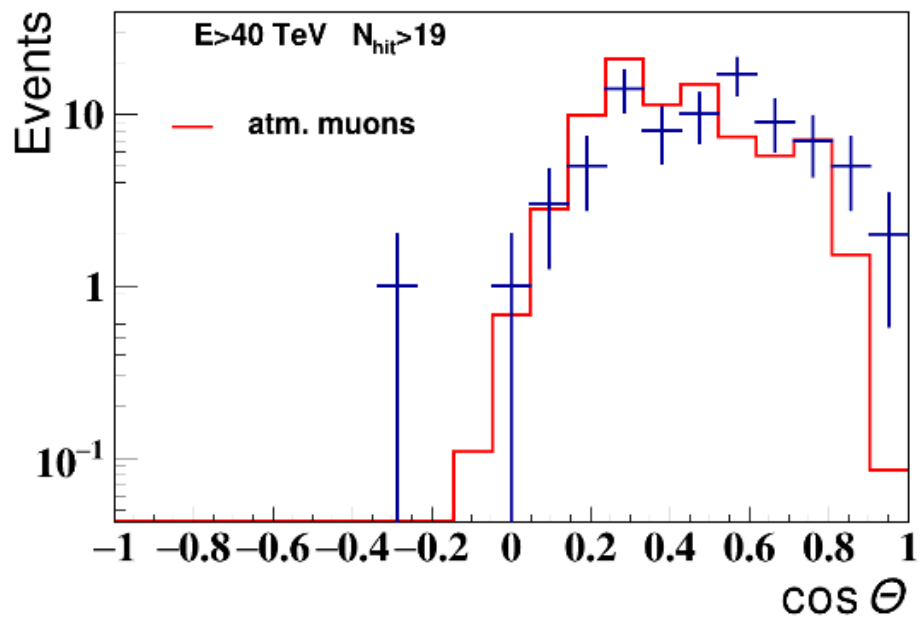


Рисунок 2. Распределения событий по косинусу зенитного угла: данные (крестики), атмосферные мюоны (гистограмма)

Для событий от групп атмосферных мюонов, импульсы, регистрируемые ОМ можно классифицировать по принадлежности к соответствующему источнику черенковского излучения. Первая группа импульсов (N_{type1}) инициирована фотонами, испущенными ливнем высокой энергии. Вторая группа импульсов (N_{type2}) относится к черенковскому излучению мюона, который инициировал ливень высокой энергии. Третья группа импульсов (N_{type3}) вызвана другими мюонами группы. Процедура дополнительного подавления событий от атмосферных мюонов заключается в ограничении числа

импульсов второй и третьей группы в событии. Были использованы следующие ограничения на число импульсов второй и третьей группы в экспериментальных событиях:

$$N_{\text{type3}} < 5;$$

$$N_{\text{type2}} = 0 \text{ и } E_{\text{rec}} > 60 \text{ TeV, или}$$

$$N_{\text{type2}} = 1 \text{ и } E_{\text{rec}} > 100 \text{ TeV.}$$

В результате применения данной процедуры было выделено семь событий – кандидатов от нейтрино астрофизической природы с энергией выше 60 ТэВ и множественностью сработавших каналов $N_{\text{hit}} > 19$ ОМ. Интегральное распределение этих событий приводится на рисунке 3 (крестики). На том же рисунке приводятся ожидаемые распределения от атмосферных мюонов (коричневая гистограмма) и от потока астрофизических нейтрино со спектром $E^{-2.46}$ и нормировкой IceCube (зеленая гистограмма). В результате применения процедуры дополнительного подавления фоновых событий к набору данных 2018 года, было выделено дополнительно 3 события, с энергией выше 100 ТэВ.

Таким образом, число кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы составило 10 событий. Одно из этих событий имеет восстановленную энергию порядка 1 ПэВ. Одно событие восстановлено как событие из-под горизонта с зенитным углом 109° . По результатам работы опубликована статья №1 в списке публикаций.

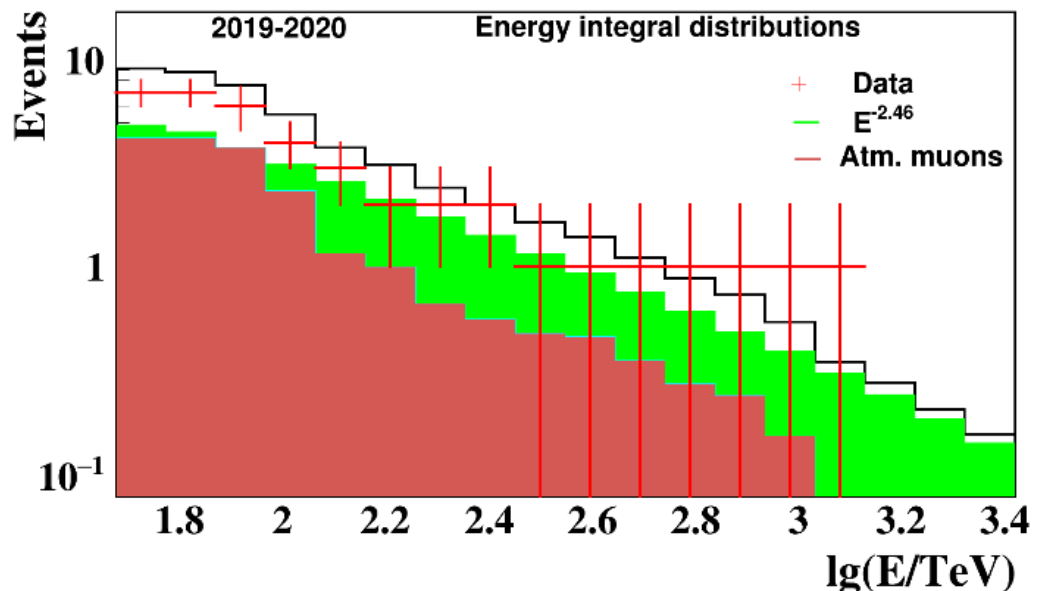


Рисунок 3. Интегральные распределения выделенных событий по энергии (крестики) и ожидаемых событий от атмосферных мюонов (коричневая гистограмма) и от диффузного потока астрофизических нейтрино (зеленая гистограмма)

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

В 2021 году на установке Троицк ню-масс проведен сеанс измерений с использованием многопиксельного детектора, разработанного в рамках проекта TRISTAN. Для интеграции этого детектора в систему сбора данных была проведена модификация системы сбора данных и разработка нового сервиса детектора. В силу того, что на установке используется модульная система управления набором данных, разработанная в прошлых годах, интеграция не потребовала замены всей системы.

Схема работы системы сбора данных представлена на рисунке 4.

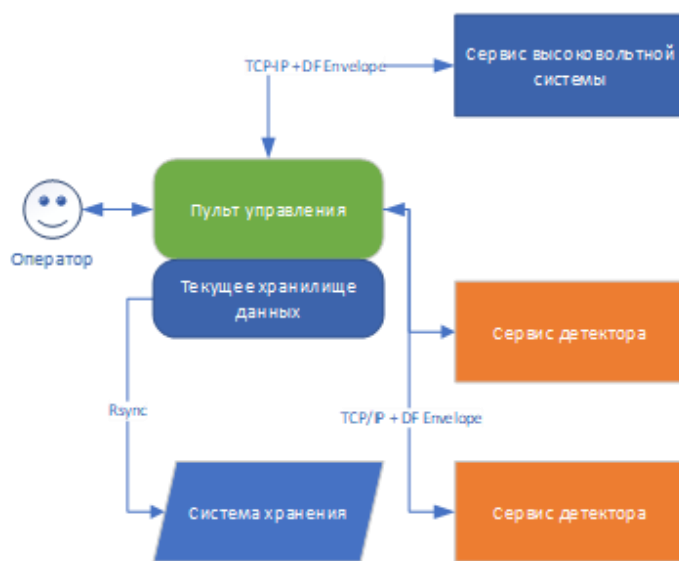


Рисунок 4. Схема системы сбора данных

Для интеграции нового детектора был разработан новый сервер устройства, поддерживающий уже созданный протокол. Остальная часть системы (сервис высоковольтной системы и система управления и хранения данных) работает без изменений.

