

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

УДК 539.1, 539.12, 539.123

Per. № 122041100011-7

Per. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

М.В. Либанов

«28» декабря 2024 г.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

122041100011-7

НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА, НЕЙТРИННАЯ, ГАММА И
ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ, ФИЗИКА
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ФИЗИКА И ТЕХНИКА НЕЙТРИННЫХ
ТЕЛЕСКОПОВ В НИЗКОФОНОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ
ЛАБОРАТОРИЯХ

(итоговый за 2024 год)

ФЦП

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

Г.И. Рубцов
«28» декабря 2024 г.

Москва 2024 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Проф. РАН,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Г.И. Рубцов
(введение, заключение, раздел 14)

Исполнители:
Гл. науч. сотр.,
чл.-кор. РАН,
д-р физ.-мат. наук

_____ 28.12.2024
подпись, дата

Г.В. Домогацкий
(разделы 1 - 3)

Гл. науч. сотр.,
акад. РАН,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

В.Н. Гаврин
(разделы 4, 5)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Л.Б. Безруков
(раздел 6)

Науч. сотр.,
канд. техн. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

В.Н. Руденко
(раздел 7)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Н.Ю. Агафонова
(разделы 8, 9)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Ю.В. Стенькин
(разделы 10, 11, 14)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Б.К. Лубсандоржиев
(разделы 10, 11, 14)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

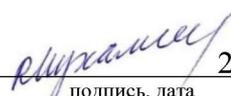
А.М. Гангапшев
(раздел 12)

заведующий филиалом
БНО ИЯИ РАН,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

В.Б. Петков
(разделы 8, 13, 19)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Р.А. Мухамедшин
(разделы 15 - 17)

Вед. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.С. Лидванский
(раздел 18)

РЕФЕРАТ

Отчёт 127 стр., 1 кн., 41 рис., 6 табл., 86 источн., 1 прил.

НЕЙТРИНО, МЮОН, БАЙКАЛЬСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, КЛАСТЕР, МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНТЕ КАРЛО, КОРСИКА, ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД, ИСТОЧНИКИ, КАСКАДЫ, НЕЙТРИННАЯ КАРТА НЕБА, АСТРОФИЗИКА, КАСКАД, ТРЕК, ЭНЕРГИЯ.

Объектами исследования являются космические лучи, астрофизические нейтрино, нейтрино и антинейтрино от искусственных источников, нейтринные осцилляции и гравитационные волны.

Цель работы - поиск и исследований потоков астрофизических нейтрино высоких энергий, поиск короткобазовых нейтринных осцилляций и новых свойств нейтрино, поиск нейтрино от сверхновых, регистрации нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд, повышение чувствительности пропорциональных счетчиков, измерение потока и химического состава космических лучей сверхвысоких энергий

В работе использованы методы повышения чувствительности регистрирующей аппаратуры, моделирования детекторов, обработки и анализа экспериментальных и модельных данных.

В процессе работы проводились разработка и эксплуатация детектирующей аппаратуры для экспериментов Baikal-GVD, ББНТ, эксперимента по поиску солнечных адронных аксионов, разработка моделей экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных.

В результате исследования был установлен и запущен 13й кластер Baikal-GVD, разработана модель для текущей конфигурации телескопа, проверена возможность решения галлиевой аномалии через осцилляционные переходы антинейтрино в нейтрино, открыт ряд новых астрофизических гамма-источников был установлен верхний предел на гипотетическое нарушение Лоренц-инвариантности, разработан и изготовлен новый пропорциональный счетчик из нержавеющей стали с катодом из АРМКО-железа для поиска солнечных аксионов.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем изучении диффузии и ускорения космических лучей, коллапсов сверхновых, строения Земли.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	8
1. Увеличение объема и развитие научно-технической инфраструктуры нейтринного телескопа Baikal- GVD	21
2. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD	24
3. Исследования диффузных потоков астрофизических нейтрино, поиск источников нейтрино высоких энергий, анализ данных в рамках многоканальной астрофизики и астрономии высоких энергий	26
4. Эксперименты с источниками нейтрино и антинейтрино на галлиевой мишени УНУ ГГНТ.....	29
4.1. Эксперимент BEST2 с источником ^{58}Co на трехзонной галлиевой мишени.....	29
4.1.1. Цель эксперимента BEST2	29
4.1.2. Особенности нового эксперимента BEST2.....	30
4.1.3. Разделение Ga мишени на зоны	31
4.1.4. Влияние параметров осцилляций на скорости счёта.....	33
4.1.5. Статистические ошибки измерений.....	35
4.1.6. Чувствительность к определению параметров осцилляций	37
4.1.7. Возможные результаты эксперимента BEST2.....	41
4.1.8. Радиационная активность источника.....	42
4.1.9. Выводы.....	43
4.2. Антинейтринные источники на основе изотопов из отработанного реакторного топлива.....	44
4.2.1. Цель эксперимента	44
4.2.2. Современные пределы на переходы нейтрино в антинейтрино	44
4.2.3. Источник антинейтрино	45
4.2.4. Выводы.....	46
5. Проведение физических измерений на полутонном прототипе ББНТ.....	47
6. Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле.....	50

7.	Запуск оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц ^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций	.53
7.1.	Эксплуатация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц ^{1/2} к метрическим вариациям	.....53
7.2.	Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций	.....54
7.3.	Регистрация астро-гео-физических возмущений кольцевым лазерным интерферометром (Гироскоп Саньяка)	.....55
7.4.	Задачи проекта Гироскоп Саньяка (ГС) в БНО ИЯИ РАН	.....57
7.5.	Измерение земного вращения малой моделью ГС	.....57
8.	Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино	.....59
8.1.	Детекторы для регистрации нейтрино от вспышек Сверхновых	.....59
8.2.	Предел на частоту вспышек в Галактике	.....61
8.3.	О происхождении сигналов, зарегистрированных 23.02.1987	.....62
8.4.	Непрерывный набор и обработка данных на БПСТ	.....68
9.	Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов по данным детекторов БПСТ (Баксан, Россия) и LVD (Италия, LNGS), связанных с событиями от астрофизических источников	.....70
9.1.	Экспериментальные установки LVD, БПСТ	.....70
9.2.	Поиск коррелированных сигналов	.....70
10.	Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ	.....75
11.	Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO	.....77
12.	Модернизация экспериментальной установки по поиску Солнечных аксионов: изготовление вставок из чистого железа толщиной не более 50мкм плотно примыкающих к внутренней поверхности корпуса медного пропорционального счетчика (в природном изотопном составе железа имеется ~ 2,1% изотопа Fe-57). Гамма-кванты возникающие при поглощении аксионов ядрами Fe-57 в вставке частично поглощаются в рабочем газе	

счетчика. В этом случае на спектре фона счетчика должен быть пик при энергии	
14.4. кэВ.....	79
12.1. Выбор материала корпуса счетчика и комплектующих элементов	79
12.2. Разработка конструкции счетчика	80
12.3. Изготовление деталей и приобретение компонентов счетчика.....	82
12.4. Сборка счетчика и проверка его герметичности.....	83
12.5. Подключение счетчика к газо-вакуумной системе и тестирование его электрических и фоновых характеристик	84
13. Развертывание и эксплуатация установки Ковер-3	85
14. Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий выше 200 ТэВ	87
15. Разработка модели взаимодействий адронов FANSY 2.0, воспроизводящей сравнительно более широкий круг основных экспериментальных результатов в области энергий $10^{11} - 10^{18}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; и моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях	89
15.1. Необходимость разработки новых моделей.....	89
15.2. Программный пакет FANSY 2.0	89
16. Получение характеристик фрагментационной области генерации частиц во взаимодействиях адронов космических лучей в области энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ.....	91
16.1. Необходимость изучения фрагментационной области.....	91
16.2. Экспериментальные данные и 2D-эволюция сигнатуры пространства	91
17. Моделирование развития ШАЛ от взаимодействий частиц ПККИ различного типа на основе пакета CORSIKA.....	95
17.1. Моделирование характеристик ШАЛ от ядер ПККИ.....	95
17.2. Моделирование характеристик ШАЛ от странглетов	96
18. Разработка метода регистрации локальных возмущений температуры атмосферы над установкой Ковер для оценки их вклада в вариации мюонов космических лучей и выделения событий, сопровождающих возмущения солнечного ветра или связанных с другими геофизическими процессами. Создание отдельных баз данных событий для периодов хорошей погоды и грозовой.....	99
18.1. Описание эксперимента и метода обработки данных	99
18.2. Результаты и обсуждение	104

19. Проведение набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.	123

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Увеличение объема и развитие научно-технической инфраструктуры нейтринного телескопа Baikal- GVD».

В настоящее время в мире существуют три действующих аналогичных по принципам устройства и размещения в природных средах крупномасштабных нейтринных телескопов: IceCube на Южном полюсе, Baikal-GVD в озере Байкал и проект KM3Net в Средиземном море, который находится в начальной стадии своего развития.

В 2024 году в озере Байкал был установлен новый тринадцатый кластер. С его вводом в режим регистрации данных рабочий объем телескопа достиг значения $0,6 \text{ км}^3$ в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы с энергиями выше 100 ТэВ. В течение года также были проведены работы по разработке, изготовлению и долговременных лабораторных испытаний блоков телескопа для установки 14 и 15 кластеров в 2025 году. Для обеспечения производства работ по увеличению объема телескопа был проведен комплекс работ по развитию инфраструктуры Байкальского нейтринного телескопа.

2. Задача «Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD».

Нейтринные телескопы типа Baikal-GVD – крайне сложные многопараметрические системы с не точно определенными условиями на входе и выходе системы в условиях превосходящих естественных фонов и шумов приемного тракта. Программное моделирование осуществляется расчетами методом Монте-Карло работы телескопа по регистрации нейтринных (мюонных) событий с учетом текущей геометрии телескопа, различия видов взаимодействия мюонов и нейтрино с водной средой и влияния шумов и фонов.

Физическое моделирование осуществляется с помощью стендов, где исследуются характеристики всех электронных систем сбора и передачи данных телескопа и по результатам анализа принимаются решения о способах устранения неисправностей или повышения эффективности систем.

3. Задача «Исследования диффузных потоков астрофизических нейтрино, поиск источников нейтрино высоких энергий, анализ данных в рамках многоканальной астрофизики и астрономии высоких энергий».

Методы исследований – анализ и обработка накопленных за годы данных для выявления избыточных потоков нейтрино прогнозируемого спектра энергий и направлений относительно фона нейтрино атмосферного происхождения; обмен данными с

коллорабациями, осуществляющими астрофизические исследования на других физических принципах в рамках международных программ по развитию многоканальной (multimessenger) астрономии.

В 2024 году при анализе данных, полученных телескопом в конфигурациях 2018 – 2023 годов, исследованы корреляции с радио-яркими блазарами каскадных событий с энергиями, превышающими 100 ТэВ. В частности, представлен анализ наблюдаемого триплета нейтринных кандидатов в галактической плоскости, исследована его потенциальная связь с определенными галактическими источниками, рассмотрено совпадение направлений прихода каскадных событий с несколькими яркими блазарами.

В результате исследований получены уникальные результаты мирового уровня, которые вошли в список важнейших результатов за 2024 год. Результаты используются и будут использоваться в фундаментальных исследованиях в области астрономии, астрофизики и космологии.

4. Задача «Разработка научной программы и поиск технического решения для следующего после BEST эксперимента по измерению скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам».

Поиск стерильных нейтрино одна из актуальных задач фундаментальной науки, стоящая в одном ряду с открытием нейтринных осцилляций, показавших существование массы нейтрино и новой физики за пределами Стандартной Модели (СМ). Существующая СМ с тремя активными нейтрино не согласуется с полученными в ряде предыдущих нейтринных экспериментов (ускорительных, галлиевых с интенсивными искусственными источниками, реакторных с расстояниями до 100 м) результатами, для объяснения которых требуется введение четвертого нестандартного стерильного нейтрино с масштабом массы порядка 1 эВ. В работе [1] представлен ряд экспериментов по поиску стерильных нейтрино, и в настоящее время идёт подготовка к реализации нескольких из них с различными источниками нейтрино.

В эксперименте BEST [2,3] была предпринята попытка измерить параметры осцилляционных переходов $\nu_e \rightarrow \nu_s$. Полученные в эксперименте ограничения на параметры осцилляций переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях согласуются с осцилляционными переходами, но не доказывают их. Галлиевая аномалия по-прежнему плохо согласуется с результатами других нейтринных и

антинейтринных экспериментов [4], за исключением реакторного эксперимента Нейтрино-4 [5], результаты которого находятся в хорошем согласии с результатом BEST, в связи с чем в работе [4] сделан вывод, что следует искать другие возможные решения, помимо коротких базовых осцилляций для галлиевой аномалии. С учетом этого разработаны предложения по научной программе и техническому решению для следующего после BEST экспериментов по измерению скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино (антинейтрино) на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам, а также возможность решения галлиевой аномалии через осцилляционные переходы антинейтрино в нейтрино.

Результаты, полученные в предлагаемых экспериментах, могут быть применены для поиска физических явлений за пределами Стандартной модели физики частиц, в том числе кандидатов на роль темной материи.

5. Задача «Создание прототипов Большого баксанского нейтринного телескопа (ББНТ) и проведение физических измерений на прототипах ББНТ».

Для регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий необходимы установки с гигантской экспозицией. Только таким способом можно получить информацию о наиболее энергичных процессах, идущих во Вселенной, в том числе в активных ядрах галактик, остатках сверхновых, крупномасштабных ударных волнах.

В результате создания крупномасштабных нейтринных телескопов открывается новое важнейшее направление в науке – нейтринная астрономия с ожиданием прорывных результатов в этом и смежных направлениях развития фундаментальных исследований.

Полученные результаты измерений необходимы для дальнейших работ по созданию подземного сцинтилляционного детектор большого объема (ББНТ), направленного на регистрацию солнечных нейтрино CNO цикла, геонейтрино и решения других задач на стыке физики частиц, астрофизики и геофизики.

6. Задача «Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле».

Гидридная модель Земли (или модель богатой водородом Земли) [6], [7] предсказывает большое содержание калия (до нескольких процентов от массы Земли) в Земле. Калий содержит долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K , при распаде которого в основном рождаются гео-антинейтрино и в редких случаях гео-нейтрино (будем обозначать их как $^{40}\text{K-geo-}\nu$). Эти $^{40}\text{K-geo-}\nu$ могут рассеиваться на электронах и давать вклад в скорость

счёта одиночных событий в детекторе Борексина. Основной целью работы в 2024 году является осмысление результатов независимого анализа последних данных Борексина [8], [9] с включением в анализ нового источника событий - рассеяния ^{40}K -geo- ν на электронах сцинтиллятора.

Проведенный в ИЯИ РАН анализ в 2024 году данных эксперимента Борексина подтвердил результат, полученный ранее [10], [11] о наличии калия в Земле в количестве нескольких процентов от массы Земли [12].

При распаде изотопа ^{40}K в Земле выделяется известная порция тепла. Оказалось, что количество калия, полученного из анализа данных Борексина, достаточно для того, чтобы объяснить наблюдаемую сейчас скорость нагрева мирового океана, и остальная часть тепла может быть поглощена расширением Земли.

7. Задача «Запуск оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10-19 Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций».

Многочисленные факты регистрации гравитационно-волновых (ГВ) всплесков от сливающихся компонент двойных релятивистских звезд позволяют говорить о фактическом возникновении нового ГВ канала астрофизической информации. Они также прогнозируют эффективность многоканальной астрономии, т.е. стратегии параллельного наблюдения на детекторах разной физической природы. В России единственным ГВ детектором в кило герцевом диапазоне частот является комбинированная оптоакустическая антенна ОГРАН, созданная совместными усилиями РАН и МГУ. В паре с нейтринным телескопом БПСТ эта установка позволяет осуществлять двухканальный поиск коллапсаров в нашей Галактике как редкие явления со средним темпом 0,03 события в год. Наблюдения проводятся в форме непрерывного синхронного мониторинга астрофизического фона по обоим каналам регистрации. Жесткие требования предъявляются к системам удержания рабочих режимов обеих установок. Проблема оказывается нетривиальной для гравитационного детектора ввиду сложности его систем автоматического регулирования и тонкой настройки рабочей точки. По этой причине методика и техника удержания ОГРАН в режиме мониторинга потребовала заметных усилий.

На текущем этапе развития гравитационно-волновой астрономии внимание привлечено к интерферометрам комбинированного типа, сочетающим майкельсоновские интерферометры с ФП-эталоном и кольцевыми интерферометрами типа Гироскопа

Саньяка (ГС). Последний инструмент представляет грави-инерциальный датчик вращательных и наклонных возмущений платформы, на которой он установлен. При использовании зеркал высоких технологий (с рекордной рефлексивностью и исчезающе малыми потерями) он превращается в уникальный прецизионный инструмент для фундаментальных и прикладных задач астрофизики и гравитации. В этой связи коллектив, создавший детектор ОГРАН, обладает серьезной подготовительной базой, для освоения техники комбинированных интерферометров, в подземных условиях БНО.

8. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино».

Все астрономическое научное сообщество ждет коллапса сверхновой звезды, частота которых по современным наблюдениям в спиральных галактиках должна быть раз в ~ 30 -50 лет. Со времени предыдущей вспышки Сверхновой в нашей галактике прошло уже более 300 лет, а Сверхновая SN1987A вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке 23 февраля 1987 года. В 2022 году событий, связанных со взрывами Сверхновых звезд в нашей Галактике обнаружено не было. Подземные установки АСД, БПСТ и LVD специально проектировались для регистрации нейтрино от вспышек сверхновых.

9. Задача «Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов по данным детекторов БПСТ (Баксан, Россия) и LVD (Италия, LNGS), связанных с событиями от астрофизических источников».

Регистрация нейтринного всплеска в рамках модели стандартного коллапса происходит в течение ~ 20 секунд. Всплеск нейтринного излучения идентифицируется в детекторах по регистрации статистически редких сгущений импульсов. Сейчас в мире работают детекторы: LVD (Италия), SK, KamLAND (Япония), HALO (Канада), IceCube, DayaBay (Китай), и БПСТ (Россия), способные регистрировать нейтринные всплески от гравитационных коллапсов, по взаимодействию нейтрино с ядрами p, C, O, Fe, Na, Cl, Pb. Анализ совокупных данных этих установок в режиме реального времени дает возможность с высокой достоверностью фиксировать коллапсы звездных ядер и задавать время и направление для астрономических наблюдений. Информация о характеристиках детектируемых нейтрино необходима для понимания ядерных процессов в звезде на последней стадии эволюции. В мировую систему раннего оповещения о вспышках сверхновых (SNEWS) входят детекторы Super-K, LVD, IceCube, KamLAND, HALO и Daya Bay. Данные со всех детекторов направляются в Брукхэвенскую национальную лабораторию. Проведение корреляционного анализа данных по поиску нейтрино между

детекторами с идентичным сцинтиллятором дает новые возможности для регистрации редких событий.

10. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».

После введения в строй $\frac{1}{4}$ в 2019 г., а затем в 2021 г. и всей «шаловской» установки Km2A, входящей в LHAASO, начался набор научной информации и ее анализ. Благодаря рекордной светосиле этой установки и уникальному угловому разрешению 0,05 градуса, именно Km2A начала первой выдавать научные результаты, опережающие все мировые аналоги. С ее помощью были открыты новые источники космических гамма-квантов вплоть до энергий выше 1,4 ПэВ в нашей Галактике, были измерены их энергетические спектры. Было показано, что в некоторых источниках работают ПэВатроны как лептонного, так и адронного происхождения. Кроме того, по данным этой установки удалось поставить ограничения на гипотетическое нарушение Лоренц-инвариантности в статье [13], и на гамма-лучи от возможного распада тяжелых частиц темной материи. В отчетном году были получены новые результаты LHAASO по поиску астрофизических источников гамма-излучения при энергиях выше 100 ТэВ. Опубликован каталог из 43-х новых источников в статье [14].

Исследования космических лучей высоких энергий и поиск космических объектов, в которых ускоряются космические лучи, необходимы для решения проблемы происхождения космических лучей, открытых более чем 100 лет назад. На сегодняшний день такие исследования являются одними из основных задач современной физики. Для решения этой проблемы необходимо тщательно исследовать космические лучи в широком диапазоне энергий – изучать энергетическое распределение и массовый состав космических лучей, а также исследовать гамма-кванты высоких энергий от локальных источников. Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является комплексный гибридный подход, в котором в одном эксперименте регистрируется одновременно черенковское излучение от широких атмосферных ливней (ШАЛ) широкоугольными детекторами и узкоугольными телескопами изображения, а также регистрируются электрон-фотонная и мюонная компоненты ШАЛ. Именно такой комплексный гибридный подход впервые в мире осуществляется в эксперименте TAIGA, включающем в себя широкоугольные черенковские детекторы ШАЛ для исследования космических лучей в широком диапазоне энергий, узкоугольные атмосферные черенковские телескопы

изображения для регистрации гамма-квантов высоких энергий от локальных источников и сцинтилляционные установки для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ.

11. Задача «Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO».

Целью этих работ является исследование потоков гамма-квантов как диффузного потока, так и потоков от известных астрофизических объектов, измерение их энергетических спектров. Ведется поиск новых источников тремя установками LHAASO: Km2A, водным черенковским детектором WCDA и имиджевыми черенковскими телескопами WFCDA. Эти установки имеют рекордные светосилу и угловое разрешение, превышающие мировой уровень, что позволяет получать выдающиеся результаты. После анализа данных были получены и впервые опубликованы следующие новые результаты: параметры гамма-излучения от некоторых известных ранее и обнаруженных LHAASO новых астрофизических источников в нашей Галактике в статьях [15] - [20]. В отчетном году были опубликованы две статьи в высокорейтинговых журналах: по измерению гамма-излучения двух радиогалактик NGC 4278 и M87.

12. Задача «Модернизация экспериментальной установки по поиску Солнечных аксионов: изготовление вставок из чистого железа толщиной не более 50мкм плотно примыкающих к внутренней поверхности корпуса медного пропорционального счетчика (в природном изотопном составе железа имеется ~ 2,1% изотопа Fe-57). Гамма-кванты возникающие при поглощении аксионов ядрами Fe-57 в вставке частично поглощаются в рабочем газе счетчика. В этом случае на спектре фона счетчика должен быть пик при энергии 14.4. кэВ».

Экспериментальный поиск аксиона необходим для ответа на вопрос об адекватности моделей сильных взаимодействий, основанных на предположении о дополнительной U(1) симметрии. Важным аргументом, стимулирующим поиск аксиона, является то, что аксион и подобные ему частицы рассматриваются как кандидаты на роль частиц темной материи [21] – [23]. Таким образом, поиск аксионов является одной из важных задач в области астрофизики и физики элементарных частиц.

Согласно теоретическим моделям одним из наиболее мощных источников предполагаемого аксиона (адронного аксиона) должно быть Солнце, где излучение аксиона происходит в результате снятия термического возбуждения ядер некоторых элементов в недрах Солнца. Расчеты показывают, что наибольший поток аксионов следует ожидать при

M1-переходах в ядрах Fe-57 [24]. На Земле такие аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения ядрами мишени, содержащими изотоп Fe-57. До настоящего времени аксион не обнаружен. Лучшие на сегодняшний день верхние пределы на константу связи аксионов с нуклонами в области масс аксионов выше 1 эВ, полученные в экспериментах: $|g_{3AN-1,19} \cdot g_{0AN}| \leq 3,7 \cdot 10^{-6}$ в эксперименте с мишенью из Fe-57 и $|g_{3AN} - g_{0AN}| \leq 8,3 \cdot 10^{-7}$ в эксперименте с мишенью из Kr-83 [25, 26]. Поиски аксионов различными научными группами и международными коллаборациями продолжаются.

Целью данной работы является создание нового пропорционального счетчика из нержавеющей стали с катодом из АРМКО-железа, предназначенного для поиска аксионов с энергией 14.4 кэВ, излучаемых в M1-переходах в ядрах Fe-57 в недрах Солнца.

13. Задача «Развертывание и эксплуатация установки Ковер-3».

Создание современных установок по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) необходимо для решения целого ряда актуальных задач современной физики космических лучей и гамма-астрономии сверхвысоких энергий ($E > 100$ ТэВ). Использование методов современной многоканальной астрономии позволяет выполнять совместный поиск транзиентных объектов, а полученные оценки верхних пределов на потоки фотонов от различных внегалактических источников или гравитационно-волновых событий позволяют поставить ограничения на современные теории за пределами стандартной модели.