Для многопиксельного детектора использовалась электроника AFI TQDC-16, разработанная для оцифровки событий на ускорителях. В отличие от использованной ранее электроники RudShel LAN10-12-PCI, в новой электронике используется запись коротких кадров по триггеру на каждом канале (в LAN10-12PCI было необходимо записывать длинные кадры и потом выделять из них события программно). Несколько типичных форм сигналов представлены на рисунке 5.

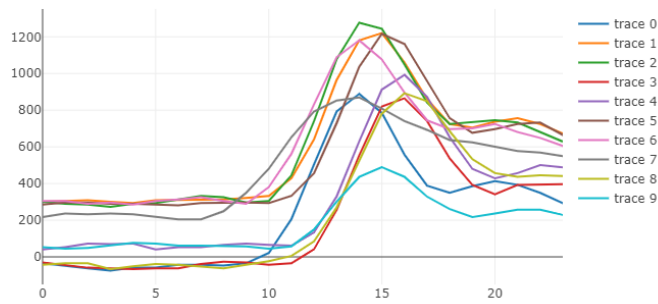


Рисунок 5. Типичные кадры с AFI TQDC-16

Использование аппаратного триггера и значительно более короткая длительность сигнала с детектора TRISTAN (до 100 нс против 4 мкс на поверхностно-барьерном детекторе) позволяют существенно уменьшить вклад наложений событий в скорость счета. Но в процессе измерений были обнаружены шумовые наводки, которые будут удалены при помощи статистического временного анализа, описанного в [2]. Анализ формы импульса, разработанный в 2019 и 2020 годах будет использован для определения и фильтрации аномальных событий.

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

В 2020 году был закончен первый, а в 2021 году был завершен второй физический набор данных для мишень-детектора WAGASCI и детектора Baby MIND. Разработаны алгоритмы квалификации собранных данных и алгоритмы вычисления количества мюонных (рисунок 6) и нейтринных (рисунок 7) событий на интегральный поток протонов.

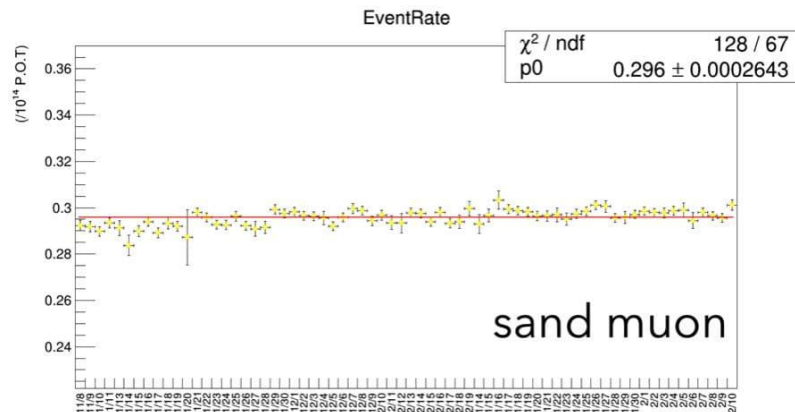


Рисунок 6. Результаты определения количества событий в детекторе Baby MIND на количество протонов на мишень для событий, определенных как мюоны

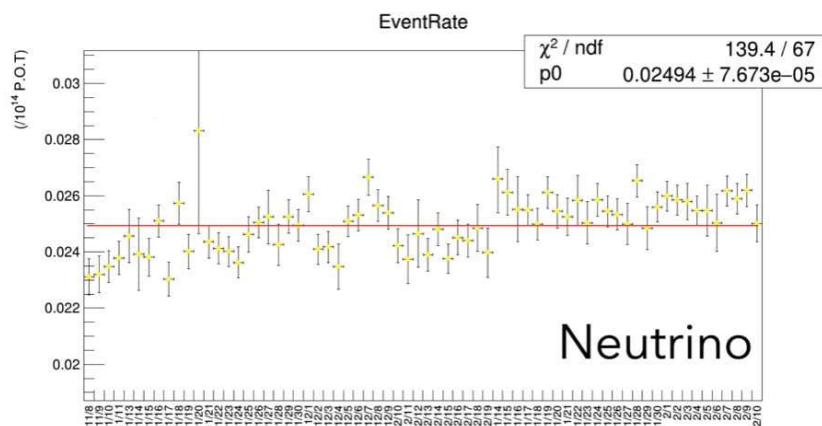


Рисунок 7. Результаты определения количества событий в детекторе Baby MIND на количество протонов на мишень для событий, определенных как нейтрино

Были оптимизированы, алгоритмы вычисления импульсов зарегистрированных мюонов. Новые алгоритмы позволяют восстанавливать значение импульсов мюонов двумя способами:

- 1) методом восстановления потерянной энергии в детекторе;
- 2) методом отклонения мюонов в магнитном поле детектора Baby MIND.

Был проведен анализ и реконструкция событий в нейтринном детекторе мишень-детекторе WAGASCI и детекторе Baby MIND на основе данных, накопленных за первый физический сеанс. Получено разрешение восстановления импульса мюонов в зависимости от величины импульса и угла вылета мюонов из мишень детектора WAGASCI. Измерен спектр мюонов, образованных в CCQE взаимодействиях нейтрино, на основе данных, накопленных за первый физический сеанс на нейтринном пучке T2K. Диапазон измеренных импульсов составил 350 - 1600 МэВ/с с пиком в 500 МэВ/с (рисунок 8). Полученный спектр согласуется с результатами полученными методом Монте-Карло.

По результатам работы опубликована статья №2 в списке публикаций.

Reconstructed P_μ

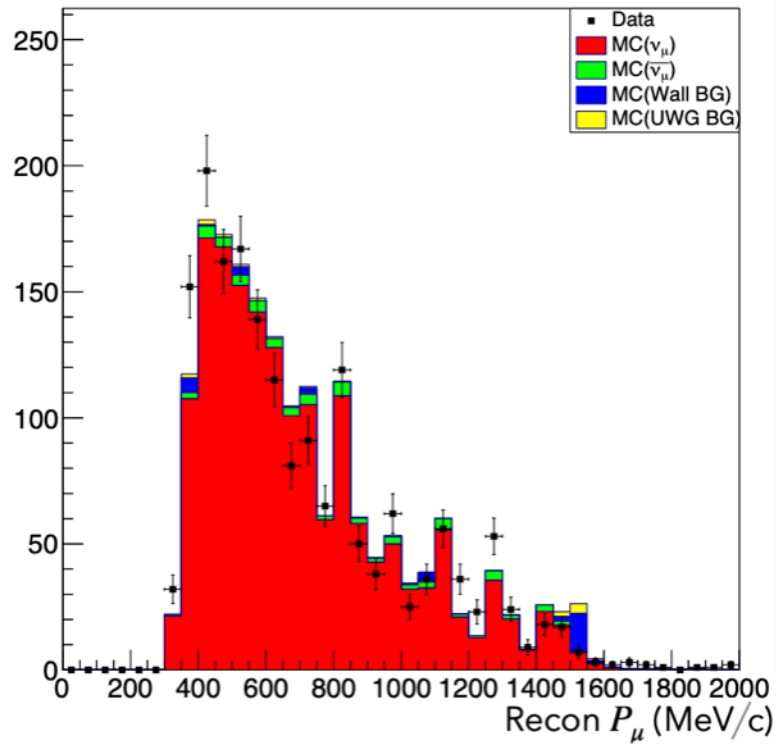


Рисунок 8. Спектр мюонов, зарегистрированных в детекторе Baby MIND в ходе первого физического сеанса с ноября 2019 года по февраль 2020 года с пучком в нейтринной моде

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.

Массовый состав является одной из измеряемых характеристик для регистрируемых широких атмосферных ливней (ШАЛ). Массовый состав космических лучей напрямую связан с механизмами ускорения в источниках, с распространенностью последних во Вселенной, а также с процессами распространения космических лучей. В силу значительных флуктуаций широких атмосферных ливней нельзя однозначно определить, какая частица инициировала зарегистрированное событие. Вместо этого применяются методы, позволяющие определить среднюю массу в ансамбле событий, при этом чаще всего весь доступный набор экспериментальных данных делится на одинаковые отрезки по энергии.

В коллаборации Telescope Array разработан метод исследования массового состава, основанный на анализе данных наземной решетки эксперимента. В нем набор из 16 переменных, чувствительных к составу первичных частиц, преобразуется в переменную ξ ,

которая непосредственно используется для усреднения по ансамблю событий и определения средней атомной массы $\langle \ln A \rangle$.

В рамках НИР было проведено обновление предыдущего результата работы [1] с использованием данных за 12 лет работы наземной решетки эксперимента Telescope Array. Кроме того, был построен набор модельных Монте-Карло событий для модели адронных взаимодействий QGSJETII-04, который дополнил ранее существующий набор для модели QGSJETII-03. Для каждой из моделей была построена независимая оценка массы первичных частиц $\langle \ln A \rangle$ как функция от энергии, представленная на рисунке 9.

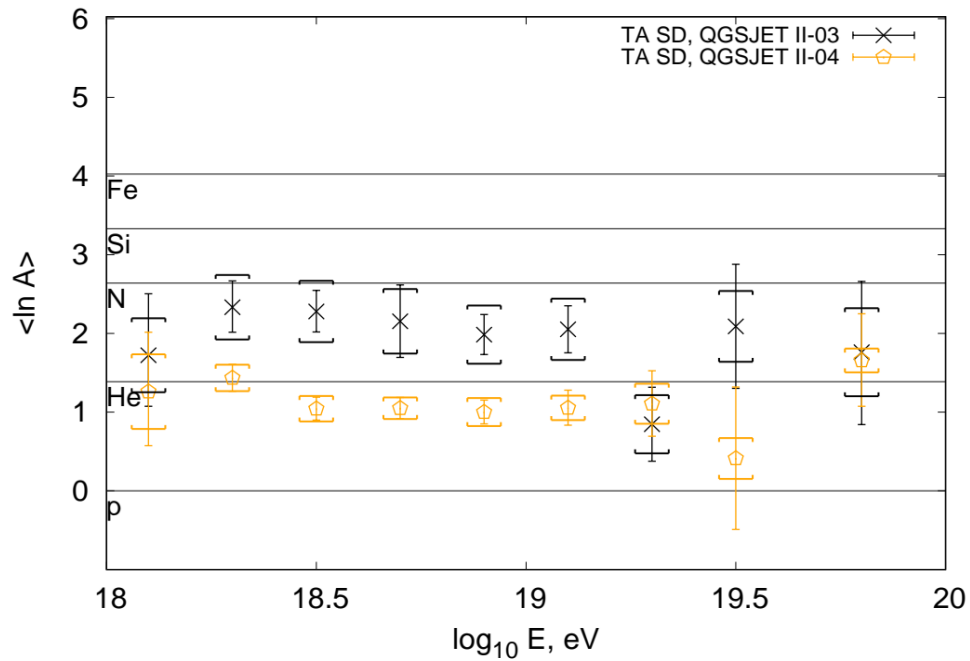


Рисунок 9. Масса первичных частиц $\langle \ln A \rangle$ как функция от энергии события. Черным цветом показан результат для модели QGSJETII-03, оранжевым цветом — для модели QGSJETII-04

Также в рамках данной работы оценено влияние так называемого «мюонного избытка» на результаты измерения массы первичных частиц. Известно, что модели адронных взаимодействий являются неполными и не описывают с достаточной степенью точности адронную компоненту ливня, что выражается в недостаточном количестве мюонов, «рождающихся» в модельных ШАЛ по сравнению с экспериментальными измерениями. Для оценки данного эффекта из набора наблюдаемых, используемых для тренировки усиленных деревьев решений, были исключены переменные, которые зависят от мюонного состава ШАЛ.

Для улучшения точности определения массового спектра космических лучей также были разработаны две нейронные сети. Первая из них, классификатор, анализирует

индивидуальные события. Её архитектура изображена на рисунке 10 и состоит из четных блоков, ответственных за анализ различных типов информации. Вторая нейросеть предсказывает массовый состав ансамбля событий, базируясь на предсказаниях классификатора. Применение данных нейросетей позволило получить рекордно низкую ошибку, 7%, определения долей различных элементов в ансамбле событий (в предположении четырех возможных компонент) на Монте-Карло симуляции данных. Типичные результаты предсказаний приведены на рисунке 11.