В процесс создания и эксплуатации установки коллаборацией Ковер-3 выполняется ряд работ, направленных на поддержание работоспособности установки, с целью обеспечения стабильного набора данных. Выполнено расширение эффективной площади наземной части установки Ковер-3, путем сборки 27 счётчиков на основе пластического сцинтиллятора, что позволило укомплектовать три новых выносных пункта регистрации

14. Задача «Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок TAIGA, LHAASO, и Telescope Array».

Для решения этой задачи используется установка Km2A, площадью более 1 кв. км. Кроме того, была создана установка ENDA-64, состоящая из 4 кластеров по 16 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторы), разработанных в ИЯИ РАН и способных регистрировать две главные компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Прототип установки (ENDA-INR) работает в Москве на территории ИЯИ РАН. Проводится сравнение данных, получаемых единым методом при существенно различной высоте наблюдения, а также проводятся работы по изучению влияния метеопараметров на показания детекторов.

В 2024 г. установкой Km2A был измерен энергетический спектр и массовый состав космических лучей при энергиях 0,3-30 ПэВ в статье [27].

Несмотря на десятилетия наблюдений, до сих пор не был достоверно обнаружен ни один источник космических лучей ультравысоких энергий (космических частиц с энергиями более 10^{18} эВ, КЛУВЭ). В ноябре 2023 года эксперимент Telescope Array, в рамках которого работает группа ИЯИ РАН, сообщил о наблюдении частицы космического происхождения с рекордно высокой энергией 244 ЭэВ (2.44×10^{20} эВ). В настоящем исследовании были изучены свойства этой уникальной частицы и результаты этого исследования были использованы для ограничения пространственного распределения источников КЛУВЭ.

Смягчение спектра космических лучей высоких энергий, происходящее на энергиях около 3-4 ПэВ (т. н. «колена») было открыто более полувека назад, однако механизм его возникновения до сих пор остаётся неясным. Реконструкция спектров отдельных массовых компонент потока космических лучей в области энергий 1 – 100 ПэВ, проведенная в настоящем исследовании с помощью архивных данных эксперимента KASCADE, предоставляет важную информацию для понимания механизма происхождения «колена».

15. Задача «Разработка модели взаимодействий адронов FANSY 2.0, воспроизводящей сравнительно более широкий круг основных экспериментальных результатов в области энергий 10^{11} – 10^{18} эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; и моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях».

Эксперименты на БАК дают информацию, в основном, по характеристикам центральной кинематической области ($\eta \lesssim 4$), играющей второстепенную роль в развитии широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере от частиц первичного космического излучения (ПКИ) (хотя и дающей важный вклад в генерацию мюонов). Только эксперимент LHCf даёт немного данных о характеристиках нейтральных частиц (n , K , γ) в области больших x_F , но узких интервалов по поперечному импульсу p_T . Данные по взаимодействиям пионов и каонов, играющих существенную роль в развитии ШАЛ, ещё более скудные. Поэтому до сих пор существует несколько конкурирующих моделей адрон-ядерных взаимодействий, применяемых для моделирования ШАЛ. С другой стороны, эти модели, в основном, воспроизводят генерацию только основных типов стабильных адронов. В частности, рождение чармированных адронов моделируется только в SIBYLL. Достаточно редко в этих моделях принимается во внимание рождение мезонных резонансов, которые

дают определённый вклад как в корреляции частиц, так и в прямую генерацию мюонов, являющихся важной компонентой ШАЛ.

Наконец, по-прежнему остаётся актуальной проблема более детальной разработки моделей генерации вторичных частиц в фрагментационной области ($x_F \gtrsim 0,01$) при сверхвысоких энергиях. В частности, это необходимо для изучения развития ШАЛ с учетом т.н. компланарности (ярко выраженной азимутальной асимметрии поперечных импульсов) наиболее энергичных вторичных частиц (ЭВЧ), обнаруженной в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами при энергиях $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ

С этой целью продолжалась юстировка, уточнение и отладка программного пакета FANSY 2.0, предназначенного для моделирования взаимодействий адронов при E_0 от $\sim 10^{11}$ до $\sim 10^{20}$ эВ, как в рамках традиционных представлений (FANSY 2.0 QGSJ), так и с учетом компланарной генерации адронов (FANSY 2.0 CPG). В частности, для решения задачи №2 были уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов наиболее энергичных частиц для различных феноменологических моделей и введена возможность её розыгрыша в рамках гипотезы о связи компланарности с переходом от трехмерного к двумерному пространству.

16. Задача «Исследование возможной связи между коллайдерным “ridge” эффектом и компланарной генерацией частиц в космических лучах на основе анализа экспериментальных и расчетных данных по азимутальным эффектам».

Основную роль в развитии ШАЛ от частиц ПКИ играют частицы из т.н. фрагментационной области. Но эксперименты на БАК получают данные, в основном, по характеристикам центральной кинематической области взаимодействий адронов. Только эксперимент LHCf даёт некоторую информацию о характеристиках нейтральных частиц в области больших x_F . Экспериментальные данные по взаимодействиям мезонов, которые также играют существенную роль в развитии ШАЛ, получены при низких энергиях.

В экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК) в космических лучах была обнаружена [28] – [31] тенденция к компланарности подстволов с энергией $E \gtrsim n \cdot 10$ ТэВ в центральных стволах ШАЛ, интерпретированная как результат компланарной генерации частиц (КГЧ) именно во фрагментационной области [32].

Поскольку прямые исследования во фрагментационной области в настоящее время возможны только в космических лучах, цель работы – изучение возможного влияния КГЧ на двухчастичные азимутальные корреляции характеристики частиц (т.н. long-range near-side «ridge» эффект), обнаруженный в эксперименте CMS на LHC в центральной

кинематической области ($|\eta| < 2,4$, $|\phi| \sim 0$) [33]. В рамках FANSY 2.0 near-side «ridge» эффект является побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц [34].

Идеи, объясняющие это явление, разделяются на две принципиально разные группы: 1) традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий [35] – [38]; 2) гипотеза, постулирующая переход размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях от трех к двум измерениям ($3D \leftrightarrow 2D$) [39].

Предлагается детальное исследование кинематических историй взаимодействий (генерация резонансов и их распады в мезоны и γ -кванты), которое может подтвердить или опровергнуть существование локальных ($3D \leftrightarrow 2D$) флуктуаций сигнатуры метрики пространства [40].

17. Задача «Моделирование развития ШАЛ от взаимодействий частиц ПКИ различного типа на основе пакета CORSIKA; включение в пакет CORSIKA модели FANSY 2.0, разработанной в ИЯИ РАН; разработка методов машинного обучения для анализа данных проекта «Памир-XXI», включающих оптимизацию чувствительности эксперимента, с целью, в частности, разделения шумовых и сигнальных срабатываний детекторов заряженных частиц, черенковского света, адронов высоких энергий в стволах ШАЛ, а также разделение событий, инициированных частицами ПКИ различного типа».

Наземные эксперименты в космических лучах при сверхвысоких энергиях неразрывно связаны с необходимостью моделирования развития ядерно-электромагнитных каскадов в атмосфере (т.н. широкие атмосферные ливни, сокращенно ШАЛ). Результаты наземных измерений любых компонент ШАЛ (адроны, мюоны, гамма-кванты, электроны и позитроны) необходимо сравнивать с результатами расчетов. В настоящее время существует несколько конкурирующих моделей адрон-ядерных взаимодействий, используемых для моделирования развития ШАЛ.

В настоящее время в мире основной рабочей программой моделирования ШАЛ является стандартный пакет программ CORSIKA, включающий несколько моделей адронных взаимодействий. В 2022–2024 гг. нами были проведены расчеты развития ШАЛ [41], инициированных протонами и ядрами железа первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями 1, 10 и 100 ПэВ, в рамках пакета CORSIKA (модель QGSJETII-04) для высоты 3340 м н.у.м. применительно к эксперименту «Адрон-М», проводимому на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (Республика Казахстан). Кроме того, для тех же энергий были проведены расчеты развития ШАЛ, инициированных гипотетическими странглетами, с использованием пакета CORSIKA для моделирования подкаскадов от ядер,

адронов и гамма-квантов, образующихся при взаимодействиях странглетов с ядрами воздуха).

В 2022 г. и 2023 г. были подготовлены промежуточные отчеты с общим наименованием «Разработка модели FANSY 2.0 взаимодействий адронов с нуклонами и ядрами в широкой области энергий $10^{11} - 10^{18}$ эВ. Получение характеристик фрагментационной области генерации частиц во взаимодействиях адронов космических лучей в области энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ»

18. Задача «Разработка метода регистрации локальных возмущений температуры атмосферы над установкой Ковер для оценки их вклада в вариации мюонов космических лучей и выделения событий, сопровождающих возмущения солнечного ветра или связанных с другими геофизическими процессами. Создание отдельных баз данных событий для периодов хорошей погоды и грозовой».

Современные познания, теоретические и экспериментальные, в области космических лучей, опыт их регистрации на постоянной основе, на уровне земли, позволяют надеяться на успех в применении непрерывно измеряемых данных для диагностики состояния окружающей среды, недоступной для прямых измерений. Характеристики стратосферы относятся к таким. В частности, её электрическое поле и связанные с ним высотные разряды. Метод диагностики заключается в интерпретации вариаций регистрации космических лучей на уровне земли, формируемых при прохождении мюонов в стратосфере [42]. Для выделения этих вариаций необходимо исключить другие. Знания и приобретённый опыт позволяют надеяться на успешный результат такой процедуры. Особо важными, являются локальные вариации температуры атмосферы. Метод получения этой информации, в проекте, опирается на использование данных её измерения на уровне земли и в стратосфере. Вариации температуры стратосферы вызывают возмущение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, которые регистрируются на установке спутниковыми часами GPS170PCI. В работе [43] получен коэффициент связи возмущения ПЭС с вариацией интенсивности мюонов. Для применения метода диагностики в практике мониторинга, необходима его верификация на периодах хорошей погоды, где положительным результатом явилось бы получение, методом наложения эпох, стандартной суточной волны первичных космических лучей. Но, на её фоне, выделить возможные неучтённые вариации малой амплитуды – сложно. Поэтому для анализа использовался специально подобранный период 29.07 - 06.09 2019 г., включающий две магнитные бури. В нём наблюдалась смена знака суточной волны интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ, регистрируемых установкой. Суточное поведение

давления, температуры и приземного электрического поля при этом не менялось. Используя случай инверсии суточной волны, проведена оценка вклада регулярной составляющей вариаций Земного происхождения, неучтённых в поправках к интенсивности регистрируемых мюонов. В процессе исследования выявлены ранее не замеченные утро – вечерние вариации земного происхождения. Результат работы доложен на Российской конференции [44], публикация в печати.

19. Задача «Проведение набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино».

На БПСТ мюоны, пересекающие установку в направлении снизу вверх, выделяются из общего потока время-пролетным методом. Такие мюоны могут быть рождены только мюонными нейтрино и антинейтрино из нижней полусферы. Так как на БПСТ определяется направление прихода мюонов, пересекающих установку, можно с известной точностью определять направление прихода породивших их мюонных нейтрино. Если эти мюонные нейтрино рождены в астрофизических объектах, установка даёт возможность существенно уменьшить область локализации предполагаемого источника. В качестве потенциальных источников нейтрино рассматриваются известные астрофизические объекты: активные ядра галактик, остатки сверхновых, источники гамма-всплесков, а также, так называемые "скрытые источники" нейтрино [45] – [48].

На БПСТ эксперимент по регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино ведётся с 1978 года. В течение 2024 года проводились работы по поддержанию установки в работоспособном состоянии и обеспечению режима непрерывного набора информации. Создан архив экспериментальных данных БПСТ за 2024 год.

1. Увеличение объема и развитие научно-технической инфраструктуры нейтринного телескопа Baikal- GVD

В 2024 году было продолжено развертывание новых кластеров телескопа и развитие инфраструктуры, обеспечивающей возрастающий с каждым годом объем выполняемых исследований и работ. Работы по развертыванию выполнялись по отлаженной в предыдущие годы методологии, включающей исследования и разработки по улучшению характеристик глубоководной регистрирующей аппаратуры, повышению ее надежности, повышению производительности при изготовлении элементов телескопа, лабораторные испытания отдельных элементов и систем в сборе, комплектация и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовка инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал, транспортировка элементов и оборудования к месту монтажа новых систем телескопа, развертывание ледового лагеря, предустановочные испытания элементов и систем телескопа, монтаж новых кластеров телескопа, ремонт вышедших из строя элементов в ранее установленных кластерах, прокладка донных кабелей, запуск в эксплуатацию телескопа с увеличенным объемом.

В результате проведенных исследований и работ были получены следующие основные результаты:

- проведено полное тестирование системы регистрации новых гирлянд кластера 13 в процессе их монтажа со льда оз. Байкал. Кластер 13 телескопа был включен в режиме постоянного набора данных в апреле 2024 г.

- Обеспечено изготовление и проведена настройка в составе телескопа глубоководных калибровочных источников света на основе лазеров и матриц светодиодов. Кластер 13 оснащен двумя лазерными калибровочными источниками и 12-ю матрицами светодиодов.

- В рамках совместных работ по проекту HUNT (Китай - Россия) разработана система подключения прототипа гирлянды из 12-ти оптических модулей с фотоэлектронными умножителями диаметром 20 дюймов к оптоволоконному кластеру Baikal-GVD и прототип включен в режиме постоянной экспозиции в апреле 2024 г.

- Во время зимней экспедиции (февраль – апрель 2024 г.) проведены профилактические работы на 8-ми гирляндах телескопа, для чего был произведен их частичный демонтаж. Количество функционирующих измерительных каналов телескопа после проведения ремонтных работ составило более 97%.

– Смонтированы и испытаны в лабораторных условиях блоки электроники системы управления и сбора данных для двух кластеров телескопа, 14-го и 15-го, монтаж которых запланирован на 2025 год.

– Обеспечена комплектация и изготовление глубоководных кабельных коммуникаций для двух кластеров, монтаж которых запланирован на 2025 год.

– Во время летней экспедиции на оз. Байкал проведены профилактические работы и подготовлено ледорезное оборудование и система развертывания телескопа для экспедиции 2025 г.

С вводом в эксплуатацию в апреле 2024 года 9 новых гирлянд оптических модулей рабочий объем Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD превысил значение $\approx 0,6 \text{ км}^3$ в задаче регистрации событий от нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ. На данный момент телескоп состоит из 13 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (более 4000 оптических модулей) и сохраняет позицию крупнейшего нейтринного телескопа Северного полушария.

Результаты исследований были опубликованы в журналах и докладывались на отечественных и зарубежных конференциях, на которых происходило обсуждение и обмен данными в рамках «Глобальной нейтринной сети», первого этапа по созданию научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория».

Результаты выполненных в рамках Задачи 1 вошли в перечень важнейших результатов ИЯИ РАН за 2024 год: «С завершением работы зимней экспедиции 2024 года на озере Байкал количество регистрирующих оптических модулей в составе глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD превысило 4100, а его эффективный объем в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ) составил более $\approx 0.6 \text{ км}^3$. Анализ каскадных событий от нейтрино, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018 – 2023 годов, позволил сделать вывод, что поток галактических нейтрино с энергией выше 200 ТэВ намного выше, чем предсказывается современными моделями. Этот результат Baikal-GVD подтверждается анализом общедоступных данных нейтринного телескопа IceCube с энергией $E > 200 \text{ ТэВ}$, что открывает новые возможности для изучения происхождения энергичных космических лучей, нейтрино и гамма-лучей в Млечном Пути, поскольку требует серьезного обновления моделей космических лучей».

В результате выполненных в 2024 году работ рабочий объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино вырос до $\sim 0,6$ кубического километра, что обеспечило регистрацию нейтрино высоких энергий астрофизической природы. При

ожидаемом ходе развития Байкальского проекта в течение ближайших лет, на нейтринном телескопе BAIKAL-GVD в конфигурации 2024 года можно будет ожидать регистрации примерно 5 ... 6 нейтрино астрофизической природы в год с точностью определения направления прихода нейтрино при детектировании вторичных ливней около 3-4 градусов в сравнении с 10-15 градусами в IceCube. Байкальский телескоп стал одним из двух мощнейших в мире инструментов исследования астрофизических нейтрино.

Создание крупнейшего в Северном полушарии нейтринного телескопа с объемом порядка кубического километра, безусловно, результат уровня мировых достижений. Такую же большую значимость имеет пополнение базы экспериментальных данных по регистрации сигналов и выявления событий, вызванных нейтрино высокой энергии, за 2022 - 2024 годы. Значимость формируемой базы данных для нейтринной астрофизики определяется тем, что Baikal-GVD является крупнейшим в Северном полушарии нейтринным телескопом, эффективный объем которого сравним с эффективным объемом эксперимента IceCube в Южном полушарии. Совершенствование систем управления телескопом и обработки данных на современном уровне облегчит доступ к проведению широкого круга исследований в области астрофизики и астрономии, включая исследования гидрологических, оптических и гидроакустических свойств водной среды озера Байкал. Результаты совершенствования системы обработки данных и моделирования физических процессов и работы установки Baikal-GVD с увеличенным объемом позволят повысить эффективность и уровень достоверности выделения каскадных событий, а также выявлять треки вторичных мюонов, вызванных взаимодействиями астрофизических нейтрино с водной средой. Сокращение времени выявления событий, их энергий и направлений прихода за счет автоматизации обработки и специальных алгоритмов позволит в полной мере реализовать возможности многоканальной астрономии и обмена данными в реальном времени. Результаты исследований диффузных потоков астрофизических нейтрино высоких энергий и поиска их источников позволят в международном сотрудничестве построить нейтринную карту неба и получить результаты в поиске источников и механизмов ускорения космических частиц.

2. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD

В 2024 году была проведена серия работ по моделированию методом Монте-Карло регистрации частиц нейтринным телескопом Baikal-GVD. В частности, проведено моделирование различных конфигураций установки, существовавших с 2019 до 2024 гг. Смоделированные данные включают в себя события от нейтрино высоких энергий, а также фоновые события от атмосферных мюонов (более 100 миллиардов событий на каждый год работы установки). По сравнению с предыдущими работами улучшена точность моделирования колебаний уровня оптического шума озера (люминесценции), а также точность моделирования зарядового отклика фотодетекторов.

Смоделированные данные были использованы для оптимизации анализа экспериментальных данных. В частности, используя Монте-Карло моделирование, была проведена оптимизация критериев отбора сигнальных (нейтринных) событий в трековом канале для нескольких стандартных видов анализа, включая такие виды анализа как выделение потока атмосферных нейтрино, поиск диффузного потока астрофизических нейтрино и поиск "точечных" источников нейтрино.

Выполнена уточненная оценка ожидаемых скоростей счета событий от установленных (NGC 1068, TXS 0506+056, галактический хребет) и некоторых гипотетических источников нейтрино высоких энергий в установке Baikal-GVD. Результаты расчетов использованы для оптимизации анализа данных.

В целом результаты моделирования удовлетворяют требованиям для восстановления событий и физических исследований, что открывает путь для углубленного физического анализа данных.

Физическое моделирование проводилось на специально созданных стендах, моделирующих работу целого кластера. Были введены изменения, в первую очередь в программы сбора данных с учетом изменений, внесенных в Основную программу управления телескопом и "on-line" сбора и обработки первичных данных. Также были внесены существенные изменения в направлении автоматизации сбора и анализа данных по результатам моделирования и испытаний систем сбора данных кластеров телескопа Baikal-GVD. Долговременные испытания проведены для двух кластеров, планируемых к установке в 2025 году.

Результаты исследований были использованы при создании и эксплуатации нейтринного телескопа Baikal-GVD в 2024 году, что позволило существенно улучшить качество накапливаемых данных, повысить надежность телескопа и выделять при

последующем анализе и обработке события, вызванные астрофизическими нейтрино высоких энергий, что, безусловно, относится к результатам мирового уровня.

Исследования по моделированию работы телескопа как необходимый элемент в обеспечении надежности будут продолжены на весь срок создания и эксплуатации нейтринного телескопа.

3. Исследования диффузных потоков астрофизических нейтрино, поиск источников нейтрино высоких энергий, анализ данных в рамках многоканальной астрофизики и астрономии высоких энергий

В течение 2024 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня собственного свечения водной среды и временного поведения параметров оптических модулей и других функциональных систем установки. Проведены долговременные измерения относительного смещения фотодетекторов установки с помощью гидроакустической системы позиционирования. Выполнена оценка положений фотодетекторов на основе данных инерциальных датчиков, расположенных в оптических модулях, с использованием физической модели гирлянды.

В результате проведенного в 2024 году анализа экспериментальных данных, накопленных с апреля 2022 года по март 2024 года выделено около 20 миллиардов событий по базовому триггерному условию телескопа, что соответствует 6440 дням эффективного набора данных одним кластером телескопа. Применяя к этому набору данных дополнительные условия по подавлению фона от атмосферных мюонов сформированы два набора событий – кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы. Первый набор включает в себя 11 событий с энергией выше 70 ТэВ и множественностью сработавших оптических модулей более девятнадцати с направлениями прихода со всех направлений на небесной сфере. Ожидается, что половина этих событий являются кандидатами на события от астрофизических нейтрино. В результате полное число событий, соответствующих этим условиям отбора, выделенных из данных 2018-2023 годов составило 28 событий. Среднее число ожидаемых фоновых событий от атмосферных мюонов и нейтрино составляет 15,7 события. Значимость наблюдаемого превышения числа экспериментальных событий над ожидаемым фоном составляет $2,73\sigma$.

Второй набор содержит 14 событий с энергией выше 15 ТэВ и множественностью сработавших оптических модулей более одиннадцати с направлениями прихода из-под горизонта. В результате полное число событий данного типа, выделенных из данных 2018-2023 годов составило 25 событий. Среднее число фоновых событий от атмосферных мюонов и нейтрино составляет 6,3 события. Значимость наблюдаемого превышения числа экспериментальных событий над ожидаемым фоном составляет $5,5\sigma$.

В 2024 году выполнен анализ углового распределения каскадных событий с энергией выше 200 ТэВ из набора данных за 2018-2023 гг. по поиску нейтринных событий из галактической плоскости. Полное число событий с энергией выше 200 ТэВ и удовлетворяющих критериям отбора из всех направлений на небесной сфере составило 9 событий. Медианное значение распределения этих событий по абсолютной величине галактической широты равно 10.4 градуса. В то же время, ожидаемое значение при изотропном распределении нейтринного потока составляет 31,4 градуса. Значимость наблюдаемого отклонения от ожидаемой величины для изотропного потока составляет $2,5\sigma$ (рисунок 3.1). Этот результат Baikal-GVD подтверждается анализом общедоступных данных нейтринного телескопа IceCube с энергией $E > 200$ ТэВ, что открывает новые возможности

для изучения происхождения энергичных космических лучей, нейтрино и гамма-лучей в Млечном Пути, поскольку требует серьезного обновления теоретических моделей распространения космических лучей в нашей галактике.

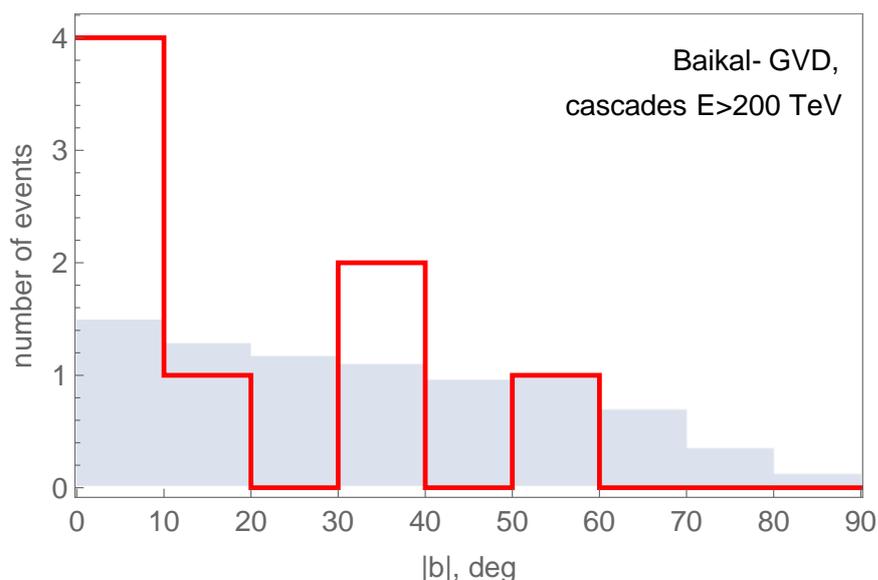


Рисунок 3.1 – Распределение каскадных событий Baikal-GVD с энергией выше 200 ТэВ по галактической широте (модуль значения $|b|$ в градусах): наблюдаемых (красная гистограмма) и ожидаемых (заштрихованная)

В 2024 году в рамках многоканальных задач астрофизики и астрономии высоких энергий на Baikal-GVD продолжались работы по совершенствованию организации хранилища данных, их прием и управление, в режиме реального времени. С этой целью были реализованы современные системы управления базами данных, такие как Influx и MariaDB (статьи [4, 5] в приложении A1), что позволило в режиме реального времени

принимать циркуляры GCN, международной системы, объединяющей оповещения от различных обсерваторий. Помимо этого, через распределенную роботизированную систему-посредник Kafka на Baikal-GVD принимались оповещения IGWN гравитационно-волновых обсерваторий LIGO, Virgo и KAGRA, в соответствии их формату. С 2024 года на Baikal-GVD используется сервис Grafana для визуализации данных, хранящихся в базе данных InfluxDB, что позволяет динамически отслеживать текущие события с обновлениями в режиме реального времени, отслеживать частоту событий, распределение событий по энергии и другие закономерности, а также получать предупреждающие уведомления на основе заранее определенных критериев, таких как необычная частота событий с высокой энергией, обнаружение корреляции между хорошо восстановленными событиями на Байкале с оповещениями GCN.