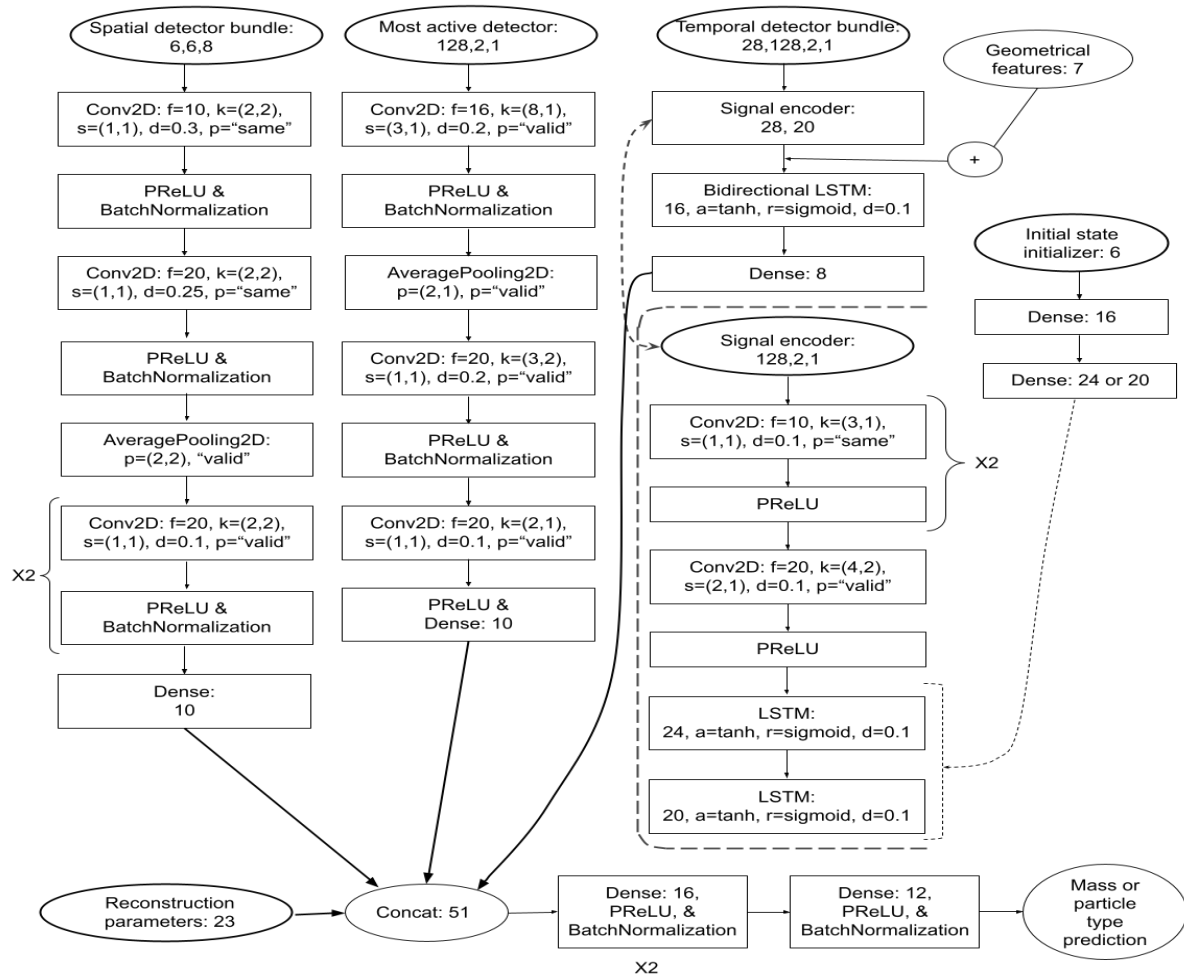


Рисунок 10. Архитектура нейронной сети. Поток данных показан стрелками. Имена слоев даны в соответствии с TensorFlow API. Сокращения: «f» - количество фильтров, «k» - размер ядра, «s» - шаги, «d» - коэффициент dropout (выпадения), «p» - размер пула или отступа, «a» - функция активации, «r» - рекуррентная функция активации, число после двоеточия - форма входных данных или количество единиц

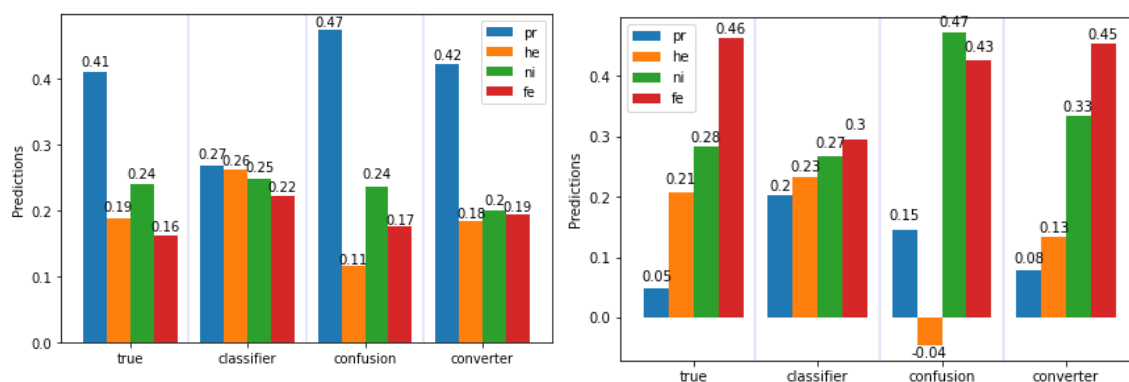


Рисунок 11. Результаты предсказания состава ансамбля для двух различных смесей.

По вертикальной оси отмечены доли элементов. На каждом рисунке четыре гистограммы слева направо соответствуют 1) истинным пропорциям частиц, 2) усредненным предсказаниям нейросети, анализирующей индивидуальные события, 3) предсказаниям, скорректированным с помощью матрицы неточностей, и 4) предсказаниям нейросети для ансамбля событий

Также, нейросеть архитектурой, аналогичной классификатору, была натренирована на различение атмосферных ливней инициированных фотонами и адронами. С помощью этого удалось получить предварительное ограничение на поток космических фотонов.

По результатам работы опубликованы статьи № 3 в списке публикаций.

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

Было проведено исследование модели ранней темной энергии на предмет соответствия космологическим данным: анизотропии реликтового излучения Планк и SPT, данным Слоановского обзора неба коллаборации BOSS, измерениям крупномасштабной структуры Вселенной с помощью гравитационного линзирования (DES, KiDS, HSC). Темная энергия в данном исследовании была смоделирована с помощью скалярного поля с периодичным потенциалом, возникающим в моделях с аксионоподобными частицами. В результате были получены новые сильные ограничения на космологические параметры (рисунок 12).

В результате исследования было показано, что ранняя темная энергия является предпочтительным сценарием, в рамках которого удастся согласовать значение постоянной Хаббла с наблюдениями в локальной Вселенной. Другим важным результатом явилось то, что учет измерений параметра Хаббла в локальной Вселенной незначительно сказывается на амплитуде линейных возмущений плотностей материи. Предыдущие исследования указывали на несовместность модели ранней темной энергии с наблюдениями крупномасштабной структуры Вселенной. Это объясняется избыточным

линзирующим сигналом в картах обсерватории Планка на малых угловых масштабах. В настоящем исследовании на малых угловых масштабах были использованы данные телескопа SPT, которые не имеют подобной аномалии, что способствует более надежному измерению параметров.