Все разработки систем и программ по задаче 3, обеспечивающие долговременный непрерывный набор данных на телескопе Baikal-GVD, анализ и обработку данных, восстановление событий, вызванных нейтрино и вторичными мюонами в каскадном и трековых режимах уникальны и, безусловно являются источниками информации в понимании астрофизических процессах мирового уровня. Об этом свидетельствует и участие в международных системах обмена оповещениями в режиме реального времени, которые дали возможность принимать циркуляры GCN, международной системы, объединяющей оповещения от различных обсерваторий; принимать оповещения IGWN гравитационно-волновых обсерваторий LIGO, Virgo и KAGRA. Результаты обменов применяются на практике работы телескопа и в обработке данных.

Телескоп из 13 кластеров к настоящему времени второй по объему нейтринный телескоп после IceCube, но обладает существенно лучшим угловым разрешением, чем IceCube (3-4о по сравнению с 13-14о для регистрации каскадов), поэтому получаемые уже сейчас данные по регистрации каскадов и траекторий мюонов, вызванных нейтрино высоких энергий, безусловно, входят в разряд достижений мирового уровня.

4. Эксперименты с источниками нейтрино и антинейтрино на галлиевой мишени УНУ ГГНТ

4.1. Эксперимент BEST2 с источником ^{58}Co на трехзонной галлиевой мишени

4.1.1. Цель эксперимента BEST2

Эксперимент BEST2 с источником нейтрино ^{58}Co предназначен для детального исследования галлиевой аномалии. В эксперименте будут получены данные о зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино E и от расстояния между точками рождения нейтрино и его захвата L .

Основная гипотеза, объясняющая галлиевую аномалию сегодня, состоит в том, что нейтрино осциллируют на коротких расстояниях ($\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$). Осцилляции электронных нейтрино с энергией E на расстоянии L от источника определяются через вероятность выживания электронных нейтрино:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \quad (4.1)$$

где Δm^2 – разность квадратов масс собственных массовых состояний нейтрино, и θ – угол смешивания нейтринных состояний, задающий амплитуду осцилляций. Путём осцилляций электронные нейтрино переходят в стерильные состояния.

Цель нового эксперимента состоит в подтверждении гипотезы осцилляций и определении параметров (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) этих осцилляций.

Если гипотеза осцилляций на короткой базе верна, то в условиях, когда реальные параметры осцилляций находятся в области чувствительности нового галлиевого эксперимента (см. пункт 4.1.6), эти параметры будут определены с ошибкой в несколько десятков процентов на уровне значимости 3σ . В том числе, параметр Δm^2 , определение которого недоступно в большинстве экспериментов.

В новом эксперименте область чувствительности определения параметров осцилляций непрерывна в диапазоне Δm^2 от 0,5 до 5,5 эВ². Поэтому, если полученные скорости захвата нейтрино от источника в разных зонах не будут статистически различаться, то это будет означать либо ошибочность гипотезы осцилляций, либо большую разность квадратов масс ($\Delta m^2 > 5,5 \text{ эВ}^2$).

Интересной особенностью эксперимента является то, что при трёх или более независимых зонах мишени BEST2 будет первым экспериментом, в котором может наблюдаться осцилляционная кривая зависимости скорости счёта от расстояния для

нейтрино с фиксированной энергией. До настоящего времени все эксперименты по нейтринным осцилляциям наблюдали только изменение скоростей счета, в детекторах относительно ожидаемых, но никакой периодичности, ни один эксперимент наблюдать не мог. В нашем случае может наблюдаться периодическое изменение количества захватов от расстояния типа «мало-много-мало» или «много-мало-много». Здесь «мало» и «много» означает относительное количество захватов последовательно в трёх зонах мишени.

Другой целью эксперимента является исследование зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино. В гипотезе стерильных осцилляций такой зависимости быть не должно. Этой цели способствует использование источника с энергией нейтрино в 2 раза выше, чем в предыдущих галлиевых экспериментах. В предыдущих галлиевых экспериментах нейтрино от источников имели примерно одинаковую энергию (750 кэВ в источниках ^{51}Cr и 814 кэВ в источнике ^{37}Ar). Результаты всех галлиевых экспериментов с источниками согласуются на уровне лучше $1,4\sigma$ [3]. Указанием на существование зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино может быть, например, отличие полученной скорости захвата нейтрино в новом эксперименте на величину $> 2\sigma$ от средней скорости захвата, полученной в предыдущих галлиевых экспериментах с источниками.

4.1.2. Особенности нового эксперимента BEST2

Новый эксперимент является естественным продолжением эксперимента BEST [3], подтвердившего галлиевую аномалию. Все процедуры эксперимента BEST2 повторяют процедуры эксперимента BEST. Компактный источник нейтрино будет помещаться в центр галлиевой мишени, разделённой на зоны, измерение скоростей захвата нейтрино в которых будет проходить независимо. Будет проводиться несколько облучений мишени нейтрино от источника одинаковой длительности, и после каждого будет проводиться извлечение образующихся атомов ^{71}Ge и последующий счёт их распадов в отдельных счётчиках для каждой зоны мишени.

Новый эксперимент BEST2 отличается от предыдущего тем, что в нём будет:

1) за счёт введения третьей зоны мишени увеличена чувствительность к расстояниям L между точками излучения и захвата нейтрино,

а также

2) применён источник нейтрино более высокой, чем в эксперименте BEST, энергии.

Такое различие даст возможность определить параметр осцилляций Δm^2 в широком интервале значений. Второй параметр осцилляций, $\sin^2 2\theta$, определяет подавление скорости захвата в мишени в целом, и сегодня известен с удовлетворительной точностью [3] ($\sin^2 2\theta \sim 0,4 \pm 0,2$ на 95% CL). В новом эксперименте можно ожидать улучшения точности его

определения до 1,4 раза (удвоение статистики даст улучшение статистической ошибки в $\sim \sqrt{2}$ раз).

Уникальной особенностью эксперимента BEST2 является возможность изучения зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино. Если скорость захвата, измеренная в эксперименте BEST2, будет отличаться от той, которая была получена в предыдущих галлиевых экспериментах с источниками, то это будет означать, что есть зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино, что, в свою очередь, означает необходимость новой физики, но при этом стерильные осцилляции не являются основной причиной галлиевой аномалии.

4.1.3. Разделение Ga мишени на зоны

В новом эксперименте для определения параметра осцилляций Δm^2 необходимо измерить скорости захвата на разных длинах пробега нейтрино, поэтому важно увеличить пространственное разрешение детектора. Этого можно достичь увеличением количества зон галлиевой мишени, которые будут находиться на разных расстояниях от источника. Проблема разделения мишени на зоны в том, что это сильно удорожает эксперимент. Соответственно числу зон увеличивается число счётчиков, счётных каналов и систем перекачки галлия из зон мишени в химические реакторы для проведения процедур извлечения образующегося ^{71}Ge . При этом, поскольку масса галлия в мишени фиксирована, то из-за уменьшения среднего пробега в зоне меньшей толщины уменьшается статистика в конкретных зонах. Из-за этого требуется использование более интенсивного источника. Самый простой вариант увеличения количества зон мишени – разделение в существующей двухзонной мишени, которая использовалась в BEST, внешней цилиндрической зоны цилиндрической оболочкой на 2 части, имеющие примерно равную толщину галлия. Средняя толщина галлия в трёх зонах мишени составит примерно 52, 27 и 27 см. Статистика первой зоны в этом случае будет вдвое больше, чем во второй и в третьей зонах. Ту же статистику можно получить делением на две равные по толщине части внутренней, шаровой, зоны. Однако, в этом случае масса галлия в зонах оказывается слишком маленькой для работы системы извлечения атомов ^{71}Ge из галлия.

Заметим, что, если разделить галлиевую мишень на 4 зоны с равной толщиной галлия, то статистика в двух внешних зонах не изменится, а в двух внутренних – будет равна статистике в двух внешних зонах. Поскольку в двух внутренних зонах количество галлия меньше, чем в двух внешних зонах, то фон от солнечных нейтрино в них будет меньше. Поэтому делать 4 зоны кажется более выгодным, чем делать 3 зоны. Однако, как показал

наш анализ, использование в эксперименте четырёх зон при фиксированной общей массе мишени и активности источника не приводит к заметному изменению чувствительности эксперимента к определению параметров осцилляций. Поэтому в эксперименте BEST2 предполагается использовать 3 зоны галлиевой мишени (рисунок 4.1).

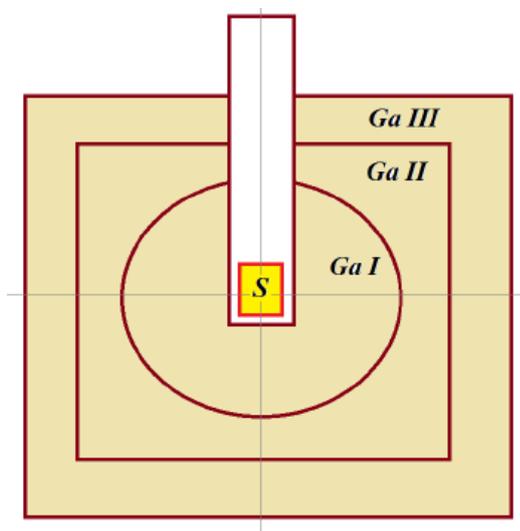


Рисунок 4.1 – Схема галлиевой мишени в эксперименте BEST2. Источник ⁵⁸Co (S) помещается в общий центр всех трёх зон мишени через вертикальную трубу. Внешние границы второй и третьей зон мишени (Ga II и Ga III) сделаны в форме вертикально расположенных цилиндров

Примерные размеры зон мишени, таким образом, будут следующие: внутренний радиус шаровой мишени 67 см; внутренний радиус и высота средней цилиндрической оболочки мишени 83 см и $83 \times 2 = 166$ см; внутренний радиус и высота внешнего цилиндра, ограничивающего третью зону – 109 см и 234 см.

На рисунке 4.2 приведены распределения вероятностей захвата нейтрино в галлии в зависимости от расстояния между точками излучения в источнике и захвата в трёх зонах мишени, а также суммарное распределение по всем зонам. Распределения получены методом Монте-Карло для источника с равномерно излучающей частью в форме цилиндра диаметром 14 см и высотой 26 см (объём 4 л), размещённого в общем центре зон мишени. В такой объём может поместиться до 36 кг никеля, из которого производится кобальтовый источник. Количество никеля, необходимое для изготовления источника будет, скорее всего, меньше, поэтому оценки чувствительности эксперимента, приведённые ниже, являются консервативными.

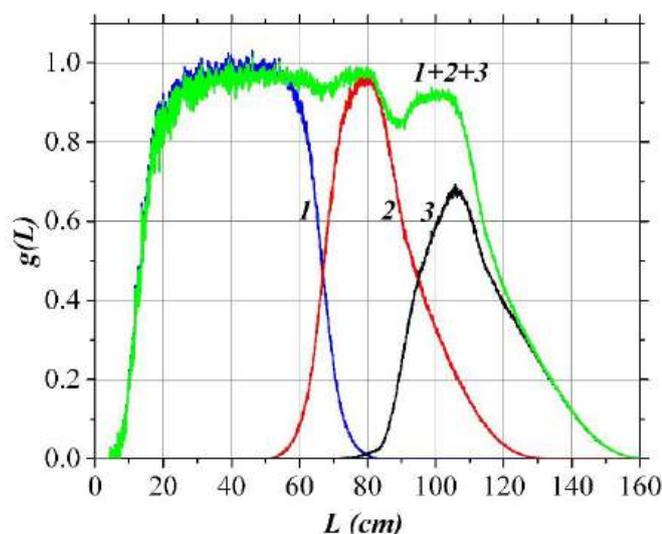


Рисунок 4.2 – Распределения вероятностей захвата нейтрино галлием в зависимости от расстояния между точками излучения и захвата L в трёх зонах мишени в относительных единицах

4.1.4. Влияние параметров осцилляций на скорости счёта

В данном эксперименте будет исследоваться гипотеза осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния с большими значениями параметра Δm^2 (~ 1 эВ²). Заметим, что здесь могут быть исследованы переходы в любые состояния, в том числе, в антинейтрино, поскольку на галлиевой мишени регистрируются только электронные нейтрино.

Осцилляции уменьшают скорости захвата нейтрино в галлиевой мишени. Уменьшение скоростей захвата зависит от параметров осцилляций Δm^2 и $\sin^2 2\theta$ в соответствии с вероятностью выживания (4.1). Для монохроматических нейтрино величина P_{ee} имеет синусоидальную зависимость от расстояния L между точками рождения и поглощения нейтрино. В галлиевой мишени нет возможности выделять по расстояниям каждое событие, и количество захватов нейтрино суммируется по всем расстояниям внутри каждой зоны. Поэтому вероятности выживания усредняются также по всем расстояниям внутри зон.

Для трёх зон зависимости ожидаемых скоростей захвата в разных зонах мишени от параметра Δm^2 показаны на рисунке 4.3 для значения $\sin^2 2\theta = 0,30$.

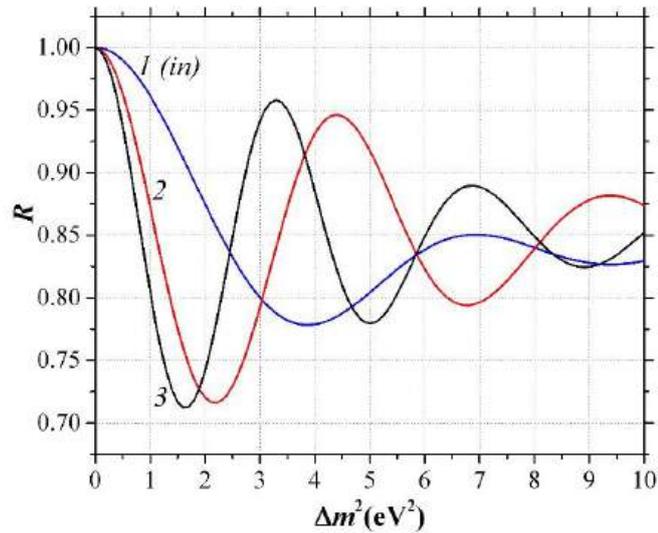


Рисунок 4.3 – Скорости захвата нейтрино в трёх зонах мишени BEST2 в зависимости от параметра Δm^2 для фиксированного значения параметра $\sin^2 2\theta = 0,30$

Скорости захвата в разных зонах мишени по-разному меняются с изменением параметра Δm^2 . Отношение скоростей захвата нейтрино в разных зонах мишени приведено на рисунке 5. Видно, что в области Δm^2 от $\sim 0,5$ до 6 эВ^2 отношения скоростей захвата существенно различаются, что позволяет определить параметр Δm^2 , если он будет находиться в указанном интервале значений. Для заданного значения амплитуды осцилляций $\sin^2 2\theta$ на рисунке приведены ограничения на отношения скоростей захвата в разных зонах мишени $\pm 1\sigma$ и $\pm 2\sigma$, по которым строится область чувствительности эксперимента к определению параметров осцилляций (см. пункт 4.1.6.).

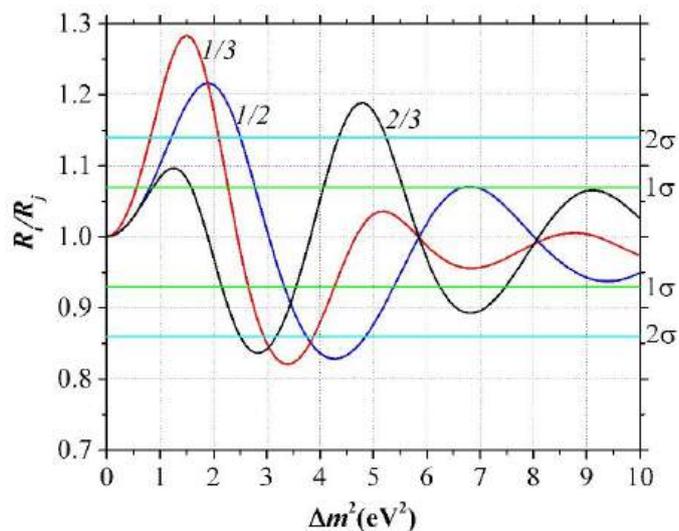


Рисунок 4.4 – Попарные отношения скоростей захвата нейтрино в трёх зонах мишени BEST2 в зависимости от параметра Δm^2 для фиксированного значения параметра $\sin^2 2\theta = 0,30$

Определение параметра Δm^2 возможно в областях Δm^2 , в которых разница скоростей счёта в разных зонах мишени окажется больше ошибок измерения этих скоростей. Отношение скоростей счёта в разных зонах становится близким к единице для значений $\Delta m^2 > 10$ эВ². На рисунке 4.4 видны также слепые зоны, в которых отношения всех скоростей счёта равны единице – около значений $\Delta m^2 = 6$ и 8 эВ². В таких областях определение параметра Δm^2 в этом эксперименте будет невозможным.

4.1.5. Статистические ошибки измерений

Оценим статистические ошибки галлиевых измерений с источником. Будем считать, что число извлекаемых атомов ^{71}Ge имеет пуассоновское распределение, в котором статистическая ошибка равна квадратному корню из числа событий $\sigma = \sqrt{N}$. Число посчитанных распадов ^{71}Ge тоже имеет пуассоновское распределение. Но из-за присутствия фона счётчиков, ошибка будет больше: $\sigma = \alpha\sqrt{N}$, где $\alpha > 1$.

Рассмотрим ошибку для одной зоны мишени. После m облучений получаем набор $\{N_i\}$ m чисел зарегистрированных распадов ^{71}Ge в пропорциональных счётчиках. Суммарное число событий и его ошибка равны

$$N = \sum_{i=1}^m N_i \quad (4.2)$$

$$\sigma = \alpha \sqrt{\sum_{i=1}^m N_i} \quad (4.3)$$

Распадающийся ^{71}Ge образуется от источника и от солнечных нейтрино, которые составляют единственный фон в эксперименте. Будем считать, что от Солнца в каждом облучении длительностью t_1 образуется одинаковое число атомов $^{71}\text{Ge} - N_C$. Тогда суммарное число событий от источника равно

$$N_{\text{ист}} = \sum_{i=1}^m N_i - mN_C \quad (4.4)$$

и ошибка этого числа равна

$$\sigma = \alpha \sqrt{\sum_{i=1}^m N_i + mN_C} \quad (4.5)$$

Относительная ошибка составит

$$\delta = \frac{\sigma}{N_{ист}} = \alpha \frac{\sqrt{N_{ист} + 2mN_C}}{N_{ист}} \quad (4.6)$$

Для $\alpha = 1$ оценим ошибки для 3-х зонной мишени. В 3-х зонной мишени во внутренней шаровой зоне число событий в новом эксперименте равно числу событий в этой же зоне в BEST, т.е. $N_{ист} = 700$, а в двух других – в 2 раза меньше, т.е. по 350. Здесь уже учтено, что эффективность счёта извлекаемых атомов ^{71}Ge равна $\varepsilon = 0,5$. Число регистрируемых событий от Солнца равно [48]

$$N_C = \frac{v_{Sun}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \varepsilon \quad (4.7)$$

Для Ga мишени массой 50 т скорость захвата нейтрино от Солнца равна $v_{Sun} = 1 \text{ сут}^{-1}$ ($66,1 \pm 3,1 \text{ SNU}$) [48]. λ – постоянная распада образуемого в мишени ^{71}Ge ; t – длительность облучения мишени солнечными нейтрино до очередного извлечения.

В таблице 4.1 приведены массы зон мишеней M (в тоннах), число ожидаемых событий от источника $N_{ист}$ и от солнечных нейтрино N_C для длительности одного облучения $t = t_1$, а также относительные статистические ошибки δ .

Таблица 4.1 – Масса галлия, ожидаемое число событий от источника и Солнца и ожидаемые относительные статистические ошибки в трёх зонах мишени BEST2

№ зоны	M , т	$N_{ист}$	N_C	δ ($\alpha=1$)
1	7,7	700	0,9	0,038
2	14,7	350	1,7	0,056
3	26,8	350	3,1	0,058

Статистические ошибки в зонах 2 и 3 несколько отличаются из-за разной массы галлия в зонах мишени, из-за чего вклад солнечных нейтрино в этих зонах различается.

По опыту измерений солнечных нейтрино для числа зарегистрированных распадов ^{71}Ge больше 10 в L или K пиках значение α не превышает 1,1. Отметим, что события от распадов ^{71}Ge в пропорциональных счётчиках формируют в спектре импульсов два пика (L и K пики) в области энергий 1,2 и 10,4 кэВ [49]. Для источника ^{58}Co активностью 400 кКи во всех облучениях, включая последнее, десятое, количество событий в L и K пиках распадов ^{71}Ge будет заведомо больше: в 10-м облучении ожидаемое число импульсов в каждом пике будет равно

$$N_{L(K)} = \frac{p}{\lambda_0 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_1} - e^{-\lambda_0 t_0}) e^{-\lambda_0(t_1+t_2)(m-1)} \varepsilon P_{\Gamma A} P_{2,3} = 8 \quad (4.8)$$

Здесь $p = 36 \text{ сут}^{-1}$ – скорость захвата нейтрино во внутренней зоне мишени в начале первого облучения; λ_0 и λ_1 – постоянные распада ^{58}Co и ^{71}Ge ; $m = 10$ – число облучений; t_1 и t_2 – время одного облучения и интервал между облучениями; $\varepsilon = 0,5$ – эффективность регистрации импульса от распада извлечённого из мишени атома ^{71}Ge ; $P_{\Gamma A} = 0,8$ – ожидаемое подавление количества образующихся атомов ^{71}Ge из-за галлиевой аномалии; $P_{2,3} = 0,5$ – уменьшение скорости счёта во внешних зонах мишени из-за меньшей их толщины по сравнению с толщиной внутренней (шаровой) зоны.

Поэтому можно ожидать, что для суммарного числа событий величина $\alpha \approx 1$.

В таблице 4.2 приведена ожидаемая статистика, число зарегистрированных (т.е. суммарное число событий в L и K пиках) событий (n_i), в большой, шаровой, зоне мишени в каждом облучении галлиевой мишени источником ^{58}Co активностью 400 кКи. Ожидаемые количества событий в двух других зонах мишени равны половине от приведённых, соответственно средним длинам пробегов нейтрино в Ga этих зон. Облучения проводятся со значениями $t_1 = 16 \text{ сут}$ и $t_2 = 1 \text{ сут}$; захваты солнечных нейтрино не рассматриваются. Для оценок может также быть полезной информация о дополнительных облучениях, сверх принятого количества $m=10$.

В первой строке Таблицы 4.2 стоит номер облучения. Во второй строке даны значения времён окончания облучений относительно начала первого облучения. В последней строке – суммарная статистика для $m=10$ и 14 облучений.

Таблица 4.2 – Ожидаемая статистика событий (n_i) в I зоне мишени в каждом облучении источником ^{58}Co активностью 400 кКи

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
T, сут	16	33	50	67	84	101	118	135	152	169	186	203	220	237
n_i	169	143	121	102	87	73	62	53	45	38	32	27	23	19
$\Sigma(n_i)$										891				993

4.1.6. Чувствительность к определению параметров осцилляций

На рисунке 4.5 приведены области чувствительности эксперимента BEST2 с источником ^{58}Co активностью 400 кКи для 3-зонной галлиевой мишени к определению параметра Δm^2 .