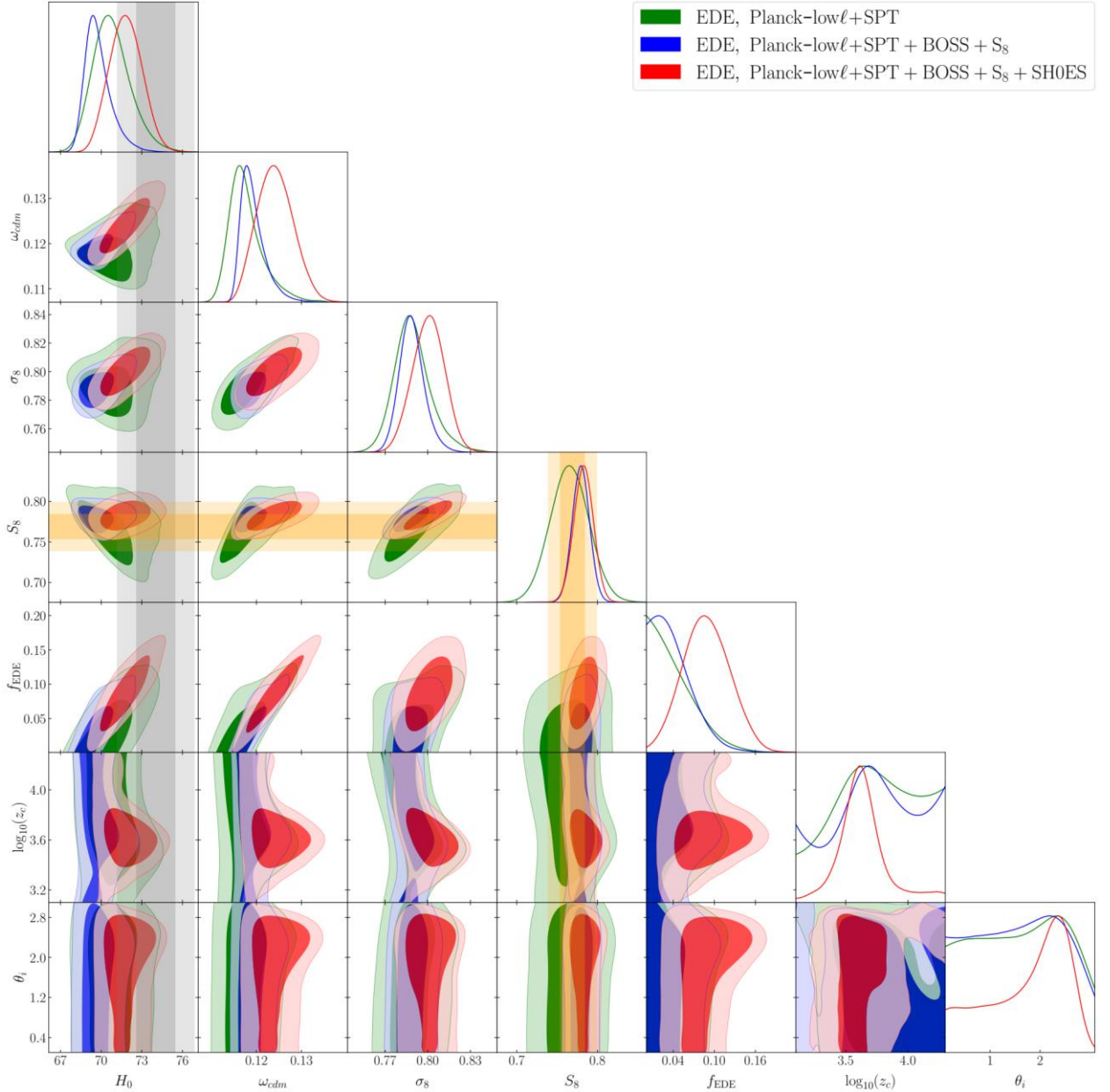


Рисунок 12. Космологические ограничения в модели ранней темной энергии по наблюдениям анизотропии реликтового излучения (Planck-lowl+SPT), данным Слоановского обзора неба (BOSS), измерениям крупномасштабной структуры Вселенной с помощью гравитационного линзирования (S_8) и измерению постоянной Хаббла в локальной Вселенной (H_0)

Также была использована аналитическая модель для описания скучивания галактик в слабо-нелинейном режиме, основанная на космологической теории возмущений. Данному вычислению следует приписать теоретическую ошибку, связанную с

пренебрежением вкладов старших порядков. Учет этих ошибок необходим для надежного измерения космологических параметров и использование всего потенциала предстоящих глубоких обзоров неба (DESI, Euclid).

Предложен новый эффективный способ вычисления теоретической ошибки. Новый алгоритм базируется на использовании матрицы ковариации с теоретической ошибкой и соответствующей модификации теоретической модели. На примере N-точечных симуляций LasDamas с высоким разрешением было показано, что данный метод позволяет извлечь все космологические параметры в пределах статистической неопределенности (рисунок 13). Использование теоретической ошибки в анализе данных обладает несколькими преимуществами. Во-первых, новый формализм позволяет использовать наблюдаемые величины вплоть до астрофизических (нелинейных) масштабов, где теория возмущения заведомо неприменима. Это позволяет избежать трудоемкой процедуры поиска максимального волнового числа до которой применимы теоретический вычисления, которая неустойчива по отношению к систематическим ошибкам. Во-вторых, данный метод позволяет смоделировать неопределенность вычислений в рамках теории возмущений с помощью гладкой функции на всем интервале импульсов, что обеспечивает максимальное количество извлекаемой космологической информации.

Новый алгоритм анализа данных с теоретической ошибкой может быть использован при обработке данных крупномасштабной структуры Вселенной следующего поколения (DESI, Euclid). Формализм теоретической ошибки позволит получить надежные космологические ограничения уже в ближайшем будущем.

По результатам работы опубликована статья № 4 в списке публикаций.

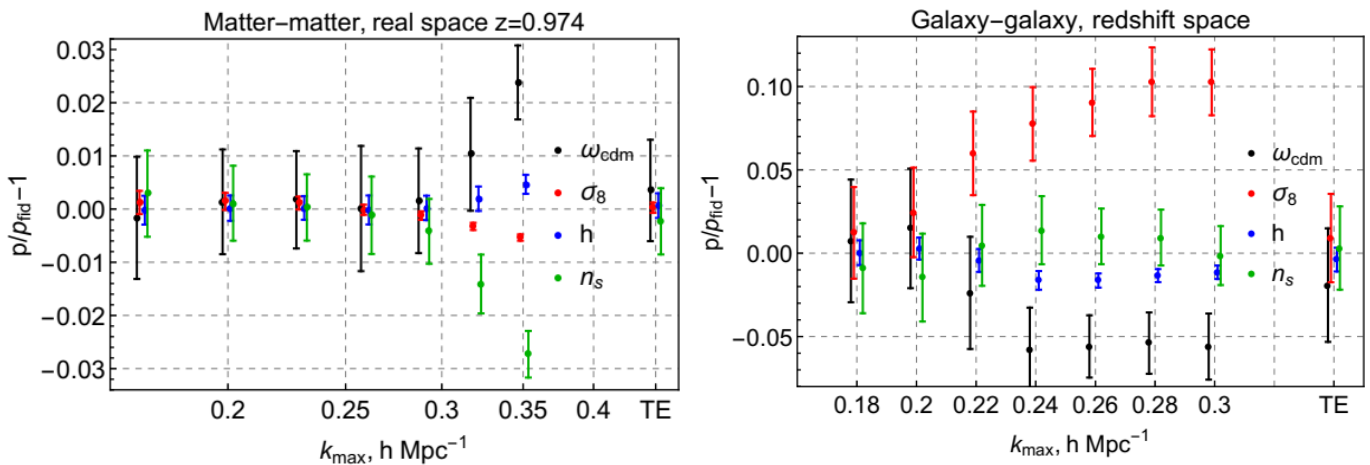


Рисунок 13. Относительная ошибка измерения космологических параметров с помощью стандартной процедуры анализа спектра вплоть до волнового числа $k_{\max}$ и с помощью матрицы ковариации с теоретической ошибкой (TE) для темной материи в реальном пространстве (слева) и галактик в пространстве красных смещений (справа)

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

Анализ теории на линеаризованном уровне в рамках изучения космологических сценариев в скалярно-тензорных теориях дает необходимый набор критериев, позволяющий конструировать решения, которые обладают глобальной устойчивостью и могут служить базой для реалистичных моделей ранней Вселенной, согласующихся с наблюдательными данными.

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

Анализ полученных критериев устойчивости показал, что, как и в случае ранее изученной расширенной теории Хорндески, которая является одним из подклассов DHOST теорий, существенным параметром модели становится скорость звука дополнительного скалярного поля. Было показано, что 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. Однако, в отличие от расширенных теорий Хорндески, было доказано, что в DHOST теориях существует подкласс, в котором при наличии дополнительного скалярного поля со скоростью звука равной скорости света не возникает сверхсветовых мод в скалярном секторе. Данный подкласс не пересекается с подклассом расширенных теорий Хорндески, что согласуется с ранее полученными результатами.

Таким образом, требование отсутствия сверхсветовых мод на фоне устойчивого космологического решения в многокомпонентном случае DHOST теории 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 со старшими производными типа DHOST теорий.

По результатам работы опубликована статья № 5 в списке публикаций.