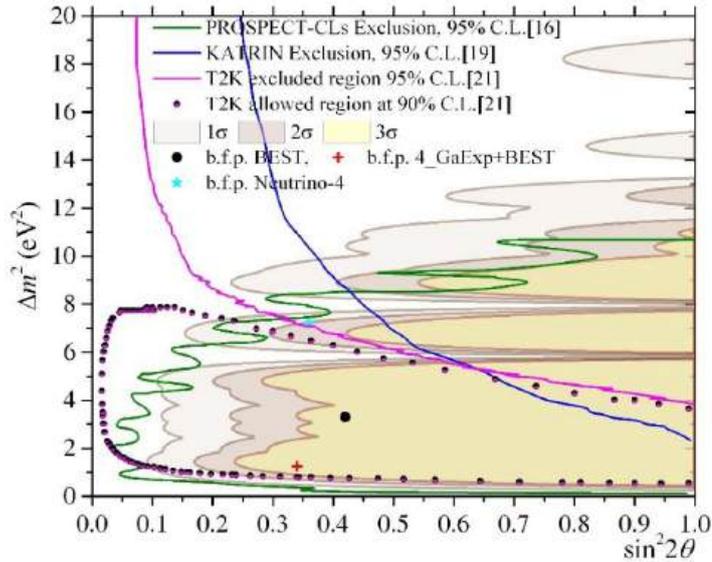


Рисунок 4.5 – Области чувствительности к определению параметра Δm^2 на 3 зонной мишени с внутренней сферой. На рисунке приведены также области параметров, которые исключены по анализу экспериментов PROSPECT [50], KATRIN [51] и T2K [52] (справа от ограничивающих кривых), а также показана область допустимых параметров, полученная в эксперименте T2K [52]

Области чувствительности к определению параметров осцилляций определялись по соотношениям между скоростями захвата в разных зонах галлиевой мишени при различных значениях параметров осцилляций.

В отсутствие осцилляций ожидаемая скорость захвата нейтрино в зоне мишени i равна

$$v_{0i} = A \sum_n g_i(L_n) \quad (4.9)$$

Здесь A – множитель, включающий активность источника, сечение захвата нейтрино в галлии и плотность атомов галлия в мишени. Суммирование проводится по всем длинам L по значениям функции $g_i(L)$ – распределениям вероятностей захвата нейтрино в галлии в зоне мишени i по расстояниям, показанным на рисунке 4.2.

В условиях осцилляций ожидаемые скорости захвата будут равны

$$v_{ilk} = A \sum_n g_i(L_n) P_{ee_n lk} \quad (4.10)$$

Здесь

$$P_{ee_n lk} = P_{ee_n}(\Delta m_l^2, \sin^2 2\theta_k) \quad (4.11)$$

вероятность выживания электронных нейтрино на расстоянии L_n от точки рождения в условиях осцилляций с параметрами $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (\Delta m_l^2, \sin^2 2\theta_k)$. Для источника с двумя

линиями нейтрино, каким является источник ^{58}Co , вероятность выживания вычисляется по формуле $P_{ee} = P_1 \frac{1 + \alpha \frac{P_2}{P_1}}{1 + \alpha}$, где $\alpha = \frac{f_2 \sigma_2}{f_1 \sigma_1}$; P_1 и P_2 – вероятности выживания нейтрино с энергиями E_1 и E_2 , а f_i и σ_i – выходы нейтрино таких энергий в распадах изотопа источника и сечения захвата их в галлии. Для ^{58}Co $E_1 = 1497$ кэВ, $f_1 = 0,988$, $\sigma_1 = 253 \cdot 10^{-46}$ см² и $E_2 = 633$ кэВ, $f_2 = 0,012$, $\sigma_2 = 46,5 \cdot 10^{-46}$ см², и $\alpha = 0,00255$.

В анализе мы использовали относительные скорости захвата нейтрино в зоне мишени i в условиях осцилляций: $R_{ilk} = \frac{v_{ilk}}{v_{oi}}$

Для каждой точки параметров осцилляций (l, k) находим разности $D(l, k) = \max_{i, j=1,2,3} |1 - \frac{R_{ilk}}{R_{jlk}}|$. Т.о. значение $D(l, k)$ определяется максимальной разностью между ожидаемыми скоростями захвата в разных зонах мишени для данных значений параметров осцилляций. Пример скоростей захвата для разных значений параметра Δm^2 при фиксированном значении $\sin^2 2\theta$ приведён на рисунке 4.3.

Границы областей чувствительности строились по элементам двумерной матрицы $D(l, k)$, которая определялась для значений Δm^2 с шагом 0,05 эВ² и для $\sin^2 2\theta$ с шагом 0,002, по значениям $D(l, k) = 1\sigma$, 2σ и 3σ , где стандартное отклонение $\sigma = 7\%$. Значение 7% примерно соответствует статистической ошибке ожидаемого результата измерения скорости счёта в одной из внешних зон (2-й или 3-й) в отсутствие осцилляций. Т.о. для построения областей чувствительности мы использовали упрощённую схему с фиксированной статистической ошибкой. Такое упрощение практически не влияет на определение границ областей чувствительности, так как ошибка заметно меняется только при больших амплитудах осцилляций, т.е. в области больших значений $\sin^2 2\theta$.

Построенные таким образом кривые ограничивают области, внутри которых значения параметров осцилляций $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta)$ могут быть определены однозначно для уровней значимости 2σ и выше. В этом случае области допустимых параметров осцилляций образуют единую компактную область с неопределённостями порядка нескольких десятков процентов. Вне зоны чувствительности области допустимых значений параметра Δm^2 распадаются на множество разделённых областей с разными значениями Δm^2 , а при малых амплитудах $\sin^2 2\theta$ получаемые области допустимых значений Δm^2 распределяются непрерывно от некоторого малого значения до бесконечности. В таких случаях считается, что параметр Δm^2 определить нельзя. Примеры областей допустимых параметров осцилляций, которые могут получиться по результатам эксперимента, приведены на рисунках 4.6 и 4.7.

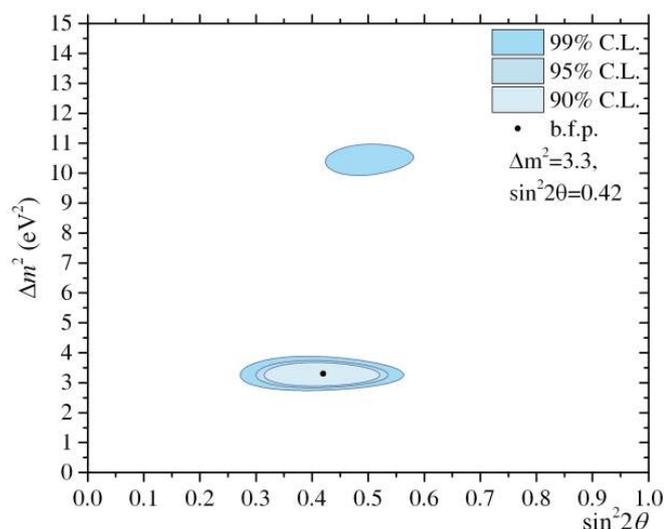


Рисунок 4.6 – Пример областей допустимых параметров осцилляций, которые находятся внутри области чувствительности эксперимента: $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (3,3 \text{ эВ}^2, 0,42)$ при измеренных скоростях счёта $(R_1, R_2, R_3) = (0,70, 0,78, 0,94)$

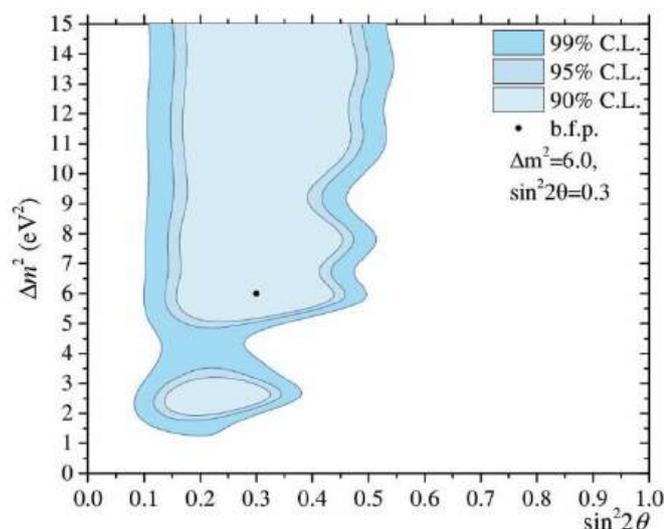


Рисунок 4.7 – Пример областей допустимых параметров осцилляций, которые не попадают в область чувствительности эксперимента: $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (6,0 \text{ эВ}^2, 0,3)$ при измеренных скоростях счёта $(R_1, R_2, R_3) = (0,84, 0,82, 0,85)$

На рисунке 4.5 также приведена кривая, исключающая область параметров осцилляций, по данным эксперимента PROSPECT [50]. Видно, что эти данные практически полностью исключают область параметров осцилляций, к которой чувствителен новый галлиевый эксперимент. Часть области чувствительности к определению допустимых параметров эксперимента BEST2 исключается также данными эксперимента T2K [52]. При этом область допустимых параметров осцилляций, полученная в том же эксперименте T2K [52], может быть проверена в эксперименте BEST2. Кроме того, в работе [53] по данным эксперимента IceCube получены области допустимых параметров осцилляций в стерильные

состояния наблюдаемых мюонных нейтрино, включающие значения параметра $2,4 \text{ эВ}^2 < \Delta m^2 < 9,6 \text{ эВ}^2$ на уровне значимости 90%. На рисунке 4.5 ограничения IceCube не приводятся, поскольку амплитуды осцилляций в работе [53] заданы в других единицах ($|U_{\mu 4}|^2$ и $|U_{\tau 4}|^2$).

На рисунке 4.6 показан пример реализации, когда считается, что параметры осцилляций попадают внутрь области чувствительности. На рисунке область допустимых параметров оказывается локализованной в ограниченной области параметров. Пример того, когда параметры осцилляций находятся вне области чувствительности к определению параметров осцилляций, показан на рисунке 4.7. Здесь параметр Δm^2 почти равновероятно может принимать любые значения от $\sim 6 \text{ эВ}^2$ до бесконечности.

4.1.7. Возможные результаты эксперимента BEST2

Рассмотрим, какие физические результаты можно ожидать от эксперимента BEST2. Для этого зададимся двумя параметрами – 1) суммарная скорость счёта по всем зонам мишени R_0 и 2) максимальная разница между скоростями счёта в разных зонах мишени ΔR . Суммарная скорость счёта R_0 будет сравниваться со скоростью счёта $R=0,80\pm 0,05$, полученной по результатам всех предыдущих галлиевых экспериментов с источниками.

В зависимости от этих двух параметров результат эксперимента может быть отнесён к одному из трёх вариантов:

1) Если $R_0 \approx R$ и $\Delta R > 2\sigma$, т.е. полученная скорость счёта примерно совпадает со скоростью предыдущих галлиевых экспериментов с источниками и наблюдается значительная разница в скоростях счёта в разных зонах мишени, то это будет означать, что галлиевая аномалия связана с осцилляциями в стерильные состояния и параметры этих осцилляций будут определены в этом же эксперименте, т.е. параметры осцилляций находятся внутри области чувствительности к определению параметров.

2) Если $R_0 \approx R$ и $\Delta R < 2\sigma$, т.е. разница в скоростях счёта в разных зонах мишени оказывается небольшой, то стерильные осцилляции остаются возможным решением проблемы галлиевой аномалии, галлиевая аномалия будет подтверждена на более высоком статистическом уровне значимости, но параметры осцилляций определены не будут, т.е. параметры осцилляций находятся вне области чувствительности к определению параметров.

3) Если $R_0 \neq R$, т.е. измеренная скорость счёта будет заметно отличаться от скоростей счёта в предыдущих галлиевых экспериментах, то при любой разнице в скоростях счёта между разными зонами мишени будет определена зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино. В этом случае осцилляции в стерильные состояния не могут быть

причиной галлиевой аномалии, хотя при этом стерильные осцилляции могут давать неосновной вклад в галлиевую аномалию. И для объяснения основного вклада в галлиевую аномалию придётся искать другие гипотезы.

4.1.8. Радиационная активность источника

Оценим условия безопасной работы с источником с точки зрения радиационного облучения персонала лаборатории.

Мощности дозы облучения персонала источником ^{58}Co будем оценивать по формуле: $\text{МД} = A \cdot \varepsilon_g \cdot E_\gamma \cdot D \cdot f / m$.

Здесь A – активность источника; ε_g – геометрическая эффективность, т.е. вероятность попадания фотона, вышедшего с поверхности защиты источника, в тело человека; E_γ – энергия фотона; D – фактор прохождения излучения через защиту; f – выход излучения в распаде изотопа; m – масса среднего человека.

Считаем, что в непосредственной близости от источника, в 10 см от его центра, геометрическая эффективность $\varepsilon_g = 0,2$ и масса среднего человека $m = 70$ кг. По мере удаления от источника на расстояние L мощность дозы уменьшается пропорционально $1/L^2$.

Для оценок предполагалось, что диаметр излучающей части источника составит около 10 см. Тогда, поскольку труба, по которой источник опускается в центр галлиевой мишени (рисунок 4.1), имеет диаметр 22 см, биологическая защита источника может иметь толщину до 4 см. Биологическая защита – неснимаемая оболочка активной части источника – может быть изготовлена из вольфрама,

В таблице 4.3 приводятся значения коэффициента D прохождения такой защиты для γ линий разных элементов, посчитанные по справочным таблицам из [54].

Для источника ^{58}Co активностью 400 кКи мощность дозы непосредственно за биологической защитой из вольфрама толщиной 4 см составит 5,9 мЗв/с. Здесь учтено также излучение от ^{60}Co , активность которого будет около 1% от начальной активности ^{58}Co .

Таблица 4.3 – Коэффициент подавления фотонного излучения для нескольких линий разных источников после прохождения вольфрамовой защиты толщиной 4 см

E_γ , кэВ	511 (^{58}Co)	811 (^{58}Co)	864 (^{58}Co)	1115 (^{65}Zn)	1173 (^{60}Co)	1332 (^{60}Co)	1675 (^{58}Co)
D , 4 см	3,2e-5	0,0022	0,0029	0,0083	0,0096	0,014	0,025

При допустимой дозе облучения для персонала категории А в течение 1 года $D_0 = 20$ мЗв [55] вблизи источника можно находиться не более $t = D_0 / \text{МД} = 3,4$ с.

Для сравнения, около источника ^{65}Zn такой же активности (400 кКи) при той же биологической защите можно находиться не более 0,65 с.

Поэтому для работы с источником нужна дополнительная защита. Использование в качестве дополнительной защиты, например, свинцовых кирпичей толщиной 10 см увеличивает допустимое время работы на расстоянии 1 м от источника до 10 часов, т.е. становится вполне реальным для проведения относительно сложных работ. При такой защите (4 см W + 10 см Pb) доля излучения от ^{60}Co и от линии 1675 кэВ в мощности дозы повышается до ~10%.

Дополнительная свинцовая защита будет задействована только во время нахождения источника вне трёхзонной мишени, во время перемещения его между устройствами, в которых будет измеряться его активность.

4.1.9. Выводы

В предлагаемом новом галлиевом эксперименте BEST2 будет исследована галлиевая аномалия, которая может быть указанием на проявление новой физики. Разделение галлиевой мишени BEST2 на 3 независимых зоны и использование монохроматического источника нейтрино ^{58}Co активностью 400 кКи делает эксперимент чувствительным к гипотезе осцилляций в стерильные состояния в широком диапазоне параметров осцилляций. При попадании параметров осцилляций в области чувствительности эксперимента, значения обоих параметров – амплитуды $\sin^2 2\theta$ и частоты Δm^2 – будут определены в эксперименте. В область чувствительности эксперимента попадают наименее вероятные значения параметров осцилляций, полученных в предыдущих галлиевых экспериментах с искусственными источниками нейтрино, а также в эксперименте Нейтрино-4.

Для 10 (десяти) облучений источником ^{58}Co галлиевой мишени потребуется около полугода, полученная в эксперименте статистика будет сравнима со статистикой эксперимента BEST, и ошибки обоих экспериментов будут сравнимы.

Поскольку энергия нейтрино, рождающихся от источника ^{58}Co , примерно в 2 раза выше, чем в источниках ^{51}Cr и ^{37}Ar , использовавшихся в предыдущих галлиевых экспериментах, в эксперименте BEST2 будет также исследована зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино. Наблюдение заметного отличия полной скорости захвата нейтрино в экспериментах с нейтрино разных энергий будет означать, что стерильные осцилляции не являются основной причиной галлиевой аномалии. В этом случае необходимо искать другие причины галлиевой аномалии.

Источник ^{58}Co для эксперимента BEST2 может быть изготовлен из 15 кг природного никеля или из 10 кг никеля, обогащённого по изотопу ^{58}Ni , в (n, p) реакциях в реакторах на быстрых нейтронах с плотностью потока $\Phi \sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Эксперимент BEST2 предоставляет уникальную возможность для обнаружения и исследования явлений, связанных с «новой физикой».

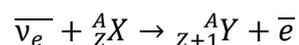
4.2. Антинейтринные источники на основе изотопов из отработанного реакторного топлива

4.2.1. Цель эксперимента

Целью эксперимента на галлиевой мишени с антинейтринным источником является исследование галлиевой аномалии с точки зрения переходов нейтрино в антинейтрино.

Галлиевая аномалия, т.е. малая скорость захвата нейтрино от искусственных источников на галлиевой мишени, частично может быть связана с переходами нейтрино от источников в антинейтрино, которые не регистрируются в галлиевом детекторе.

Переходы антинейтрино в нейтрино исследовались в экспериментах типа



на хлорных мишенях (${}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar}$), которые облучались антинейтрино от ядерных реакторов в Брукхейвене и Саванна-Ривер группой Р.Девиса в 1955-59 гг [56,57].

Вероятности переходов $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$ получались как отношение измеренного в эксперименте сечения реакции $\sigma_{\text{эксп}}$ и теоретического сечения такого процесса при условии тождественного равенства нейтрино и антинейтрино ($\nu_e \equiv \bar{\nu}_e$): $\alpha^2 = \frac{\sigma_{\text{эксп}}}{\sigma_{\text{теор}}}$. Величина α характеризует перекрытие состояний нейтрино и антинейтрино. Полученное в экспериментах Р. Девиса ограничение на вероятность перехода $\bar{\nu}_e$ в ν_e равно $\alpha^2 < 0.06$ на уровне значимости 68%.

В новом эксперименте на галлиевой мишени ГГНТ с источником антинейтрино будет исследована возможность переходов $\bar{\nu}_e \leftrightarrow \nu_e$ на уровне 3σ с чувствительностью в 30-40 раз выше, чем в экспериментах Р. Девиса.

4.2.2. Современные пределы на переходы нейтрино в антинейтрино

Предположение о переходах нейтрино-антинейтрино, вообще говоря, вступает в противоречие с результатами экспериментов Borexino [58] и KamLand [59] ($\alpha^2 < 1,3 \cdot 10^{-4}$ и $5,3 \cdot 10^{-5}$ на 90% CL), которые не обнаружили электронных антинейтрино в потоке борных нейтрино от Солнца.

Однако, солнечные нейтрино регистрируются после прохождения расстояния от источника $L \sim 150$ млн км, из-за чего они доходят до Земли расцепившимися, когда когерентное взаимодействие между отдельными массовыми состояниями прекращается, в отличие от нейтрино от искусственных источников.

В эксперименте с источниками могут быть исследованы переходы антинейтрино в нейтрино с вероятностью порядка $\alpha^2 \sim 10^{-2}$. Хотя эта величина на 2 порядка уступает значениям, полученным в солнечных измерениях, но на расстояниях между источником и детектором $L \sim 1$ м можно ожидать, что декогеренции нейтрино не происходит.

Прямые эксперименты по регистрации переходов нейтрино в антинейтрино на коротких расстояниях со времён Р. Девиса не проводились, и положительный результат эксперимента не только поможет решить проблему галлиевой аномалии, но и будет значительным вкладом в теорию нейтринных осцилляций.

4.2.3. Источник антинейтрино

В ходе взаимодействия со структурами Росатома был получен ответ на единственную возможность изготовления антинейтринного источника на основе изотопа ^{90}Sr с активностью 80 кКи.

Наши оценки, представленные в работе предыдущего этапа, показывают, что использование источника ^{90}Sr активностью 100 кКи с галлиевым детектором ГГНТ позволят наблюдать такие переходы, если их количество будет $\alpha^2 > 1,6\%$. Т.е. чувствительность эксперимента будет в 12 раз выше чувствительности эксперимента Девиса. Измерения будут проводиться многократным облучением галлиевой мишени в течение 30 суток каждое. Чтобы получить указанную чувствительность, достаточно будет провести 10 облучений.

Чтобы получить такой же результат на источнике активностью 80 кКи, необходимо будет выполнить не менее 16 облучений. Т.е. эксперимент займет более одного года. В таком случае при отсутствии должного финансирования на поддержку существующей наземной и подземной инфраструктуры ГГНТ БНО ИЯИ РАН стабильность работы таких сложных систем, как галлиевый телескоп, в столь длительный срок может стать сложной проблемой.

Если сделать, как планировалось, только 10 облучений источником такой активности, чувствительность будет составлять $\alpha^2 > 2,0\%$, что также является значимым результатом.

4.2.4. Выводы

Лаборатория в основном готова к проведению нового эксперимента с источником антинейтрино. Все системы эксперимента, включая системы работы с источником – перемещения источника, калориметрических измерений активности, измерения фотонного излучения – и системы радиохимических процедур эксперимента полностью будут взяты из эксперимента BEST. Извлечения будут проводиться без разделения на зоны, т.е. для каждого извлечения потребуется только один счётчик. Принципиальных изменений в существующее оборудование ГГНТ для этого эксперимента не требуется.

Положительный результат эксперимента, т.е. регистрация событий от источника, будет значительным вкладом в решение галлиевой аномалии и в понимание природы нейтринных осцилляций.

5. Проведение физических измерений на полутонном прототипе ББНТ

В 2024 году продолжались измерения на полутонном прототипе ББНТ.

С полутонным прототипом проекта Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) выполнены измерения эффекта гашения сцинтилляционного излучения и концентрации радиоактивного изотопа углерода ^{14}C . В данном прототипе используется жидкий сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола с добавлением PPO (2,5-diphenyloxazole) в качестве сцинтилляционной добавки с концентрацией 2 г/л и bis-MSB (1,4-Bis(2-methylstyryl)benzene) с концентрацией 10 мг/л в качестве сместителя (WLS) спектра. Световой выход жидкого сцинтиллятора составляет ~ 10000 фотонов/МэВ. Максимум спектра излучения сцинтиллятора достигается на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 425$ нм. При малых энергиях заряженных частиц, при увеличении плотности ионизации среды наблюдается уменьшение световыхода сцинтилляторов. Возрастание плотности ионизации начинаются процессы самовзаимодействия и самогашения ионизационных центров среды, что и приводит к уменьшению световыхода. Эти процессы описываются формулой Биркса:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (5.1)$$

kB – коэффициент Биркса, хорошо описывающий эффект гашения; L – световой выход сцинтиллятора; S – эффективность сцинтиллятора.

Коэффициент Биркса зависит от особенностей сцинтилляционных материалов, имеет характерные значения для каждой среды и не является мировой константой. Значение этого параметра важно для адекватного описания отклика детектора в области малых энерговыделений. Для измерения коэффициента Биркса необходимо тщательно измерить зависимость полного световыхода сцинтиллятора L от энергии заряженной частицы:

$$L(E) = \int_0^E \frac{S dE}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (5.2)$$

На рисунке 5.1 показана экспериментально измеренная зависимость световыхода жидкого сцинтиллятора от энергии электронов в полутонном прототипе проекта ББНТ. Экспериментально измеренная зависимость $L(E)$ фитируется параметром kB , красная кривая на рисунке 5.1 В результате фитирования получено следующее значение коэффициента Биркса: $kB = 0,016 \pm 0,001 \text{ cm MeV}^{-1}$.