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

Установка детектора FIT в экспериментальной зоне ALICE была завершена в июне 2021 года, в октябре 2021 года был проведён пробный запуск ускорителя LHC. Корректная работа детектора в ходе пробного запуска LHC требовала проведение первичной калибровки фотосенсоров на основании данных, полученных в ходе характеристики МКП-ФЭУ и отражённых в отчётах за предыдущие отчётные периоды, а также первичной калибровки блоков считывающей электроники. Для этого, помимо процедуры тестирования работоспособности блоков, была проведена подстройка нулевой линии формирователей со следящим порогом (ФСП) подсистем FT0, FV0 и FDD детектора FIT. Целью процедуры являлась минимизация разброса времени регистрации сигналов широкого диапазона амплитуд (“time walk”) при поддержании временного разрешения регистрации сигналов амплитудой 1-2 MIP ниже собственного временного разрешения детектора (25 пс для FT0 и 250 пс для FV0).

На рисунке 14 представлен результат подстройки нулевой линии ФСП в 132 каналах считывания для подсистем FV0 и FDD. Медианный показатель временного разрешения для сигналов 2 MIP кратно меньше, а параметр time-walk – сопоставим с собственным временным разрешением детектора, что является хорошим результатом калибровки ФСП. Аналогичные показатели для подсистемы FT0: временное разрешение для 1 MIP – около 15 пс, time-walk – не более 25 пс.

Подстройка параметров ФСП и описанное в прежних отчётах выравнивание коэффициентов умножения МКП-ФЭУ позволило детектору FIT успешно участвовать в наборе технических данных во время пробного запуска LHC. В ходе протон-протонных столкновений, была проведена прецизионная (с точностью лучше $\pm 5\%$) калибровка коэффициентов умножения МКП-ФЭУ в магнитном поле индукцией $\pm 0,2$ Т, а также корректировка диапазонов оцифровки АЦП.

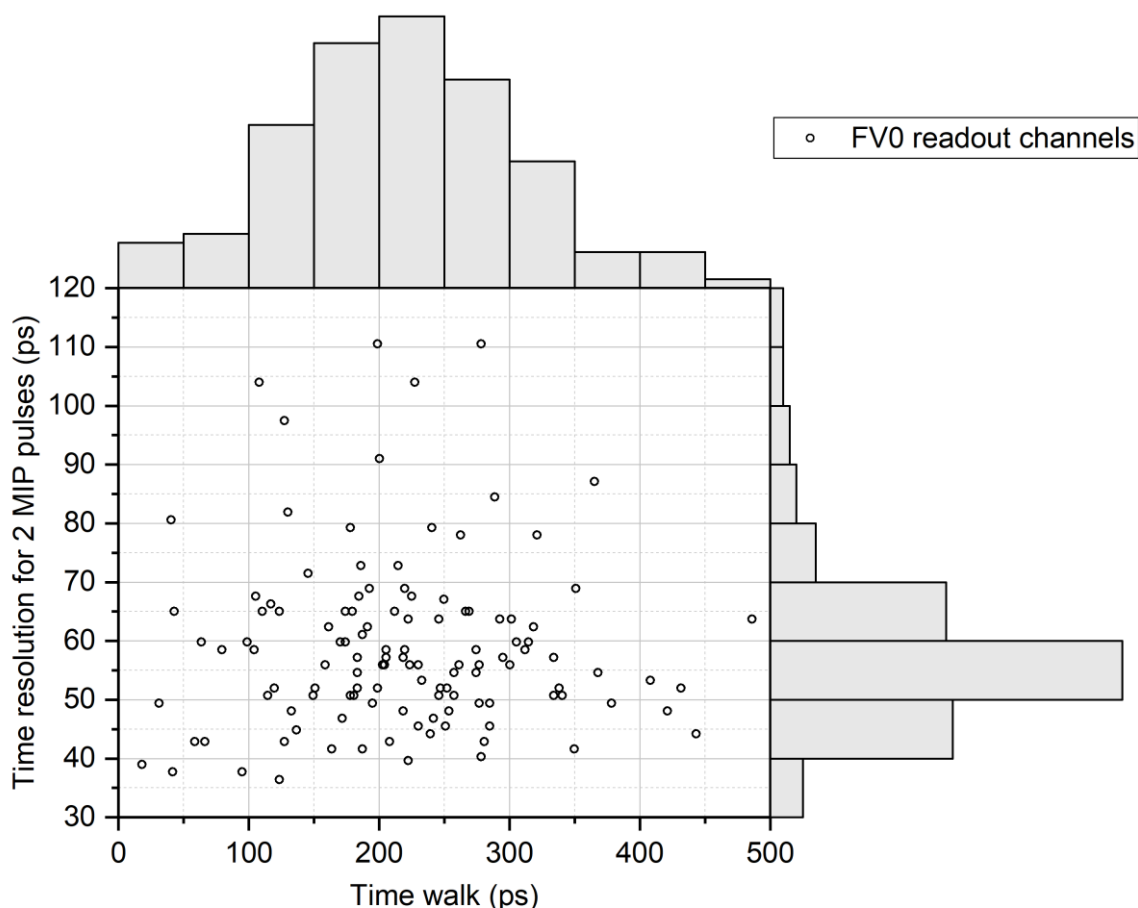


Рисунок 14. Зависимость разброса времени регистрации сигналов широкого диапазона амплитуд (time-walk) от временного разрешения при регистрации сигналов амплитудой 2 MIP для подсистем FV0 и FDD

По завершении калибровки регистрирующих подсистем детектора, была проведена оптимизация равномерности распределения оптических сигналов в лазерной системе калибровки (ЛСК) FT0. Помимо системы аттенюации и мониторинга интенсивности света, ЛСК состоит из дерева оптических разветвителей, позволяющих единовременно доставить световые импульсы на фотокатоды 208-ми квадрантов МКП-ФЭУ. Ввиду короткой длины волны света используемого лазера ($\lambda = 440$ нм), равномерное деление света восьмикаскадным деревом оптических сплиттеров не представляется возможным. Поэтому, финишное выравнивание интенсивности оптических сигналов на каждом квадранте МКП-ФЭУ производилось с помощью локальных оптических аттенюаторов нейтральной плотности. Распределение калибровочных сигналов со всего детектора FT0 до и после оптимизации расположения локальных аттенюаторов представлено на рисунке 15.

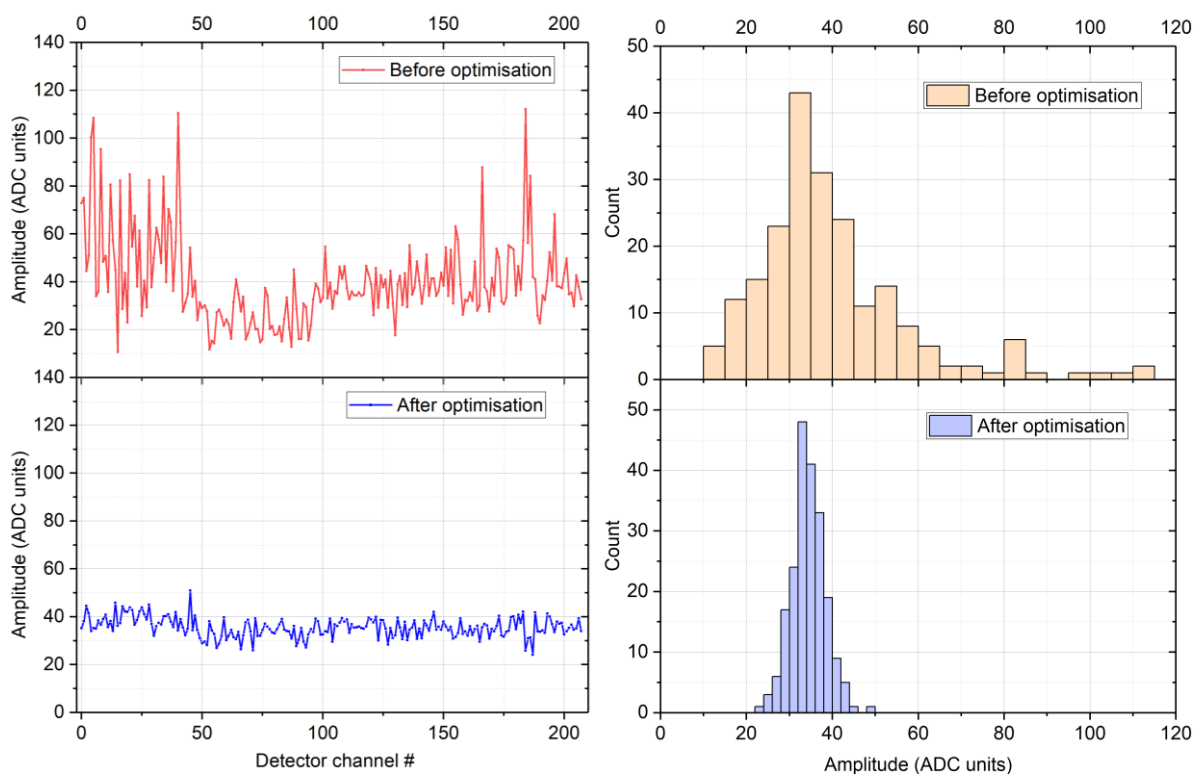


Рисунок 15. Распределение интенсивности калибровочных сигналов со всего детектора FT0 до и после оптимизации расположения локальных аттенюаторов

Стоит отметить, что для наилучшей долговременной стабильности показаний детектора при работе ЛСК, интенсивность света на всех 208-ми выходах регулируется одним аттенюатором на выходе лазерной головки. Поэтому, с учётом порога срабатывания считывающей электроники детектора FIT (3 мВ) и предела насыщения квадрантов МКП-ФЭУ в области засветки ЛСК (250 мВ), проведённая процедура оптимизации позволила увеличить полезный диапазон работы ЛСК с 1:6 до 1:40, то есть в 6,7 раза. Это существенно уменьшит время, необходимое для будущих калибровок детектора, поскольку, имея схожую амплитуду, все каналы могут калиброваться одновременно, независимо от настроек общего аттенюатора.

По результатам работы опубликована статья № 6 в списке публикаций.

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

В 2021 году были проведены работы по определению выхода нейтральных пионов по их распаду на два гамма кванта в столкновениях Ag+Ag при энергии пучка 1.23 ГэВ на нуклон с использованием электромагнитного калориметра ECAL. Для отбора гамма-квантов были использованы следующие критерии:

- нет срабатывания RPC детектора
- нет совпадения ни с одним треком заряженной частицы
- $0.9 < \beta < 1.1$
- Энерговыведение в калориметре $E > 100$ МэВ

Фотоны в одном событии комбинировались во все возможные пары, и в предположении, что данная пара фотонов является продуктом распада частицы, определялись ее масса, поперечный импульс p_t и псевдобыстрота y . Исходя из угловых размеров отдельных ячеек детектора ECal, отбирались только фотоны, угол между которыми был больше 10° . Во всех интервалах по p_t и y строился спектр масс двух гамма квантов. Для вычитания нескоррелированного комбинаторного фона использовался метод смешанных событий, в котором гамма кванты, объединяемые в пары, выбирались из разных событий. Данный фон масштабировался и вычитался из спектра. Путем интегрирования пика, соответствующего распадам нейтральных пионов, в каждом интервале p_t - y определялся их выход (рисунок 16).

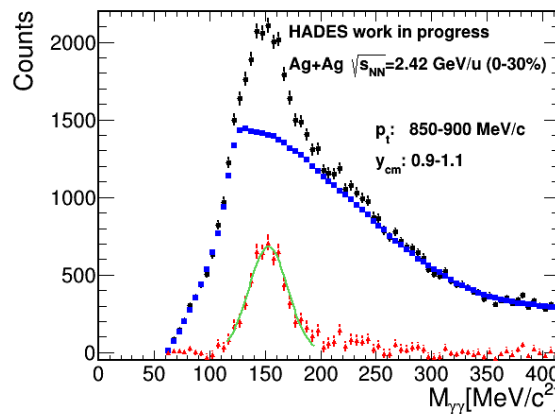


Рисунок 16. Пример спектра инвариантных масс двух гамма квантов. Черные точки соответствуют измеренному спектру двух гамма квантов, синие — комбинаторный фон, красные — реконструированный сигнал соответствующий массе от распада нейтрального пиона

Поправки на эффективность и аксептанс электромагнитного калориметра рассчитывались с помощью Монте-Карло моделирования. Для этого с помощью кода UrQMD генерировались π -мезоны с реалистичным распределением по углам вылета и по импульсам. Продукты их распада — γ -кванты — транспортировались с помощью кода Geant через все детекторы эксперимента HADES, и определялся отклик детектора ECal. Полученные данные анализировались в точности так же, как реальные экспериментальные данные, и отношение восстановленного количества пионов к первоначально сгенерированному давало поправку на аксептанс и эффективность

детектора. Данный метод учитывает не только геометрический аксептанс детектора, но и его эффективность, так как расчет отклика детектора проводился с учетом его разрешения и, значит, вероятности сигнала оказаться ниже порога срабатывания (рисунок 17).

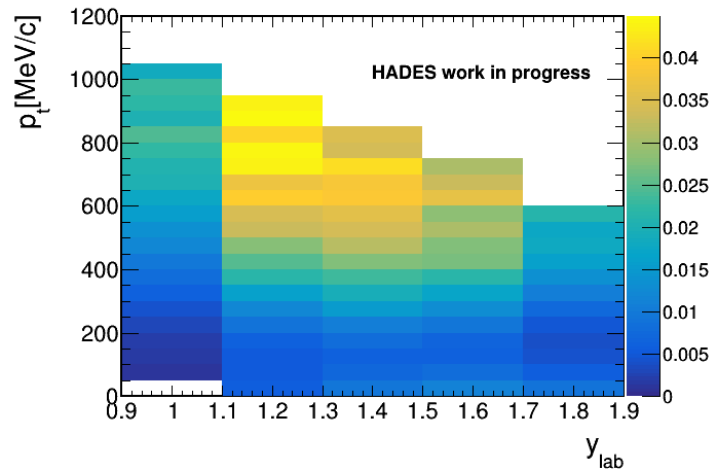


Рисунок 17. Аксептанс регистрации π^0 -мезонов детектором ECal

Дополнительная поправка к эффективности детектора была введена после анализа отклика детектора на электроны и позитроны. Они вызывают в детекторе такой же электромагнитный ливень, как и γ -кванты, но, в отличие от γ -квантов, регистрируются всеми детекторами HADES, а значит, для них можно определить эффективность регистрации не только из моделирования, но и из экспериментальных данных. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показало, что реальная эффективность ECal составляет ~ 0.85 . Поэтому в анализе экспериментальных данных вес каждого регистрируемого γ -кванта был увеличен в $1/0.85$ раза.