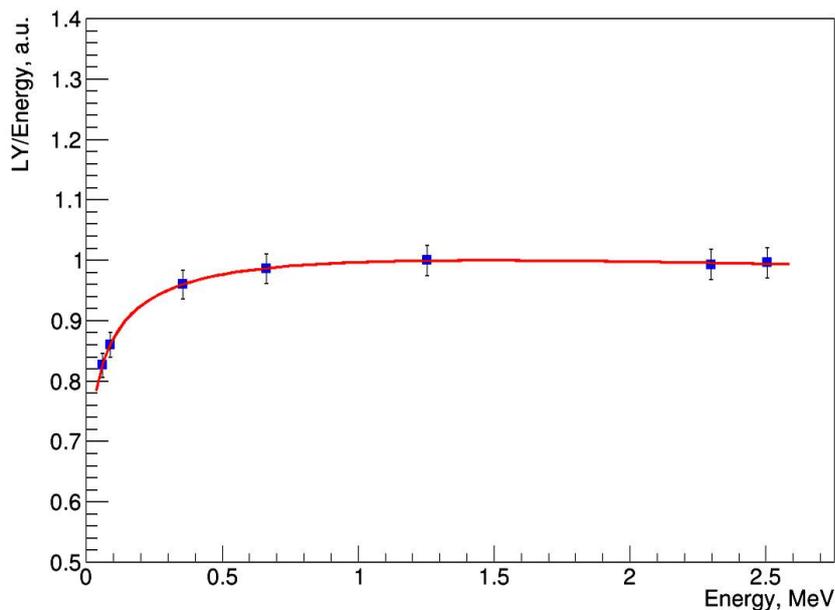


Рисунок 5.1 – Зависимость световыхода жидкого сцинтиллятора от энергии, измеренная с полутонным прототипом ББНТ

Полученное значение коэффициента Биркса хорошо согласуется с другими измерениями, проведенными в мире с жидкими сцинтилляторами на основе линейного алкилбензола.

Другим важным параметром для работы с жидкими органическими сцинтилляторами в области энергий $E < 100$ кэВ является концентрация радиоактивного изотопа углерода ^{14}C . Бета-спектр распада ^{14}C достигает максимальной величины $Q_b = 156$ кэВ. События, вызванные этим распадом, начинают доминировать при энергиях $E < 100$ кэВ, существенно ограничивая возможности экспериментов в области малых энергий. В силу этого, концентрация радиоактивного изотопа углерода ^{14}C является одним из важнейших параметров жидкосцинтилляционных детекторов.

На рисунке 5.2 показан энергетический спектр фоновых событий, измеренный с полутонным прототипом проекта ББНТ. В измеренном спектре хорошо виден пик в области 20 кэВ, обусловленный событиями от распада радиоактивного изотопа углерода ^{14}C . Из анализа измеренного спектра после учета фона от естественной радиоактивности получено значение отношения концентрации радиоактивного изотопа углерода ^{14}C к стабильному изотопу ^{12}C - $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$: $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \leq 7 \times 10^{-16}$

Полученное значение может рассматриваться в качестве верхнего предела концентрации ^{14}C .

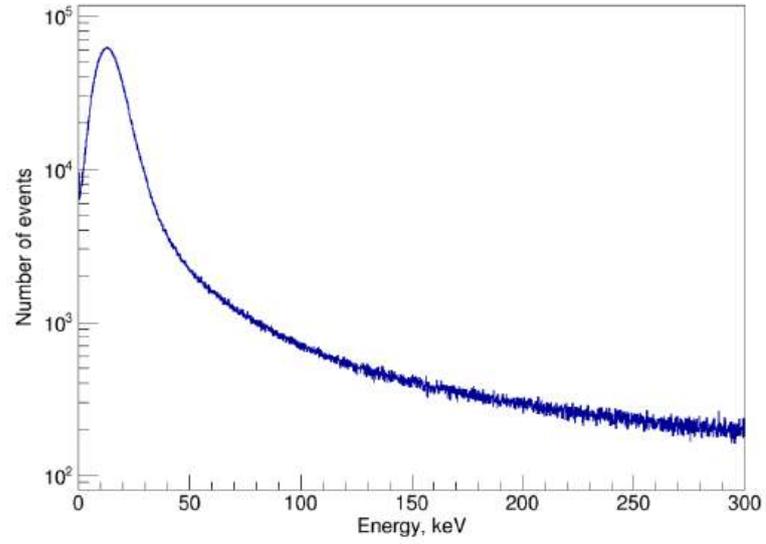


Рисунок 5.2 – Энергетический спектр фоновых событий, измеренный с полутонным прототипом ББНТ

Из анализа более энергичной части спектра получено ограничение на содержание ^{238}U и ^{232}Th на уровне: $^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th} < 10^{-15}$ г/г

6. Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле

На рисунке 6.1 приведен результат [60] подгонки энергетического спектра одиночных событий III фазы эксперимента Борексино суммой событий от различных источников с учетом вклада от $^{40}\text{K-geo-}\nu$. Под результатом подгонки мы будем понимать сумму различных источников событий, вклады которых получены в результате минимизации функции χ^2 в многомерном пространстве переменных. Переменными являлись полные скорости счёта событий от различных источников в детекторе Борексино. Горизонтальная шкала дана в единицах: число сработавших ФЭУ. Зависимость числа сработавших ФЭУ от энерговыделения в сцинтилляторе следующая: при энерговыделении в 0,5 МэВ срабатывает 220 ФЭУ, при 1,0 МэВ – 410 ФЭУ, при 1,5 МэВ – 590.

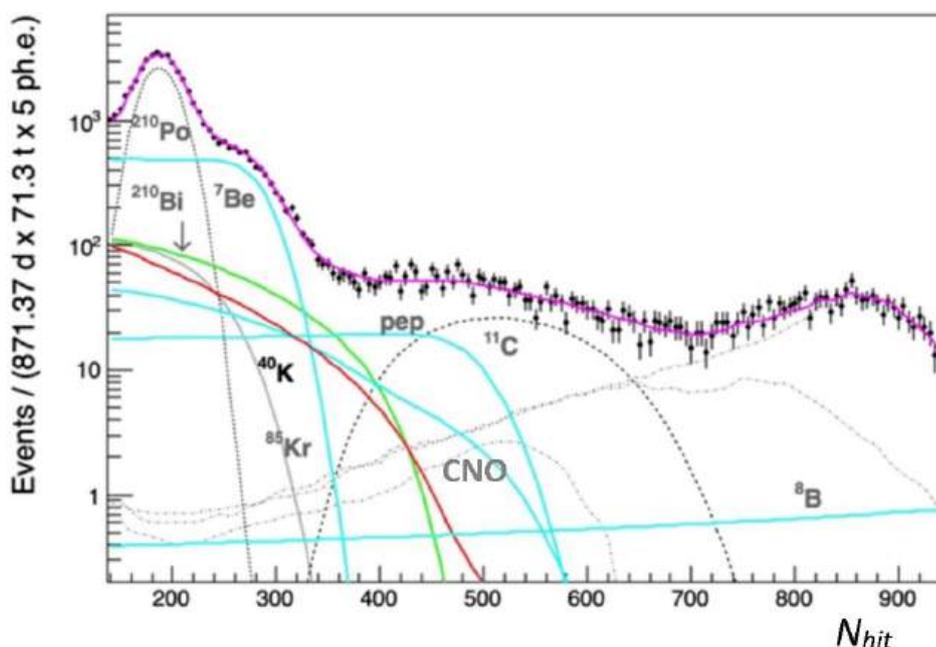


Рисунок 6.1 – Энергетический спектр одиночных событий детектора Борексино. Кривые – вклады различных источников событий и их сумма, полученные в результате подгонки к экспериментальным данным для $\chi^2 = 161$ при 162 экспериментальных точках. Красная кривая – вклад от $^{40}\text{K-geo-}\nu$ событий

Показаны также вклады различных источников событий, полученные в результате подгонки к экспериментальным данным. У большинства кривых стоит знак, поясняющий природу одиночных событий, для которых построена кривая. Это – распады ^{210}Po , ^{85}Kr , ^{210}Bi , содержащихся в сцинтилляторе, рассеяние на электронах солнечных нейтрино от ^7Be , pep, CNO, ^8B . Показан вклад от распада изотопа ^{11}C , образующегося при взаимодействии мюона с атомными ядрами углерода сцинтиллятора. Не помеченные штрих пунктирные

линии показывают вклад от гамма-квантов от распадов радиоактивных элементов в окружающем детектор грунте и конструкционных материалах. Переменными параметрами при подгонке являлись площади под кривыми, которые пропорциональны полным скоростям счёта событий от конкретных источников событий. Спектры (нормированные на 1) от вкладов различных источников были нами рассчитаны самостоятельно, и они совпали со спектрами, используемыми коллаборацией Борексино.

Рассмотрим таблицу 6.1, в которой отражена последовательность нашего анализа. Величины в этой таблице есть вышеупомянутые параметры – полные скорости счёта одиночных событий от различных источников в единицах $\text{cpd}/100\text{t}$ (число событий в день в 100 тоннах сцинтиллятора), полученные в результате подгонки к экспериментальному спектру Борексино. В столбце 1 показан результат подгонки стандартным набором источников событий, использованным коллаборацией Борексино. Результат согласуется с анализом, сделанным этой коллаборацией.

Таблица 6.1 – Полные скорости счёта одиночных событий от различных источников, полученные в результате подгонки к экспериментальному спектру Борексино даны в столбцах 1, 2, 3 и 4. В столбцах LZ и HZ даны величины, предсказанные моделями Солнца с малой и большой металличностью соответственно. Величины даны в единицах $\text{cpd}/100\text{t}$. В последней строке даны значения χ^2

Component	1	2	3	4	LZ	HZ
Per	2,74	$2,8 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,3$	2,8	2,7
^7Be	$48,4 \pm 1,2$	$45,9 \pm 1,3$	$45,4 \pm 1,6$	$43,6 \pm 1,5$	44	48
^8B	0,16	0,16	$0,12 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,05$	0,12	0,18
CNO	$7,6 \pm 1,2$	$4,4 \pm 0,6$	$5,2 \pm 1,6$	$2,6 \pm 0,6$	3,5	5,0
^{40}K	0	11	11	$19,1 \pm 2,5$		
χ^2	198	171	169	161		

На следующем этапе мы добавили в стандартный набор источников событий дополнительно ^{40}K -geo- ν события и произвели подгонку, позволяя параметрам меняться в определённых пределах. В столбце 2 показан результат при фиксированном ^8B и ограниченном ^{40}K . В столбце 3 показан результат только с ограниченным ^{40}K , наконец в столбце 4 показан результат со всеми параметрами свободными.

В работе [60] в анализ введены дополнительные возможные источники событий в детекторе Борексино, а именно гео-antineutrino от распадов урана и тория в теле Земли, а также антинейтрино от ядерных реакторов. Скорость счёта событий от этих источников известна из независимых экспериментов, она близка к нулю для обоих источников. Целью анализа было убедиться, что процедура анализа, применяемая к данным детектора Борексино, отбросит эти источники. Это даст дополнительный аргумент утверждению, что

результаты анализа отражают реально существующую природу вещей. Оказалось, что наш анализ действительно дал скорость счёта событий от гео-antineutrino от распадов урана и тория в теле Земли, а также антинейтрино от ядерных реакторов близкой к нулю. При этом мы не ограничивали возможную скорость счёта событий от гео-antineutrino от распадов калий-40 и получили значительную скорости счёта для этого источника, согласующуюся с предсказанием модели Богатая водородом Земля (столбец 4 таблицы). При таком подходе мы получили значение функции хи-квадрат равным числу экспериментальных точек (162 точки). Это говорит, что наша модель источников событий, включающая события от гео-antineutrino от распадов калия-40 наиболее вероятна. Модель источников без событий от гео-antineutrino от распадов калий-40 обеспечивает хи-квадрат равным 198 (столбец 1 таблицы) и должна быть отвергнута. Оказалось, что полученные скорости счёта от солнечных нейтрино (это события от рер-нейтрино, ^7Be -нейтрино, ^8B -нейтрино и CNO-нейтрино) согласуются с предсказанием теоретической модели Солнца, в которой реализуется более низкое содержание тяжёлых элементов в Солнце. Эта модель называется Солнечной моделью с малой металличностью. В таблице в колонках, обозначенных LZ и HZ приведены расчётные значения для солнечных моделей малой и большой металличности соответственно. Итак, мы добились очень хорошего согласия с экспериментальными данными, при этом подтвердились предсказания модели Богатая водородом Земля и Солнечной модели с малой металличностью.

7. Запуск оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций

7.1. Эксплуатация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц^{1/2} к метрическим вариациям

За 25 месяцев непрерывной работы установки ОГРАН исследованы особенности её тепловой релаксации, показавшие важность активной термо-стабилизации камеры ВК-10 акустического детектора. Требуется прецизионный температурный контроль теплового режима камеры ВК-10 с помощью активного термо чехла, подобного используемому для камеры дискриминатора.

Функционирование детектора ОГРАН предполагает контроль сейсмического фона по длине 4х километрового туннеля БНО. Эти данные используются при фильтрации аномальных выбросов установки. Они позволяют также выполнить расчет гравитационных возмущений, индуцированных сейсмической динамикой (вариациями плотности среды) или т.н. «ньютоновских шумов», от которых нет экранировки. Поиск европейских подземных лабораторий с низким уровнем ньютоновского шума актуален в связи с проблемой размещения гравитационно-волновых интерферометров нового поколения. В отчетный период был продолжен статистический анализ многолетнего банка данных по сейсмо-гравитационным шумам в БНО в предположении, что детектором служит оптический интерферометр на свободных массах. Вычисления потенциального вклада в ньютоновский шум по микро-сейсмическим данным, полученным в главной штольне БНО, показывают, что этот предел значительно ниже требований предъявляемых к такому известному 3G-детектору как «Телескоп Эйнштейна». В целом подтверждается высокое качество площадки БНО как места для размещения будущих поколений гравитационных детекторов.

Потребность прецизионной термо-стабилизации акустического резонатора детектора ОГРАН явно просматривается при слежении за спектральной плотностью теплового броуновского пика. Измерения спектра многократно проводились со спектральным разрешением 0,001 Гц. Центр резонансного пика ОГРАН приходится на частоту 1,3 кГц.

Даже очень слабые вариации (в пределах динамического диапазона) температуры акустического детектора ОГРАН влияют на положение центральной частоты броуновского пика. Отношение сигнала к шуму в таких измерениях зависит от точности оптических настроек и при удовлетворительной настройке достигает 60. Ширина резонансного пика составляет 0,002 Гц. Для его качественного спектрального разрешения необходимо накапливать сигнал не менее 1000 секунд. При этом в спектре внутри полосы резонансного пика попадут три точки дискретизации. Стабильность положения пика и полосы приема гравитационного сигнала важны для качественной работы детектора, в частности, для накопления слабых сигналов. Первые эксперименты обнаружили необходимость системы прецизионного активного удержания центральной частоты и обеспечения стабильного теплового фона в прилегающих помещениях в целом. При этом скорость релаксации температуры в режиме полного захвата составляет порядка 700 часов.

Расчет показывал, что для выхода системы регистрации за границы диапазона слежения достаточно изменения температуры детектора на 0,01 градуса. В связи с этим было принято решение экранировать вакуумную камеру основного детектора термо-чехлом с внутренним подогревом. Чехол представляет собой многослойную конструкцию описанную в отчете за 2023 год,

После установки термо-чехла на вакуумную камеру основного детектора температурная стабильность установки повысилась на два порядка. Уходы за границы диапазона слежения прекратились, установка перестала «чувствовать» присутствие человека рядом с камерой. Срывы слежения (рабочей точки) в обновленной установке происходят крайне редко, и в основном из-за внешних сейсмических воздействий или электрических импульсных наводок.

7.2. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций

Кроме экспериментальных работ с установкой ОГРАН, описанных выше, в отчетный период проводились теоретико-прикладные исследования.

Уточнялась стратегия параллельных наблюдений на ОГРАН и БПСТ для фильтрации сигналов коллапсаров. Требовалась конкретизация схемы анализа данных при совместном поиске нейтрино- гравитационных корреляций. Конечной целью является выход на режим непрерывного мониторинга (nu-gw) событий на детекторах БПСТ и ОГРАН.

В результате проведенных исследований в отчетный был предложен конкретный алгоритм поиска нейтрино-гравитационной корреляции (стимулированный явлением SN1987A).

Практическая обработка алгоритмов поиска двухканальных корреляций была проведена на временных отрезках конечной длительности с реальными выходными сигналами детекторов ОГРАН и БПСТ. Иллюстрации с комментарием представлены в работе [61].

Для детальной обработки был выбран временной отрезок между временными метками 1123–1855 ч, содержащий интервал 20 с, в котором наблюдалось 6 нейтринных событий.

Получена выборка пар (X, Y) нейтрино-гравитационных событий. Вначале определяется x_i – количество событий на нейтринном детекторе БПСТ в интервале 20 с; параллельно на гравитационном детекторе ОГРАН определяются значения y_j – количество выбросов за порог $1,5\sigma$ (и $3,5\sigma$) синхронных с БПСТ или с возможным сдвигом τ . В простейшей обработке, результаты которой приведены ниже, экстремум по величине временного сдвига не вычислялся. Гипотеза о наличии (или отсутствии) корреляции между случайными цепочками x_i, y_j проверялась с использованием критерия Стьюдента. Для проверки конкурирующих гипотез H_0 (нет корреляции) против гипотезы H_1 (есть корреляция) следует вычислить наблюдаемое значение случайной переменной t_0 (достаточной статистики) с $k = n - 2$ степенями свободы (см. [8]). При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $n = 95$ (на отрезке 20 сек интервал с числом нейтринных событий 6 и прилегающие к нему 20 секундные интервалы до и после) подсчет дает $t_0(\alpha, k) \approx 0,109173$. Из таблиц статистики Стьюдента следует, что критическая квантиль находится в границах $1,98 < t_0 < 2,0$, т.е. на порядок больше полученного экспериментального значения. Таким образом следует принять гипотезу об отсутствии значимой корреляции между цепочками нейтринных и гравитационных данных в данном иллюстративном примере. Очевидно, однако, что был использован упрощенный алгоритм без оптимизации наблюдаемой по величине взаимного временного сдвига нейтрино-гравитационных данных.

7.3. Регистрация астро-гео-физических возмущений кольцевым лазерным интерферометром (Гироскоп Саньяка)

Детектор ОГРАН конструктивно представляет дифференциальную схему двух оптических эталонов – резонаторов Фабри-Перо с общим источником оптической накачки. Плечи детектора (эталонны) по-разному реагируют на действие гравитационной волны благодаря их разным геометрическим размерам и ортогональной ориентации. Выходной сигнал ОГРАН пропорционален разности энергий оптических эталонов, в то время как у

гравитационных интерферометров он пропорционален энергии интерференции. (Сленговое название схемы ОГРАН – «компаратор оптических эталонов»).

На текущем этапе развития гравитационно-волновой астрономии внимание привлечено к интерферометрам комбинированного типа, сочетающим майкельсоновские интерферометры с ФП-эталоном и кольцевыми интерферометрами типа Гирскопа Саньяка (ГС). Последний инструмент представляет грави-инерциальный датчик вращательных и наклонных возмущений платформы, на которой он установлен. При использовании зеркал высоких технологий (с рекордной рефлексивностью и исчезающе малыми потерями) он превращается в уникальный прецизионный инструмент для фундаментальных и прикладных задач астрофизики и гравитации. В этой связи коллектив, создавший детектор ОГРАН, обладает серьезной подготовительной базой для освоения техники комбинированных интерферометров в подземных условиях БНО.

В отчетном 2024 году уже был выполнен ряд экспериментальных исследований с модельным прототипом кольцевого лазера (Гирскопа Саньяка). На рисунке 7.1 приведена фотография тестовой модели Гирскопа Саньяка, расположенная в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН. Результаты представлены ниже в этом отчете.

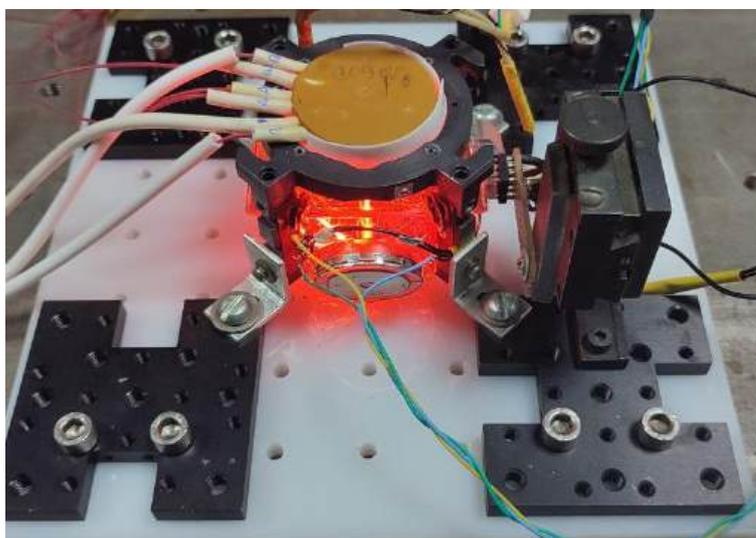


Рисунок 7.1 – Тестовая модель Гирскопа Саньяка диаметром 16 см установлена на ПК-14 в БНО ИЯИ РАН. Возможности: независимая стабилизация тока разряда в двух плечах области разряда; создание постоянной или знакопеременной частотной подстройки, перестройка длины резонатора в диапазоне до трех последовательных мод; система регистрации с компьютерной обработкой информации

7.4. Задачи проекта Гироскоп Саньяка (ГС) в БНО ИЯИ РАН

Основной целью проекта ГС является разработка и конструктивная реализация Большого Лазерного Гироскопа (БЛГ) в подземных условиях БНО ИЯИ РАН с разрешением по угловой скорости Ω земного вращения $\sim 10^{-9}$ рад/с. На пути к этой цели конкретной задачей первого подготовительного этапа представляется создание прототипа ЛГ (гироскопа дециметрового масштаба) с чувствительностью к вращательным ускорениям (10^{-7} – 10^{-8}) рад/(сГц^{1/2}), достаточной для регистрации вариаций скорости земного вращения с точностью в тысячные доли процента за время порядка одного часа. Также выполнение измерений фона деформационных наклонов главной штольни БНО на уровне тысячных долей угловой секунды. Сбор банка деформационно вращательных измерений с целью прогнозирования возможности создания крупногабаритного ЛГ (2–3 м) с рекордной чувствительностью 10^{-9} рад/(сГц^{1/2}) к вращательным ускорениям в специфике условий подземных лабораторий БНО ИЯИ РАН.

7.5. Измерение земного вращения малой моделью ГС

Для отработки техники непрерывной эксплуатации датчиков в московской лаборатории была собрана установка на базе навигационного датчика НПО Полус с длиной периметра $L = 20$ см и масштабным коэффициентом $M = 2,75$. (коэффициент преобразования вращения платформы в расщепление мод Саньяка). Схема управления обеспечивает стабильность тока разряда на уровне 0,1%, а также оснащена системами: перестройки резонатора между 4-мя последовательными продольными модами резонатора, формирование знакопеременной частотной подставки и ее дополнительную модуляцию медленным меандром для уменьшения влияние динамических зон захвата. Сбор данных автоматизирован и совмещен с контролем температуры датчика и системой контроля стабилизации резонатора. Подобное описание этих технических решений можно найти в литературе к нашей работе [62]. Для экранирования от внешних магнитных полей датчик помещен во внешний магнитный экран, изготовленный из трех слоев пленки ММР-50, обеспечивающий ослабление поля не менее чем на порядок.

Результаты проведенных первых экспериментов по наблюдению скорости земного вращения в лабораторных условиях (г. Москва) представлены в работе [62] на рисунке 7.1. Для широты нашей лаборатории ($55,70639^\circ$ с.ш.) расчетное значение угловой скорости составляет 12,426 угл. сек./с. Результирующее среднее значение скорости вращения, полученное в наших экспериментах, составило $12,41 \pm 0,01$ угл. сек./с (здесь и далее точность измерения задается стандартным отклонением результатов измерений от среднего значения). Наблюдается также явная корреляция изменения температуры датчика и

детектируемой скорости. Наш эксперимент проводился без какой-то специализированной системы стабилизации температуры. Видно, что данные, получаемые на участках с малыми изменения температуры, обладают гораздо меньшей дисперсией, нежели вся картина в целом. Это позволяет надеяться, что дополнительная термо-стабилизация датчика позволит уменьшить дисперсию и выйти на уровень точности 10^{-3} угл. сек/с ($\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/(с Гц^{1/2})) при накоплении данных за один час измерений.

В текущей ситуации пути повышения чувствительности и точности измерений сводятся к двум основным – совершенствование экранирования от внешнего магнитного поля и температурная стабилизация до уровня $\sim 1^\circ\text{C}$.

8. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино

8.1. Детекторы для регистрации нейтрино от вспышек Сверхновых

Многофункциональный детектор большого объема LVD [63] сконструирован в рамках Российско-итальянского международного соглашения для проведения исследований в области физики частиц и астрофизики. Детектор расположен в Лаборатории Гран Сассо, Италия на глубине 3600 м в.э. Установка состоит из 840 полуторакубовых сцинтилляционных счетчиков, образующих ячеистую структуру (рисунок 8.1). Детектор LVD состоит из трех башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по пять колонн в каждой. В такой конфигурации установка работает с 2002 г. Эффективное время работы LVD составляет 99,8%. Энергетический порог на регистрацию нейтрино составляет 4 МэВ.

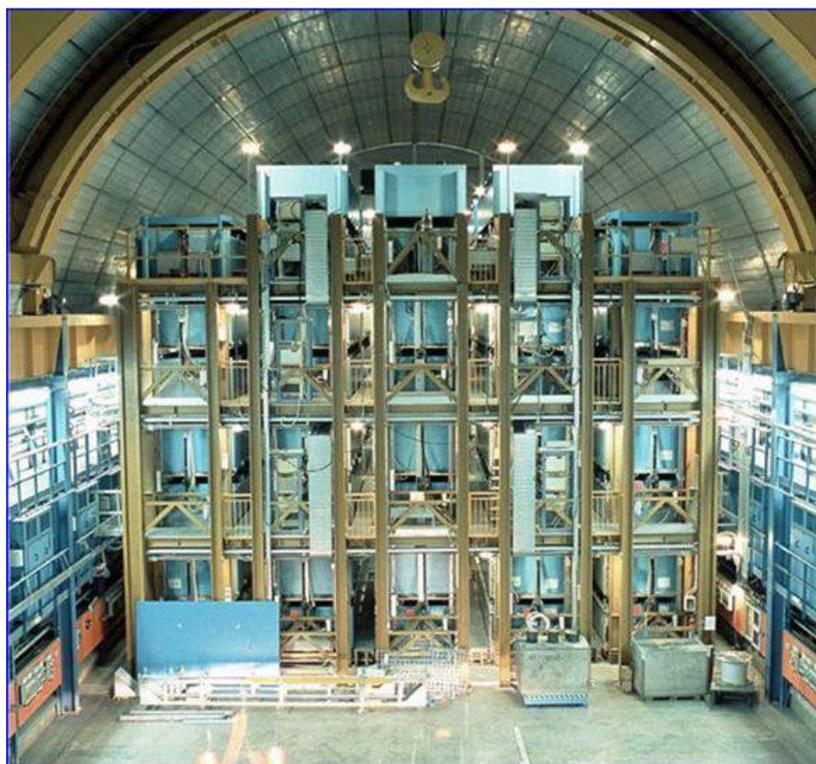


Рисунок 8.1 – Фотография установки LVD в экспериментальном зале Гран Сассо

Артемовский сцинтилляционный детектор (АСД), запущенный в 1978 г, имеет 100 тонн ЖС в корпусе цилиндрической формы с примерно равновеликими высотой и диаметром около 5,5 м (рисунок 8.2). Детектор находится в соляной шахте на глубине 570 м в.э. [64]. Энергетический диапазон определялся возможностями электроники, ориентированной на регистрацию IBD-реакции.

Детектор АСД закончил накопление экспериментальных данных в 2020 году. Сегодня ведется анализ данных за более чем 40 лет непрерывной работы. Проводится поиск редких событий в режиме off-line.



Рисунок 8.2 – Фотография установки АСД в экспериментальном зале соляной шахты

Основная задача нейтринных детекторов LVD и АСД – регистрация нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд. Преимущество АСД перед другими детекторами было его расположение в соляной шахте с низкой радиоактивностью. Преимущество LVD перед большими водяными детекторами заключается в наличии углерода в сцинтилляторе и железа, что позволяет разделять разные типы нейтрино. Детектор LVD способен зарегистрировать как электронные антинейтрино ($\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$), так и мюонные и тау-нейтрино и антинейтрино (реакция на углероде и железе).

Основными реакциями регистрации нейтрино в жидком сцинтилляторе являются:

а) реакция обратного β -распада в сцинтилляторе (реакция Райнеса–Коуэна): $\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$, $E(e^+) = 5\text{--}100$ МэВ, $n p \rightarrow D \gamma$, $E(\gamma) = 2,2$ МэВ.

б) Для LVD существуют дополнительные реакции νe , $\nu^{12}\text{C}$, $\nu^{56}\text{Fe}$ взаимодействия нейтрино с электронами и ядрами по заряженным и нейтральным токам в веществе установки, основными продуктами этих реакций являются электроны (e^\pm) и γ -кванты с ожидаемыми энергиями в диапазоне 2–60 МэВ, а также гамма-кванты (до 10 МэВ) от захватов нейтронов ядрами железа.

в) Для АСД существует дополнительная реакция взаимодействия ν_e с NaCl и реакция захватов нейтронов хлором, с вероятностью 85% (вылетают гамма-кванты с суммарной энергией 5–7 МэВ [65].

8.2. Предел на частоту вспышек в Галактике

В эксперименте LVD проводится анализ данных в режимах on-line и off-line [66]. Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме on-line осуществляется во временном окне меньше 20 с и с энергией импульсов выше 4 МэВ. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме on-line посылаются в систему SNEWS (рисунок 8.3). LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме on-line с 2005 года [66]. Всего в систему SNEWS было послано 180 алертов. За время существования SNEWS не было ни одного совпадения алертов между установками входящими в эту систему. Поиск кластеров нейтринных событий-кандидатов off-line осуществляется в течение временного окна с длительностью до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется длительностью окна и количеством событий внутри окна. Для каждого кластера, определяется частота имитации. Найденные кластеры в период с 1992 по 2024 г приведены в таблице 8.1.

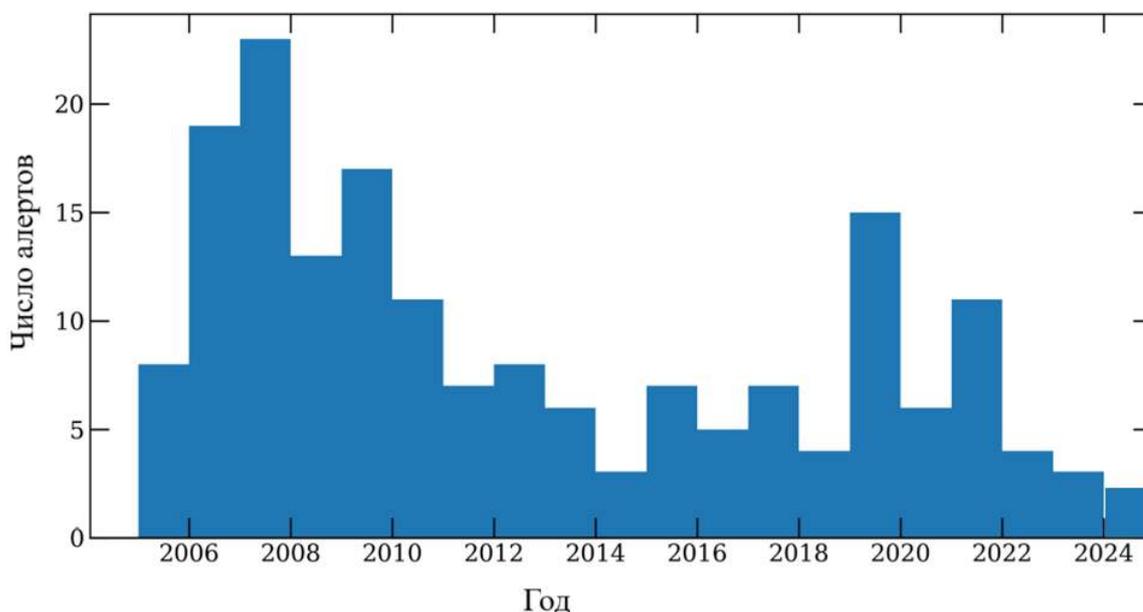


Рисунок 8.3 – Число кластеров, посланных в систему SNEWS

Таблица 8.1 – Список зарегистрированных редких кластеров с 1993 по 2024 г. Обозначения: UTC – дата и время найденного кластера, M – масса детектора, m – множественность кластера, dt , E – длительность и средняя энергия кластера, $F_{\text{им}}^{-1}$ – частота имитации фоном в г.

N	UTC	M , т	F_{bk} , с^{-1}	$D_{90\%}$, кпс	m	dt	$F_{\text{им}}^{-1}$, г	E , МэВ
1	16.04.1994 10:48:49	346	$1,08 \cdot 10^{-2}$	29,5	7	18,88	1,06	26,5
2	27.08.1995 16:18:10	431	$1,85 \cdot 10^{-2}$	35,0	7	5,49	11,16	36,2
3	07.10.1998 15:41:41	552	$1,40 \cdot 10^{-2}$	30,6	12	90,05	1,76	32,2
4	18.07.2009 07:39:20	976	$2,40 \cdot 10^{-2}$	40,4	12	42,71	4,02	14,6
5	25.05.2014 03:54:14	959	$2,78 \cdot 10^{-2}$	36,8	14	61,56	1,49	22,6
6	18.12.2014 20:21:28	937	$2,33 \cdot 10^{-2}$	45,9	8	9,98	3,22	18,8
7	23.12.2021 00:39:00	863	$2,55 \cdot 10^{-2}$	38,1	14	68,75	1,42	19,0

За период с 1993 по 2024 год ни один из обнаруженных кластеров в LVD не имел частоты имитации менее $0,07 \text{ г}^{-1}$ на 90% уровне достоверности. Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии до 25 кпк в период наблюдения.

8.3. О происхождении сигналов, зарегистрированных 23.02.1987

Анализ данных нейтринных событий в детекторах, зарегистрировавших события во время вспышки SN1987A, до сих пор вызывает дискуссии. В то время работали четыре подземных детектора, способные регистрировать нейтрино от сверхновых, и две гравитационные антенны (GA). Это сцинтилляционные детекторы LSD (Mont Blanc Liquid Scintillation Detector [67]) и BUST (Baksan Underground Scintillation Telescope [68]), черенковские детекторы KND (Kamioka Neutron Decay Experiment [69]) и IMB (Irvine-Michigan Brookhaven [70]), гравитационные антенны в Риме (GEOGRAV, ниже RGA) [71] и Мэриленде (MGA) [72].

Детектор LSD зарегистрировал 5 импульсов в 2h52m37s UT 23.02.1987 почти на 5 часов раньше (в 7h35m UT) событий, зарегистрированных в детекторах BUST (5 импульсов), KND (11 импульсов) и IMB (8 импульсов). В 7h35m UT в LSD тоже было 2 импульса.

Событием в гравитационных антеннах RGA (и MGA) была энергия возбуждения (температура) антенны, измеряемая каждую секунду и выражаемая в кельвинах (K) [73]. При длительном поиске редких сигналов с неизвестной сигнатурой взаимодействий, образующих эти сигналы, стандартной процедурой является исследование временных совпадений (корреляций). В случае с SN1987A были найдены совпадения событий, зарегистрированных работавшими тогда четырьмя нейтринными детекторами и двумя гравитационными антеннами. При анализе событий антенны RGA в окрестности $\pm 30\text{с}$

сигнала LSD в 2h52m37s UT 23.02.1987 были обнаружены события, энергия которых заметно превышала среднюю энергию возбуждения антенны [74]. Наиболее детальный анализ корреляций, который охватил диапазон 0h00m – 8h00m UT 23.02.1987, был проведен авторами [75].

Твердотельные резонансные антенны RGA и MGA работали при комнатной температуре в лабораторных помещениях практически на уровне моря [71, 72]. Энергия возбуждения антенны, выражаемая в кельвинах (К), определялась в некотором временном интервале, для RGA интервал составлял 1с, для MGA 0,1с с последующим суммированием до 1 с. Таким образом, событие антенны отражает её энергетическое состояние в интервале 1 с. В событии присутствует практически постоянная шумовая (термодинамическая) компонента, находящаяся в равновесии с температурой помещения, и шумами электроники [76].

Для улучшения отношения сигнал/шум и повышения достоверности выделяемых событий-кандидатов в эксперименте RGA использовался программный фильтр Винера-Колмогорова, в MGA – аппаратный фильтр Баттерворта (Butterworth'a). Последовательности из 55 событий, полученных на RGA и MGA в диапазоне от 2h51m56s до 2h52m51s UT 23.02.1987 показаны на рисунке 8.4 (рисунок соответствует Fig.2 работы [77]). Последовательности характеризуются средней температурой $\langle T_R \rangle = 29$ К для RGA и $\langle T_M \rangle \approx 30$ К для MGA.

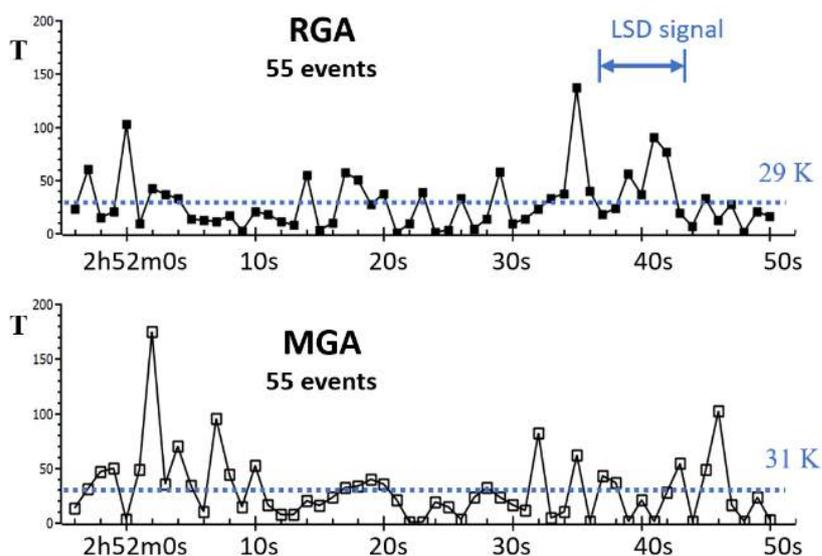


Рисунок 8.4 – События RGA и MGA в окрестности сигнала LSD в 2h52m UT 23.02.1987

Рассмотрим энергетические характеристики событий RGA, дифференциальное и интегральное амплитудные распределения которых показаны на рисунке 8.5. Несмотря на вывод авторов статьи [78] об отсутствии влияния частиц атмосферных ливней на MGA (и, следовательно, на RGA), нельзя исключить возможность формирования распределения на рисунке 8.5 под действием потока атмосферных мюонов, так как в работе [78] исследовались совпадения между событиями GA и её однократными пересечениями атмосферными ливнями, в то время как каждое событие RGA (и MGA) создается суммарным энерговозбуждением GA в течение одной секунды.

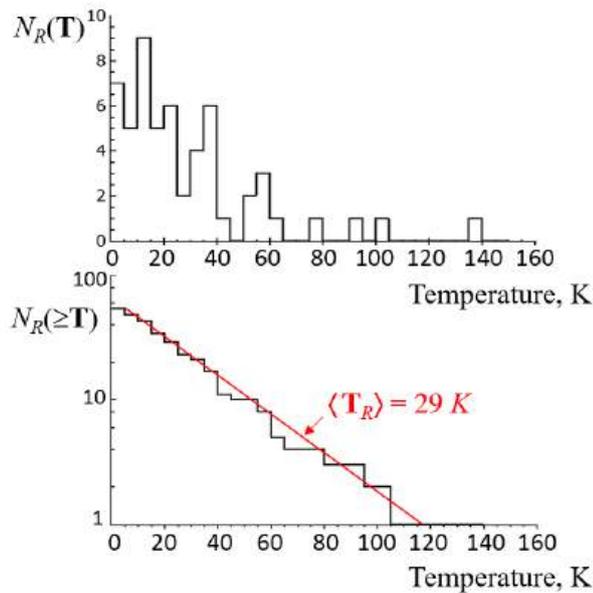


Рисунок 8.5 – Дифференциальное и интегральное энергетические распределения 55 событий RGA в окрестности сигнала LSD в 2h52m UT 23.02.1987

При горизонтальном расположении RGA её за секунду, в среднем, пересекали 290 мюонов:

$$\bar{N}_\mu = S I_\mu F = 1,8 \text{ м}^2 \cdot 130 \mu \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 1,24 = 290 \mu \cdot \text{с}^{-1}, \quad (8.1)$$

здесь S – горизонтальное сечение RGA, I_μ – полный поток мюонов на уровне моря ($\bar{E}_\mu \approx 4$ ГэВ), F – геометрический фактор, учитывающий форму RGA (цилиндр) и угловую зависимость интенсивности мюонов $I_\mu(\theta) \propto \cos^2\theta$.

В рамках гипотезы мюонного происхождения событий форма гистограммы на рисунке 8.6 определяется флуктуациями полного энергосодержания мюонов $\epsilon_\mu^{\text{tot}}$, пересекающих GA в течение секунды:

$$\epsilon_\mu^{\text{tot}} = N_\mu \epsilon \bar{l}_\mu, \quad (8.2)$$

где N_μ – число мюонов, пересекающих RGA за секунду; ε – удельные энергопотери (равные энергосвыделениям) мюонов $\text{МэВ} \cdot (\text{г}/\text{см}^2)^{-1}$; \bar{l}_μ – средняя длина пробегов мюонов, пересекающих GA в течение секунды.

В терминах разрешения Δ (ширина на полувысоте) функции распределения $N(\varepsilon_\mu^{\text{tot}})$ компонентами ежесекундных флуктуаций величины $\varepsilon_\mu^{\text{tot}}$ являются: а) флуктуации ΔN_μ ; б) флуктуации средней длины треков мюонов $\Delta \bar{l}_\mu$; в) флуктуации удельных энергопотерь $\Delta \varepsilon$. Следовательно, флуктуации величины $\varepsilon_\mu^{\text{tot}}$ можно представить выражением: $\Delta \varepsilon_\mu^{\text{tot}} = \sqrt{(\Delta N_\mu)^2 + (\Delta \bar{l}_\mu)^2 + (\Delta \varepsilon)^2}$. Флуктуации ΔN_μ при $\bar{N}_\mu = 290$ можно считать гауссовыми, поэтому $\Delta N_\mu = 2,35\sigma$, где $\sigma = 1/\sqrt{\bar{N}_\mu} = 0,059$, отсюда $\Delta N_\mu = 0,14$.

Пробеги мюонов l_μ распределены в широком, но фиксированном диапазоне 0 – 3,06 м. Средняя геометрическая длина треков \bar{l} в цилиндре определяется его размерами и угловым распределением мюонов. Для оценки можно принять $\bar{l} = 2RL/(R + L) = 0,55$ м ($R = 0,3$ м, $L = 3$ м). С учетом ограниченного диапазона длин l_μ при большом числе мюонов $\bar{N}_\mu = 290$ можно полагать, что флуктуации $\Delta \bar{l}_\mu$ не должны превышать флуктуаций ΔN_μ , то есть $\Delta \bar{l}_\mu \leq \Delta N_\mu$.

Доминирующий вклад в формирование спектра энергопотерь мюонов $N(\varepsilon_\mu^{\text{tot}})$ вносят флуктуации величины потерь ε (на уровне моря – главным образом ионизационных). Спектр ионизационных потерь мюонов со средней энергией 4 ГэВ имеет ассиметричный вид, но шире распределения потерь Ландау примерно в 2 раза. Его разрешение $\Delta \varepsilon = 0,52$ (рисунок 8.6 [79]) значительно превышает величину $\Delta N_\mu = 0,14$. В этом случае флуктуации $\Delta \varepsilon_\mu^{\text{tot}}$ оказываются связанными с произведением $\bar{l}_\mu \varepsilon$, в котором, в соответствии с ограничением $\Delta l_\mu \leq \Delta N_\mu$, длину \bar{l}_μ можно заменить на постоянную длину $\bar{l} = 55$ см. Полагая среднюю величину ионизационных потерь $\bar{\varepsilon} \sim 2$ МэВ $(\text{г}/\text{см}^2)^{-1}$, для RGA с плотностью $\rho_{\text{Al}} = 2,7$ г/см³ находим: $\bar{\varepsilon}_{1\mu} = \bar{l} \rho_{\text{Al}} \bar{\varepsilon} = 297$ МэВ (эта величина близка к оценке величины $\bar{\varepsilon}_{1\mu} = 324$ МэВ, полученной в работе [80]). Таким образом, относительными флуктуациями $\Delta \varepsilon_\mu^{\text{tot}}$ полного энергосвыделения мюонов $\varepsilon_\mu^{\text{tot}} \approx 86$ ГэВ можно считать флуктуации $\Delta \varepsilon_{1\mu}$ ионизационных потерь одиночных мюонов в слое алюминия 55 см, которые соответствуют флуктуациям потерь $\Delta \varepsilon$: $\Delta \varepsilon_\mu^{\text{tot}} \approx \Delta \bar{\varepsilon}_{1\mu} \approx \Delta \varepsilon$.

Связь событий RGA с энергосвыделениями мюонов в антенне можно показать, установив сходство распределений $N_R(\mathbf{T})$ и $N_\mu(\zeta)$ (рисунки 8.5, 8.6). Будем сравнивать

интегральные представления распределений с тем, чтобы минимизировать влияние низкой статистики на форму распределения $N_R(\mathbf{T})$. Как следует из рисунка 8.5, величины практически всех RGA-событий (53 из 55-ти) заключены в интервале от 0 до 100К, их распределение согласуется с экспонентой $\exp(-\mathbf{T}/\langle\mathbf{T}_R\rangle)$ при $\langle\mathbf{T}_R\rangle = (29 \pm 1)$ К. На интервале изменения $\Delta\mathbf{T} = 100$ К (от 0 до 100К) отношение $\Delta\mathbf{T}/\langle\mathbf{T}_R\rangle$ уменьшается в 3,3 раза.

Интегральное распределение $N_\mu(\geq\zeta)$ имеет следующие особенности (рисунок 8.6):

- а) экспоненциальный участок с показателем $\langle\zeta\rangle = 0,41$ в диапазоне $\Delta\zeta = 1,35$ от $\zeta = 0,85$ до $\zeta = 2,2$;
- б) в диапазоне $\Delta\zeta$ содержится основная часть ($\sim 96\%$) событий N_μ всего интервала $\zeta \geq 0,85$;
- в) величина отношения $\Delta\zeta/\langle\zeta\rangle$ в диапазоне $\Delta\zeta = 1,35$ падает в 3,3 раза.

Следовательно, диапазону $\Delta\zeta = 1,35$ соответствует диапазон температур $\Delta\mathbf{T} = 0 \div 100\text{К}$; тогда можно определить коэффициент $k = (\Delta\mathbf{T}/\Delta\zeta) = 74$, который связывает величины $\langle\zeta\rangle$ и $\langle\mathbf{T}_R\rangle$: $\langle\mathbf{T}_R\rangle = \langle\zeta\rangle \cdot k = 0,41 \times 74 = 30\text{К}$.

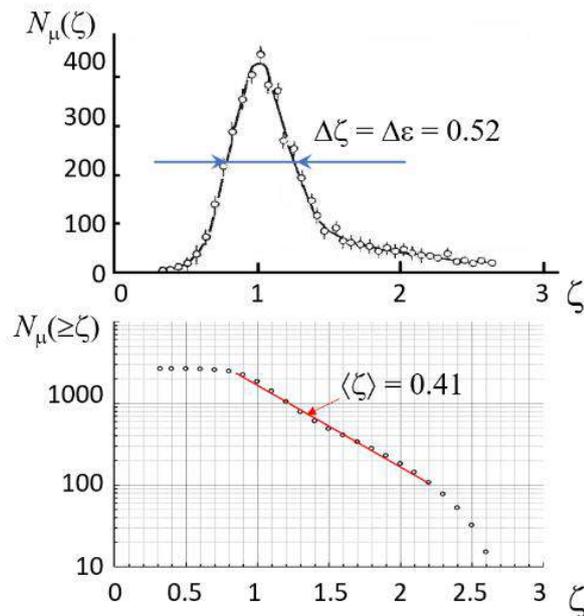


Рисунок 8.6 – Дифференциальный спектр ионизационных потерь мюонов $N_\mu(\zeta)$, измеренный на уровне моря, и его интегральный вид $N_\mu(\geq\zeta)$. Ось абсцисс ζ представляет отношение $\zeta = \varepsilon/\varepsilon_{\text{pr}}$, где ε_{pr} – вероятная потеря энергии; по оси ординат отложены относительные величины

Таким образом, распределение $N_R(\geq\mathbf{T})$ согласуется с высокоэнергетической частью распределения $N_\mu(\geq\zeta)$ в области $\zeta \geq 0,85$. Величина $\zeta = 0,85$ соответствует границе $\mathbf{T} = 0$ пропускания фильтра, отсекающего низкоэнергетическую компоненту сигналов антенны, включающую в себя, наряду с наименьшими энерговыделениями мюонов, тепловой шум

антенны и шумы электроники. Подавляющее число всех событий N_R на выходе фильтра связано с ионизационными потерями одиночных мюонов. Они, в основном, занимают область до $\zeta \sim 2,2$. События более высоких энергий связаны с электромагнитным сопровождением мюонов, роль которого при регистрации гравитационного сигнала с использованием RGA была проанализирована в работе [80], а также с частицами атмосферных ливней.