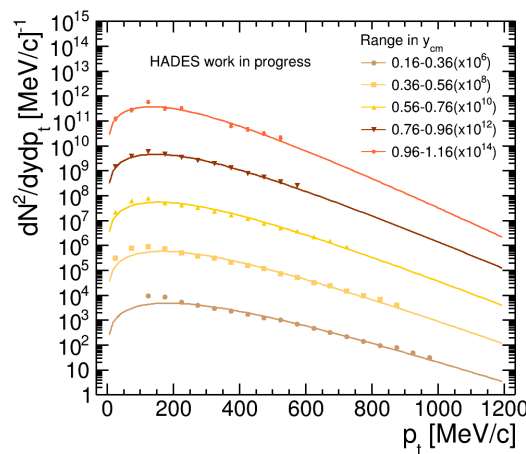


Рисунок 18. Зависимость выхода нейтральных пионов от поперечного импульса для разных интервалов по псевдобыстроте

Выходы нейтральных пионов в зависимости от поперечного импульса и быстроты с учетом эффективности и аксептанса ECal изображены на рисунке 18. Для экстраполяции спектров в область поперечных импульсов, не покрытых аксептансом детектора, полученные спектры аппроксимировались распределением Больцмана:

$$\frac{dN}{dp_t} = C p_t m_t e^{-\frac{m_t}{T}},$$

где p_t — поперечный импульс, m_t — т.н. поперечная масса, T — температура. Путем интегрирования данных зависимостей были получены полные выходы нейтральных пионов в каждом интервале по псевдобыстроте (правая часть графика на рисунке 19). Исходя из симметрии столкновения, можно отразить полученный график относительно быстроты фэйрбола (левая часть графика на рисунке 19). В первом приближении данную зависимость можно аппроксимировать распределением Гаусса. Интегрирование полученной зависимости дает выход π^0 -мезонов в полный телесный угол. С учетом того, что анализируемые данные были отобраны по центральности столкновения 0-30%, можно рассчитать выход пионов на одну частицу-партисипант столкновения. Полученное значение $(4.1 \pm 1) \cdot 10^{-2}$ согласуется с данными других экспериментов в пределах погрешностей. Ошибка измерения обусловлена систематикой, связанной с определением эффективности детектора. Для уточнения полученного результата необходимо дальнейшее исследование эффективности электромагнитного калориметра.

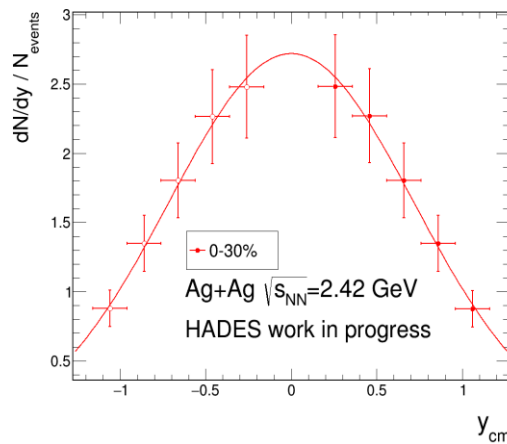


Рисунок 19. Зависимость выхода нейтральных пионов от псевдобыстроты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2021 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результат НИР по задаче 1 вошел в число важнейших достижений Института в 2021 году.

Выполнена обработка набора данных Baikal-GVD с 2018 по 2021 годы. Было выделено 10 каскадных событий с энергией выше 60 ТэВ – кандидатов на сигнал от астрофизических нейтрино.

Осуществленная интеграция многопиксельного детектора, разработанного в рамках проекта TRISTAN, в существующий комплекс аппаратного и программного обеспечения. Благодаря введению новой электроники удалось существенно понизить вклад наложенный событий в скорость счета.

Проведен второй сеанс на нейтринном пучке эксперимента T2K, измерен спектр рождающихся мюонов. Разработаны и протестированы алгоритмы восстановления треков заряженных частиц и восстановления импульсов мюонов, образованных при взаимодействии нейтрино с пластиком и водой в мишени WAGASCI.

Исследована масса первичных частиц космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array для моделей адронных взаимодействий QGSJETII-03 и QGSJETII-04. Исследована зависимость полученного результата от неопределенностей адронных моделей, связанных с моделированием мюонной компоненты широких атмосферных ливней.

Разработан метод определения массового спектра космических лучей ультравысоких энергий в эксперименте Telescope Array при помощи цепи из двух нейронных сетей. Получено предварительное ограничение на поток космических фотонов.

Была исследована модель ранней темной энергии с помощью данных Южного полярного телескопа, космической обсерватории Планк и данных крупномасштабной структуры Вселенной. Было показано, что данная модель способна согласовать измерения постоянной Хаббла с наблюдениями в локальной Вселенной. Разработан новый алгоритм анализа данных крупномасштабной структуры Вселенной с использованием теоретической ошибки вычислений в рамках космологической теории возмущений.

Получены новые ограничения на параметры скалярно-тензорных теорий со старшими производными типа DHOST теорий, являющихся обобщением ранее изученных расширенных теорий Хорндески, в контексте построения реалистичных моделей ранней Вселенной. Указанные ограничения были получены из анализа линеаризованной теории и требования отсутствия сверхсветовых мод, распространяющихся над космологическим

фоном 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 в контексте феноменологически состоятельных моделей.

Проведена калибровка регистрирующих каналов детектора FIT эксперимента ALICE. После проведенной подстройки нулевой линии формирователей со следящим порогом, ошибки, вносимые считывающей электроникой, не превышают собственное временное разрешение детектора. В результате, детектор FIT успешно участвовал в наборе технических данных во время пробного запуска LHC. Выравнивание интенсивности выходов лазерной системы калибровки детектора с помощью локальных аттенюаторов нейтральной плотности позволило увеличить динамический диапазон системы в ~ 7 раз, что существенно ускоряет процедуру будущих калибровок.

Произведен анализ данных детектора ECal эксперимента NADES, полученных в столкновениях ядер серебра при энергии пучка 1.23 ГэВ на нуклон. Получены предварительные результаты по выходу нейтральных пионов по их распаду на два гамма-кванта при центральности столкновений 0-30%. Для уточнения полученных данных необходимо более детальное исследование эффективности детектора ECal.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abbasi R.U. 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.
2. Nozik A. Statistical time analysis for regular events with high count rate, e-print arxiv:1810.07024.
3. Chudaykin A.S., Ivanov M.M. Measuring neutrino masses with large-scale structure: Euclid forecast with controlled theoretical error, JCAP V. 2019, No 11, p. 034 (2019).

ПУБЛИКАЦИИ

1. Allakhverdyan A., ..., Shelepov M.D., ... et al The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades, PoS V395, 1144 (2021).
2. Abe K., ..., Mefodiev A., ... et al Measurements of ν_μ and $\nu_\mu + \nu_\mu$ charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV, PTEP, vol. 2021 (2021), 043C01.
3. Zhezher Y. [for Telescope Array Collaborations], Cosmic-ray mass composition with the TA SD 12-year data, PoS V395, 300 (2021).
4. Chudaykin A., Gorbunov D. and Nedelko N. Exploring Early Dark Energy solution to the Hubble tension with Planck and SPTPol data, Phys. Rev. D 103, 043529 (2021).
5. Mironov S., Rubakov V., Volkova V. Superluminality in DHOST theory with extra scalar, JHEP 04, 035 (2021).
6. Melikyan Y.A. et al. Characteristic properties of Planacon MCP-PMTs, JINST 16 P12032 (2021).

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Baikal-GVD – Байкальский глубоководный нейтринный эксперимент кубокилометрового масштаба

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

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

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ОМ – оптический модуль

ф.э. – фотоэлектрон

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

эВ – электрон-Вольт

DHOST – Degenerate Higher Order Scalar-Tensor, тип теорий гравитации

ALICE – A large ion collider experiment

FIT – Fast interaction trigger

MIP – minimum ionizing particle

МКП – микроканальная пластина

ЛСК – лазерная система калибровки