Для событий Мерилендской антенны (MGA) был выполнен такой же анализ, как и для RGA. Интегральное распределение $N_M(\geq T)$ событий MGA (рисунок 8.7) также описывается экспонентой с показателем $\langle T_M \rangle = (31 \pm 4) \text{ K} \approx 30 \text{ K}$ и, таким образом, согласуется как с распределением $N_R(\geq T)$, так и с $N_\mu(\geq \zeta)$.

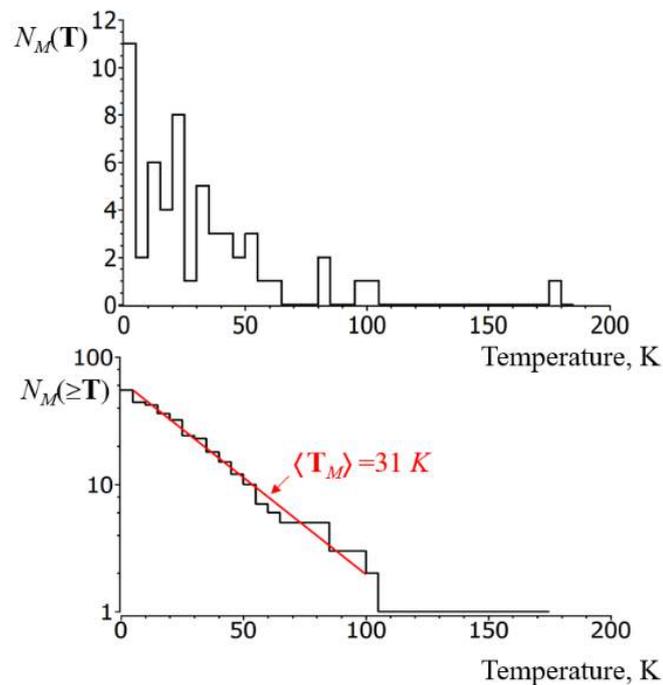


Рисунок 8.7 – Дифференциальное и интегральное энергетические распределения 55 событий MGA в окрестности сигнала LSD в 2h52m UT 23.02.1987

Равенство $\langle T_R \rangle = \langle T_M \rangle$ является следствием мюонного происхождения сигналов антенн. Это объясняется тем, что, во-первых, суммарное энерговыделение большого числа мюонов, пересекающих антенну за 1 с, пропорционально массе антенны независимо от ее размеров и ориентации в пространстве и, во-вторых, что теплоемкость антенны также пропорциональна ее массе. Следовательно, при равенстве характеристик потока мюонов (RGA и MGA находились практически на одинаковой высоте над уровнем моря 40 и 20 м,

соответственно, антенны, состоящие из одного и того же материала, должны иметь одинаковые температурные характеристики, связанные с энерговыделением мюонов.

Таким образом, соответствие распределения $N_R(\geq T)$ распределению ионизационных потерь мюонов в веществе RGA при идентичности законов распределений $N_M(\geq T)$ и $N_R(\geq T)$ говорит о мюонном происхождении всех событий RGA и MGA как в рассмотренном интервале 55 с, так и за время все время сигнала GA в окрестности 2h52m UT 23.02.87.

8.4. Непрерывный набор и обработка данных на БПСТ

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. За 2024 год программами диагностики неисправностей было выявлено 167 счетчиков с отклонениями от нормального режима работы. Из них 47 потребовали ремонта электронных плат, 1 – замены фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), 1 – смены оптической смазки без замены ФЭУ, 2 – очистки поверхности ФЭУ. Для всех 167 счетчиков была проведена настройка усиления ФЭУ и порога регистрации импульсного преобразователя. Проводился ремонт электроники системы регистрации БПСТ, в том числе ремонт кассет годоскопа импульсных каналов и ремонт кассет годоскопа амплитудных каналов.

По информации БПСТ за 2024 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, время набора информации составило 319 суток – 95,0 % от календарного времени за период с 01 января 2024 по 02 декабря 2024 года. Чистое время по данной задаче составило 312,9 суток.

Проведена обработка всей набранной в 2024 году информации, обработано 454466000 событий. Из этих событий отобраны 3588090 одиночных срабатываний счётчиков внутренних (детектор Д1 = 537715) и внешних (детектор Д2 = 3050370) плоскостей БПСТ. Критерии отбора позволяют определить нештатную работу установки и избежать создания ложного алерта о регистрации кластера большой множественности. Претендентов на кластер сигналов от нейтрино не обнаружено. Полученное за 2001 – 2024 годы экспериментальное распределение фоновых событий по множественности в скользящем временном окне, равном 20 секундам при сравнении с расчетом указывает на отсутствие претендентов на кластер сигналов от нейтрино. Чистое время набора за время работы детектора с 06.03.2001 составляет 21,17 года.

Для поиска возможной генетической связи последующих одиночных событий с предшествующим каскадом при обработке в обязательном порядке проверяется предыстория каждого одиночного события в Д1. Каскадом считается любое событие, в котором есть сработавший время-амплитудный логарифмический преобразователь (порог 500 МэВ) на внутренней горизонтальной плоскости установки. Проверка проводится для

интервала 2 секунды между каскадом (энерговыведение хотя бы в одном счётчике на плоскости 6,7,8 более 500 МэВ) и одиночным событием на 6, 7 или 8 плоскости.

В 2024 году зарегистрировано 403 кластера в детекторе D1 множественности $m_1 > 4$. После детальной проверки каждого кластера установлено, что ни одного кластера с множественностью $m_1 > 4$, который можно связать с каскадами, не зарегистрировано. Таким образом, в 2024 году одиночные события после каскадов не создали кластеры множественности $m \geq 5$, то есть ложный алерт для регистрации вспышки Сверхновой по этой причине исключен. Критерии отбора событий позволяют контролировать работу установки и избегать создания ложного алерта о регистрации кластера большой множественности. Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным 2024 года не было обнаружено.

За весь период наблюдения, с 30.07.1980 по 02.12.2024, чистое время набора составило 38,77 года. Из них 21,17 года набрано после 06.03.2001 года, после запуска системы сбора данных с управляющим триггером от любого сработавшего счетчика. Получено новое верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в галактике на 90% уровне достоверности: $f_{col} < 0,0594 \text{ год}^{-1}$ (5,9 события за 100 лет).

9. Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов по данным детекторов БПСТ (Баксан, Россия) и LVD (Италия, LNGS), связанных с событиями от астрофизических источников

9.1. Экспериментальные установки LVD, БПСТ

Детектор LVD (Large Volume Detector, $\langle N_{LVD} \rangle = 3300$ м в.э.) [63] является модульным детектором. Он расположен в лаборатории Гран Сассо в Италии в туннеле под горой Гран Сассо на глубине 3300 м в.э. Всего в состав детектора входят три одинаковые башни счётчиков (прямоугольный параллелепипед размерами $13 \times 6,6 \times 12$ м³), расположенные на расстоянии 2 м одна от другой. Основной элемент детектора – сцинтилляционный счётчик, который представляет собой прямоугольный параллелепипед размерами $1 \times 1 \times 1,5$ м³. Всего – 840 счётчиков.

Детектор БПСТ ($\langle N_{БПСТ} \rangle = 850$ м в.э.) [81] также является модульным детектором, его счётчики образуют четыре горизонтальных и четыре вертикальных плоскости. Расстояние между горизонтальными перекрытиями составляет 3,6 м. Габаритные размеры телескопа составляют $16,7 \times 16,7 \times 11,1$ м³. Счётчики в детекторе БПСТ имеют одинаковую конструкцию. Счётчик представляет собой прямоугольный параллелепипед размерами $0,7 \times 0,7 \times 0,3$ м³, изготовленный из алюминия толщиной 3 мм. В анализе будут использоваться 1200 счётчиков на внутренних плоскостях БПСТ, и 1030 отобранных счётчиков из 1980 на внешних плоскостях с относительно низким темпом счета.

Все два детектора используют идентичный сцинтиллятор C_nH_{2n} , $\langle n \rangle = 9,6$, разработанный в ИЯИ РАН.

Совместные исследования проводятся по трем направлениям:

- а) поиск совпадений одиночных нейтринных событий в детекторах БПСТ, LVD от вспышки сверхновых в рамках модели стандартного коллапса;
- б) поиск двойных совпадений импульсов в интервале 1 сек в детекторах БПСТ, LVD от вспышек сверхновых;
- в) поиск редких событий, коррелированных с известными астрофизическими источниками.

Для всех детекторов используется одинаковая методика отбора событий.

9.2. Поиск коррелированных сигналов

Установки LVD и БПСТ записывают последовательности зарегистрированных событий с энергией больше 5 МэВ и 10 МэВ, для LVD и БПСТ, соответственно. Эти

события (последовательность одиночных импульсов) идентифицируются как взаимодействия нейтрино или как импульсы от фона. Сгущения на временной оси одиночных событий мы называем кластером. Кластер представляет собой последовательность событий, зарегистрированных детектором подряд. Каждый кластер может быть описан двумя параметрами: длительностью и множественностью. Множественность это количество событий в кластере. Длительность кластера это время между первым и последним событием в кластере. Параметром для описания фона является скорость счёта фоновых событий. В ходе анализа данных исследовались все кластеры множественностью от 2 до 100 событий. Используя экспериментальные данные за какой-либо период, можно определить среднюю скорость счёта фоновых событий.

Появление фоновых событий является Пуассоновским процессом. Это означает, что время между соседними событиями распределено по экспоненциальному закону. Для подтверждения этой гипотезы методом Монте-Карло разыгрывалась временная последовательность, средняя скорость счёта появления событий в которой совпадала с экспериментально определённой скоростью счёта фоновых событий. Длительность набора статистики при моделировании совпадала с длительностью статистики в эксперименте. После обработки экспериментальных данных и результатов моделирования были построены распределения кластеров по длительности при их фиксированной множественности. При построении распределений использовался одинаковый алгоритм. В качестве примера на рисунке 9.1 представлены распределения до длительности кластера для кластеров множественностью 4, 30 и 100. Легко видеть, что экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования. Таким образом, для оценки времени образования кластера фоном можно получать временную последовательность любой длительности методом Монте-Карло.

Для определения частоты имитации фоном кластеров были получены данные методом Монте-Карло. Эмулировались наборы статистики детектором в течение 5 лет. Всего было 25 эмуляций. Минимальные значения кластера обновлялись каждый месяц набора статистики. Ожидаемое количество событий в кластере является произведением длительности кластера на скорость счёта фоновых событий. В результате для каждого значения множественности кластера (от 5 до 100) получена зависимость минимального ожидаемого количества событий в кластере от времени. Значения минимальной длительности кластера определялись на основании 25 значений, которые вычислялись после каждой эмуляции. На рисунке 9.2 представлен пример зависимости минимального ожидаемого количества событий в кластере от времени для кластера множественностью 25.

Как показано на рисунке 21, можно подобрать функцию, описывающую полученную зависимость. Такой функцией является функция вида $\lambda * T_{\min}(t) = A + B/\ln(t)$. Коэффициенты А и В зависят от множественности кластера.

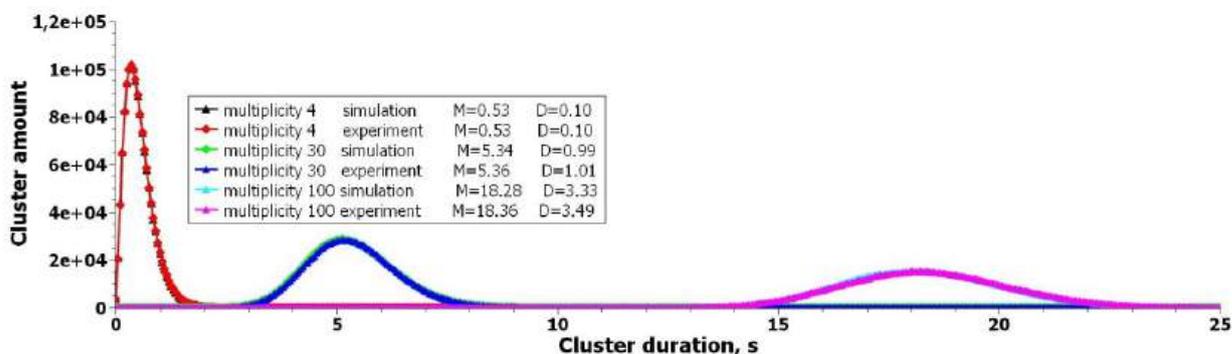


Рисунок 9.1 – Распределение кластеров по длительности

На рисунках 9.3 а,б представлены зависимости коэффициентов А и В от множественности кластера, соответственно. Фитирующими функциями для них являются полиномы пятой и первой степени, соответственно.

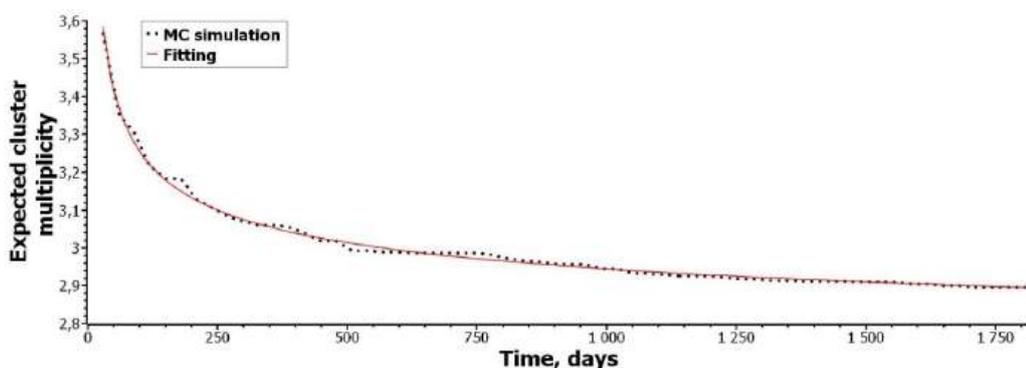


Рисунок 9.2 – Зависимость минимального ожидаемого количества событий в кластере от времени для кластера множественностью 25

Таким образом получен закон для вычисления среднего времени образования фоном кластера заданной множественности и скорости счёта фоновых событий. Благодаря переходу к безразмерной величине ожидаемого количества событий в кластере, полученный закон применим для любых временных последовательностей, подчиняющихся закону Пуассона. Для более точного определения параметров необходимо провести большее количество эмуляций за более длительное время. Тем не менее, показана возможность получения общей формулы для вычисления среднего времени образования кластера фоном при Пуассоновском процессе.

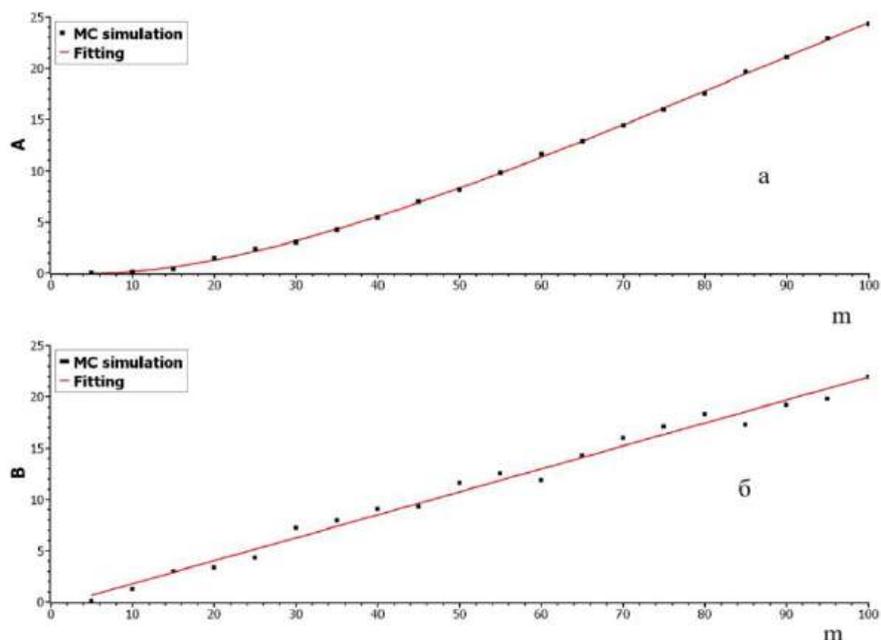


Рисунок 9.3 – Зависимость коэффициентов А и В от множественности кластера

Анализ экспериментальных данных с двух детекторов позволяет расширить требования к поиску источников нейтрино. При анализе данных с двух детекторов можно искать кластеры с более низким средним временем образования фона. При совпадении таких кластеров среднее время образования фоном совпадения намного больше, чем среднее время образования фоном каждого кластера. Для уточнения параметров кластеров (множественности и длительности) необходимо методом Монте-Карло получить две временные последовательности достаточной длительности. Эти временные последовательности являются эмуляциями регистрации фоновых событий детекторами LVD и БПСТ. На сегодняшний момент имеется общеизвестная формула расчёта средней скорости совпадений событий для двух временных последовательностей в заданном временном окне. При этом события являются «точечными», т.е. с нулевой длительностью. В нашем случае нужно оценить среднее время образования фоном совпадения двух кластеров событий. В отличие от «точечного» события, кластер имеет конечную длительность. Поэтому для определения закономерностей расчёта среднего времени образования фоном целесообразно воспользоваться методом Монте-Карло.

Детекторы LVD и БПСТ регистрируют нейтрино от различных источников. При регистрации нейтрино очень важно учитывать фон в детекторе. При совместном анализе данных с двух независимых детекторов появляется возможность выделения отдельных источников нейтрино. Действительно, каждый детектор регистрирует непрерывно фоновые события, которые можно интерпретировать, как взаимодействие нейтрино. Таким образом, можно получить временные последовательности скорости счёта фоновых событий. Далее

рассчитываются коэффициенты корреляции на отдельных участках экспериментальных данных. Если имеется корреляционная связь при увеличении или уменьшении скорости счёта одновременно в двух детекторах, то это может являться следствием изменения общего потока нейтрино. В настоящее время написана программа для расчёта текущего коэффициента корреляции на заданном интервале экспериментальных данных с двух детекторов. Обычно изменение скорости счёта фоновых событий в детекторе связывали с изменением условий проведения эксперимента. Например, с изменением порога регистрации событий в детекторе из-за возможных неполадок электроники. Однако если имеет место увеличение или уменьшение скорости счёта сразу в двух абсолютно не связанных между собой экспериментах, то это может быть вызвано только одновременными причинами. В этом случае вероятность некорректной одновременной работы детекторов значительно уменьшается.

К настоящему моменту выработан алгоритм оценки среднего времени образования фоном кластеров-кандидатов на обнаружение нейтринной вспышки от взрыва Сверхновой. Показана возможность мониторинга изменения потока нейтрино с помощью корреляционного подхода на основе экспериментальных данных с двух независимых детекторов. Для этого написана программа, которая вычисляет коэффициенты корреляции на любом отрезке экспериментальных данных в режиме скользящего окна. Ширина окна определяется из условий поиска, например из теоретических предсказаний конкретной модели.

10. Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ

В 2024 г. была опубликована статья [14], в которой представлены результаты эксперимента LHAASO по поиску источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Благодаря выдающимся параметрам основной установки LHAASO - Km2A, площадью более 1 кв. км, были открыты ПэВатроны в нашей Галактике, определены их координаты и измерены энергетические спектры излучаемых гамма-квантов. На рисунке 10.1, воспроизводимом из статьи [14], показаны обнаруженные в эксперименте LHAASO новые гамма-источники, их названия, положение в галактической плоскости и их статистическая значимость: вверху WCDA, в середине и внизу Km2A.

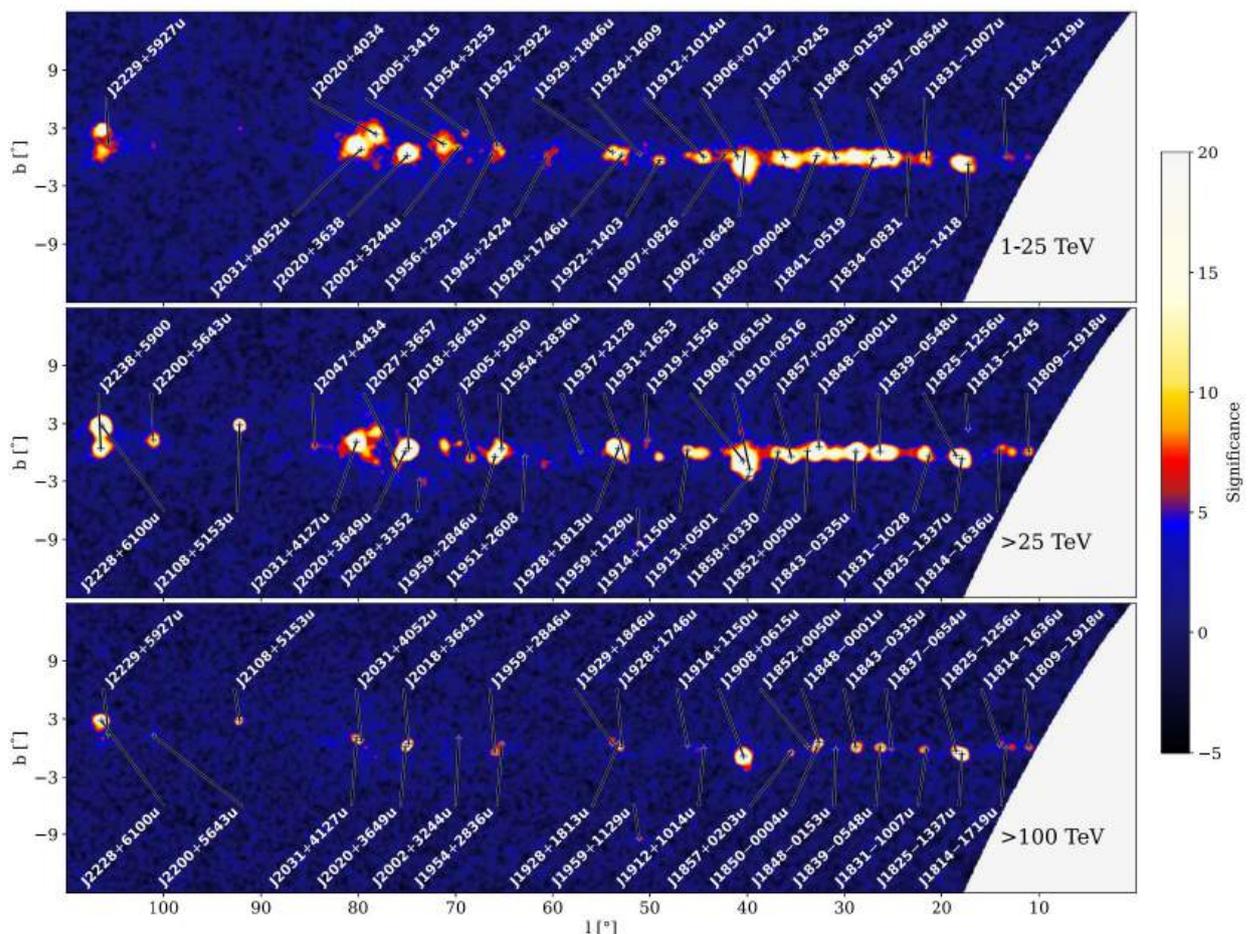


Рисунок 10.1 – Значимость открытых LHAASO гамма-источников в Галактике и их положение в галактической плоскости

Все 43 открытых LHAASO гамма-источников в области энергий более 100 ТэВ со значимостью выше 4 сигма получены за 508 дней наблюдений. Интересно, что при этом 7 из 43 открытых источников не известны по наблюдениям в ГэВной области энергий и не имеют в своей окрестности пульсаров или остатков сверхновых, либо других известных астрономам объектов.

Эксперимент TAIGA включает в себя две широкоугольные черенковские установки Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT, а также сцинтилляционные установки TAIGA-GRANDE и TAIGA-muon. На сцинтилляционных установках TAIGA-GRANDE и TAIGA-muon, создающихся для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней, выполняются исследования потоков гамма-квантов высоких энергий. Получены ограничения на диффузный поток гамма-квантов высоких энергий. Продолжены работы по расширению установок TAIGA-GRANDE и TAIGA-muon. Продолжены работы по разработке телескопа TAIGA-IACT с камерой изображения на основе кремниевых фотоумножителей.

11. Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO

В эксперименте LHAASO были также измерены параметры некоторых конкретных гамма-источников в статьях [15-20]. Так в статье [15] был исследован известный источник, Кассиопея А, представляющий собой молодой остаток сверхновой, которые, как предполагается, являются основным источником космических лучей. Показано, что сверхновые такого типа вряд ли могут рассматриваться в качестве основных источников космических лучей. Полученные ограничения показаны на рисунке 11.1, из которого видно, что только крутой спектр в источнике допустим. Так как спектр при распространении в галактике становится круче, то он войдет в противоречие с наблюдаемым в этой области энергий.

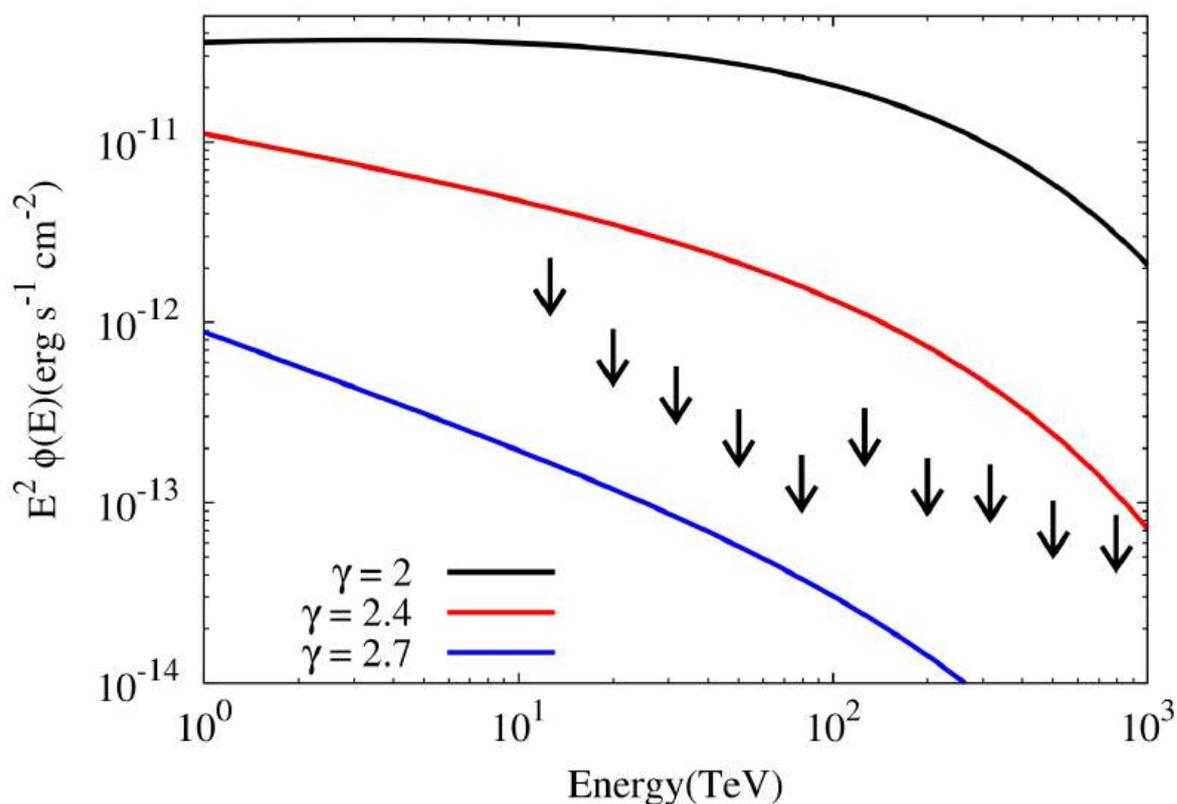


Рисунок 11.1 – Верхний предел на поток UHE гамма-квантов от источника Кассиопея А, поставленный установкой Km2A

В отчетном году были опубликованы две статьи в высокорейтинговых журналах: по измерению гамма-излучения двух радиогалактик NGC 4278 и M87. Показано также, что даже слабые радиогалактики типа NGC 4278 способны ускорять частицы производящие гамма-лучи ТэВных энергий. На рисунке 11.2 показан корреляционный график между

радиосигналом (5 ГГц) и потоком гамма в диапазоне 0,1-10 ТэВ из статьи [17]. Был также зарегистрирован всплеск потока от галактики M87 продолжительностью 8 дней и, кроме того, был измерен временной профиль этого всплеска в статье [19].

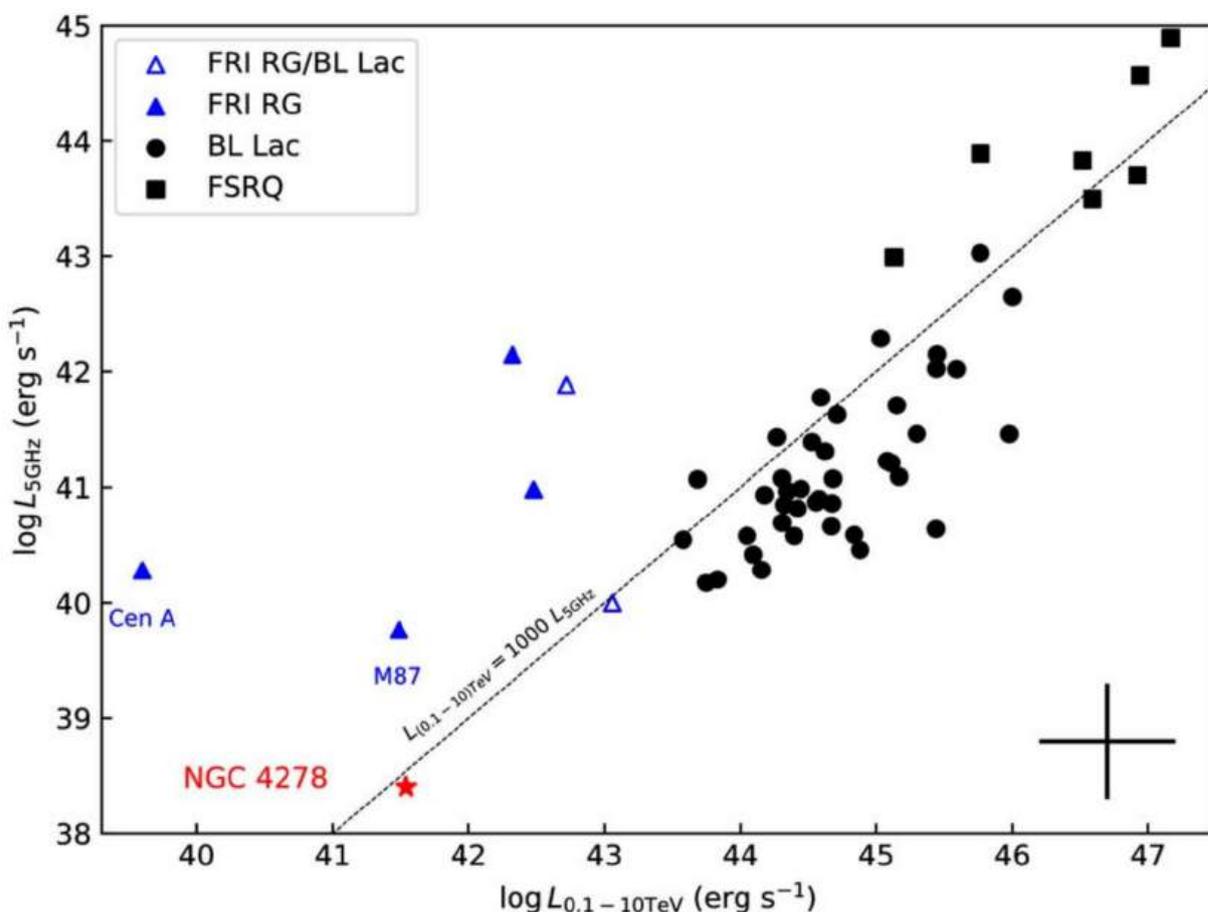


Рисунок 11.2 – Корреляционный график между радиосигналом (5 ГГц) от галактики NGC 4278 и потоком гамма в диапазоне 0,1-10 ТэВ

Планируется создание сети из 10-12 узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT. Первые три телескопа из этой сети построены и успешно работают. В течение 2024 года успешно велись исследования с помощью трех телескопов TAIGA-IACT как в монорежиме, так и в стереорежиме. С помощью этих телескопов ведутся исследования гамма-квантов высоких энергий от локальных источников как галактических, так и внегалактических. Телескоп TAIGA-IACT представляет собой составное зеркало площадью 10 м^2 , в фокусе которого установлена камера изображения из 560 пикселей. Каждый пиксель – это малогабаритный фотоумножитель XP1911В с конусом Винстона. Полный угол обзора (FoV) всей камеры составляет 9,6 градусов, а угол обзора каждого пикселя – 0,36 градуса. В 2024 году продолжены работу по подготовке ввода в строй четвертого телескопа TAIGA-IACT.

12. Модернизация экспериментальной установки по поиску Солнечных аксионов: изготовление вставок из чистого железа толщиной не более 50мкм плотно примыкающих к внутренней поверхности корпуса медного пропорционального счетчика (в природном изотопном составе железа имеется ~ 2,1% изотопа Fe-57). Гамма-кванты возникающие при поглощении аксионов ядрами Fe-57 в вставке частично поглощаются в рабочем газе счетчика. В этом случае на спектре фона счетчика должен быть пик при энергии 14.4 кэВ

В основу конструкции счетчика из нержавеющей стали положен большой медный пропорциональный счётчиков высокого давления (БМПС), разработанный в БНО ИЯИ РАН [7]. При разработке конструкции нового прибора учтены опыт эксплуатации БМПС, габариты существующей составной пассивной защиты из меди, свинца и борированного полиэтилена, и особенности газо-вакуумной системы для заполнения счетчиков рабочими газами.

Работа над новым счетчиком включает следующие этапы:

- 1) выбор материала корпуса счетчика и комплектующих элементов,
- 2) разработка конструкции прибора,
- 3) изготовление (или приобретение) деталей и компонентов,
- 4) сборка счетчика и проверка его герметичности,
- 5) подключение к газо-вакуумной системе и заполнение счетчика очищенным рабочим газом,
- 6) тестирование электрических и фоновых характеристик прибора.

12.1. Выбор материала корпуса счетчика и комплектующих элементов

В качестве материала корпуса счетчика предложено использовать нержавеющие стали аустенитного класса с низким содержанием углерода – X18H10T и AISI 304. Эти немагнитные коррозионностойкие стали с низким газовыделением при температурах эксплуатации ниже 725 К практически не подвержены межкристаллитной коррозии и способны длительное время сохранять вакуумную герметичность. Прочностные характеристики таких сталей допускают использование тонкостенного корпуса. Все крепежные элементы счетчика также изготавливаются из стали AISI 304. Содержание железа в указанных сталях лежит в интервале 66...70 % масс %.

Рабочие характеристики пропорционального счетчика во многом определяются параметрами анода – напряженность электрического поля вблизи анода зависит от его диаметра, а вторично-эмиссионные свойства задаются состоянием его поверхности. Опыт

эксплуатации БМПС показал, что оптимальным решением является анод из позолоченного вольфрама диаметром 10 мкм. С целью повышения чувствительности нового счетчика предложено использовать в качестве катода кольцевые вставки из чистого железа. Для этого использовали листовое АРМКО-железо (99,92 масс. % Fe) толщиной 0,5 мм.

Для изготовления высоковольтных токовводов, по аналогии с БМПС, применили керамические изоляторы с центральным проводящим стержнем от малогабаритных свечей зажигания, которыми комплектуются двухтактные двигатели малого объема. Такие изоляторы обладают высокой электрической прочностью, а механические свойства керамики позволяют присоединять токовводы вакуумно-плотно (через упругую прокладку) непосредственно к корпусу счетчика.

Диапазон давлений рабочего газа в новом счетчике планируется в интервале 0,08...0,3 МПа, что существенно, по сравнению с БМПС, снижает нагрузку на уплотняющие прокладки между деталями счетчика. Герметичное соединение крышек счетчика с торцевыми фланцами можно обеспечить фторопластом Ф4, а герметичность присоединения керамических изоляторов – упругими прокладками из термостойкого фторкаучука (Витона).

12.2. Разработка конструкции счетчика

Конструкция корпуса счетчика разрабатывалась с учетом изложенных выше требований. Размер в осевом направлении счетчика с патрубками и газовыми трубками ограничивался пассивной защитой и составил 950 мм, при этом длина рабочей области счетчика – 550 мм. Внутренний диаметр счетчика по сравнению с прототипом уменьшен до 58 мм с целью улучшения соотношения площади железной мишени и внутреннего объема прибора. В конструкции учтена необходимость использования внешних гамма-источников для калибровки прибора, поэтому толщина цилиндрической стенки счетчика составила 1 мм. Торцевые фланцы и крышки к ним должны соответствовать корпусу. Герметичность сборки обеспечивается конструкцией «зуб-канавка» с фторопластовой прокладкой.

Размеры и конфигурация патрубков задавались выбранными токовводами, при этом учитывались требования к состоянию поверхности под фторкаучуковые уплотняющие прокладки. Размеры и конструкция штуцеров согласовывались с действующей газовой линией.

Все детали счетчика, а также узлы в сборе, отражены в рабочих чертежах. В качестве примера на рисунке 12.1 показан чертеж крышки счетчика, а на рисунке 12.2 – тефлоновый вкладыш и узел снятия сигнала в сборе.

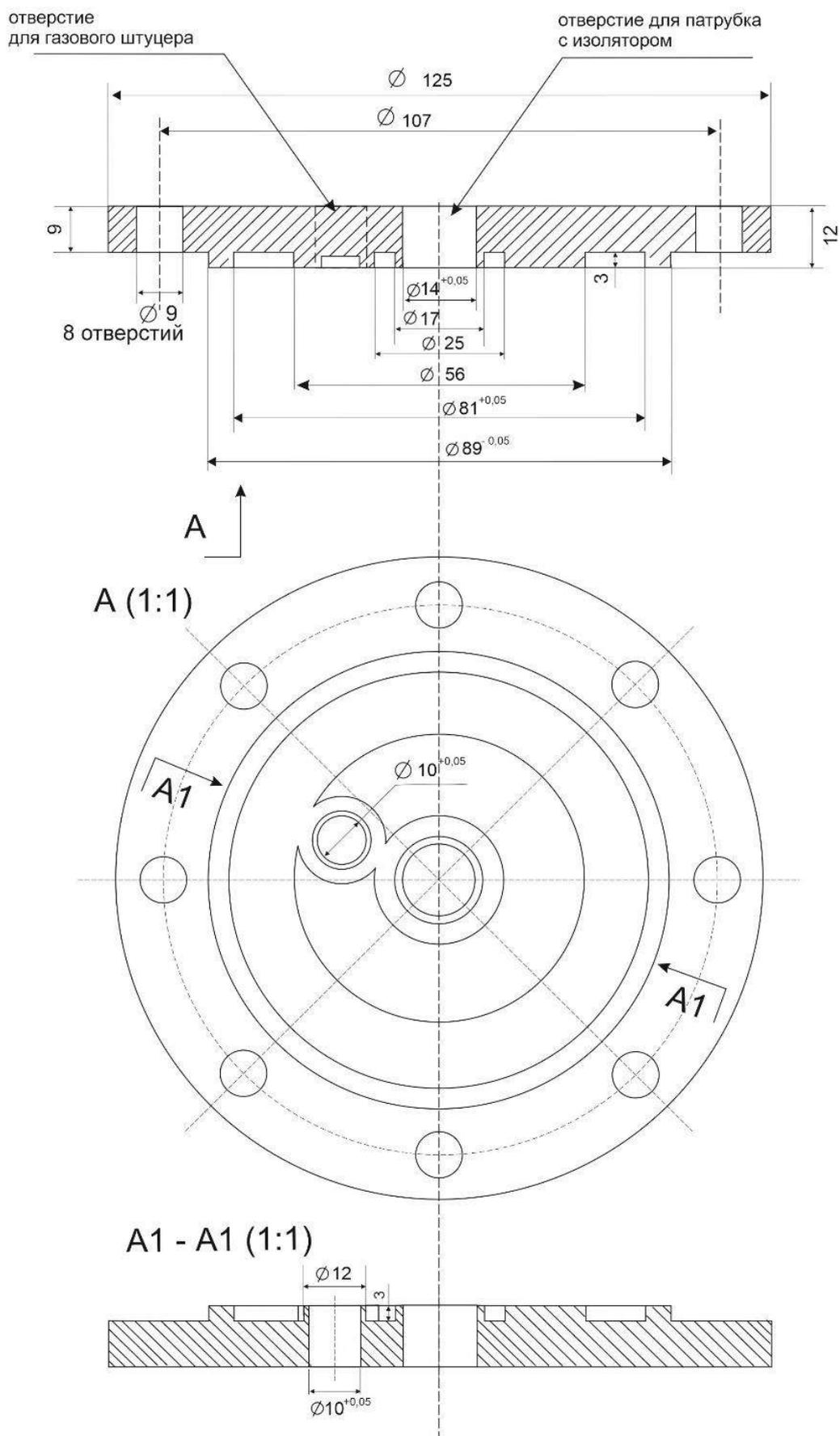


Рисунок 12.1 - Крышка счетчика в трех проекциях

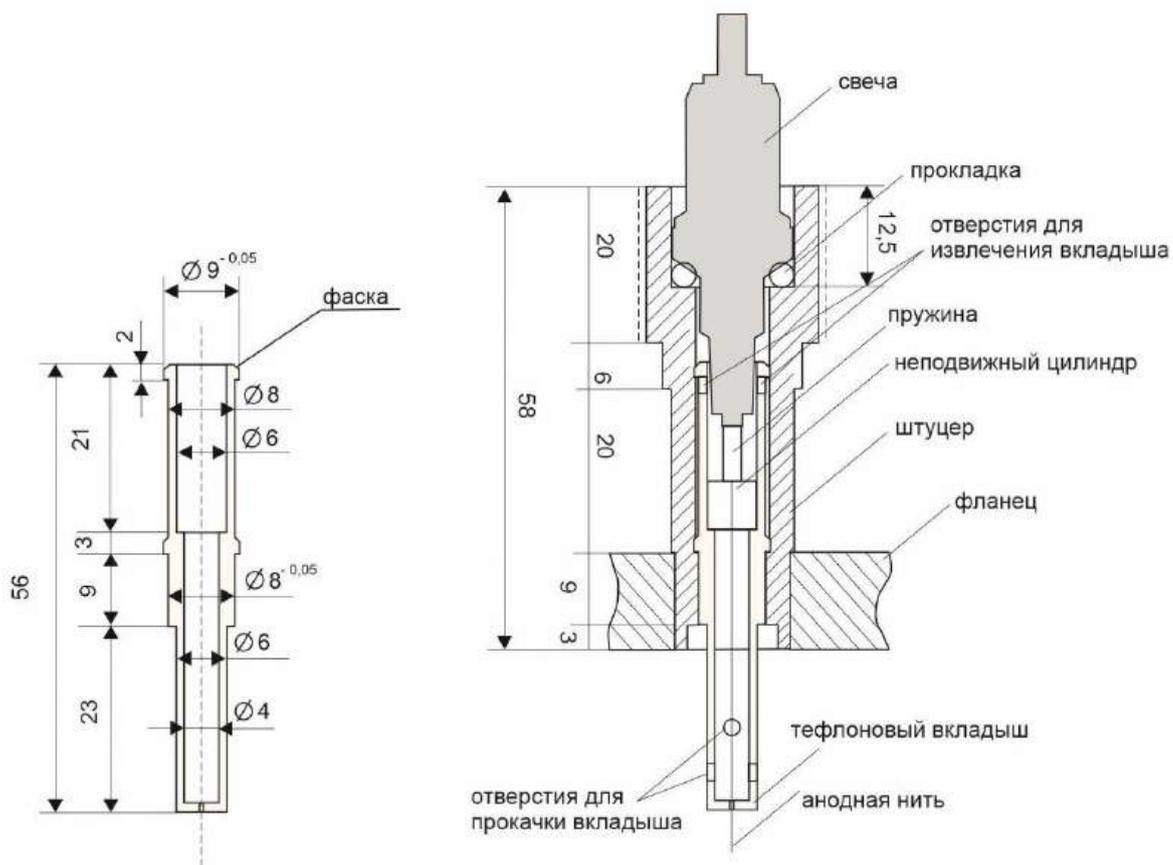


Рисунок 12.2 – Тefлоновый вкладыш (слева) и узел снятия сигнала в сборе (справа)

12.3. Изготовление деталей и приобретение компонентов счетчика

Токарные и фрезерные работы по изготовлению деталей счетчика, фторопластовых уплотнительных колец и вкладышей были выполнены на производственной базе БНО ИЯИ РАН. Вакуумно-плотное соединение патрубков с крышками и фланцев с корпусом счетчика осуществлялось аргонной сваркой без использования присадочной проволоки. Свечи зажигания для изготовления тоководов и фторкаучуковые прокладки к ним приобретались отдельно. На рисунках 12.3 и 12.4 приведены фотографии готовых узлов счетчика.



Рисунок 12.3 – Корпус счетчика с приваренными фланцами и снятыми крышками



Рисунок 12.4 – Крышка счетчика с приваренными патрубком токоввода и штуцером газовой линии

12.4. Сборка счетчика и проверка его герметичности

Счетчик в сборе подлежал проверке на герметичность. Контролировались как сварные швы, так и соединения с уплотняющими прокладками. Отдельно перед установкой

в счетчик проверялась герметичность соединения металлического проводника с керамическим корпусом обоих токовводов.

Для проверки герметичности счетчик присоединялся к вакуумному откачному посту, состоящему из пластинчато-роторного насоса, защитной цеолитовой ловушки, электромагнитных клапанов и вакуумметра. При длительной откачке предельный вакуум и скорость натекания свидетельствовали об отсутствии грубых течей. На рисунке 12.5 приведен фланец с установленной крышкой, на которой виден герметично присоединенный токоввод. На рисунке 12.6 показан счетчик в сборе в процессе откачки и проверки на герметичность.



Рисунок 12.5 – Фланец с установленной крышкой и герметично присоединенный токоввод



Рисунок 12.6 – Счетчик в сборе в процессе откачки и проверки на герметичность

12.5. Подключение счетчика к газо-вакуумной системе и тестирование его электрических и фоновых характеристик

В соответствии с планом научной работы заполнение счетчика рабочим газом и тестирование его электрических и фоновых характеристик проводится в декабре 2024 года.

13. Развертывание и эксплуатация установки Ковер-3

Для расширения наземной части установки Ковер-3 были собраны сцинтилляционные счетчики на основе пластического сцинтиллятора для размещения их в новых выносных пунктах регистрации (ВПП) установки. Каждый из сцинтилляционных счетчиков имеет форму усеченной пирамиды, в основании которой расположено четыре пластины пластического сцинтиллятора, размерами $50 \times 50 \times 5$ см³. Внутренняя часть счетчика покрыта светоотражающей эмалью для более эффективного сбора сцинтилляционных фотонов фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), расположенным в вершине пирамиды и закрытого защитным кожухом. Всего было собрано 27 новых сцинтилляционных счетчиков, каждый из них оборудован делителем напряжения ФЭУ, а также выполнена предварительная настройка коэффициентов усиления ФЭУ. Собранными счетчиками были полностью укомплектованы три новых выносных пункта регистрации (ВПП), по девять счетчиков в каждом. На данный момент общее количество новых ВПП установки Ковер-3, находящихся в рабочем состоянии, равно 37.

Выполнена точная координатная привязка детекторов установки Ковер-3 к местной системе координат МСК7 с точностью не хуже ± 1 см, что позволяет использовать относительные координат ВПП в программе реконструкции направления прихода ШАЛ. Актуальная схема установки Ковер-3 с точной координатной привязкой показана на рисунке 13.1.

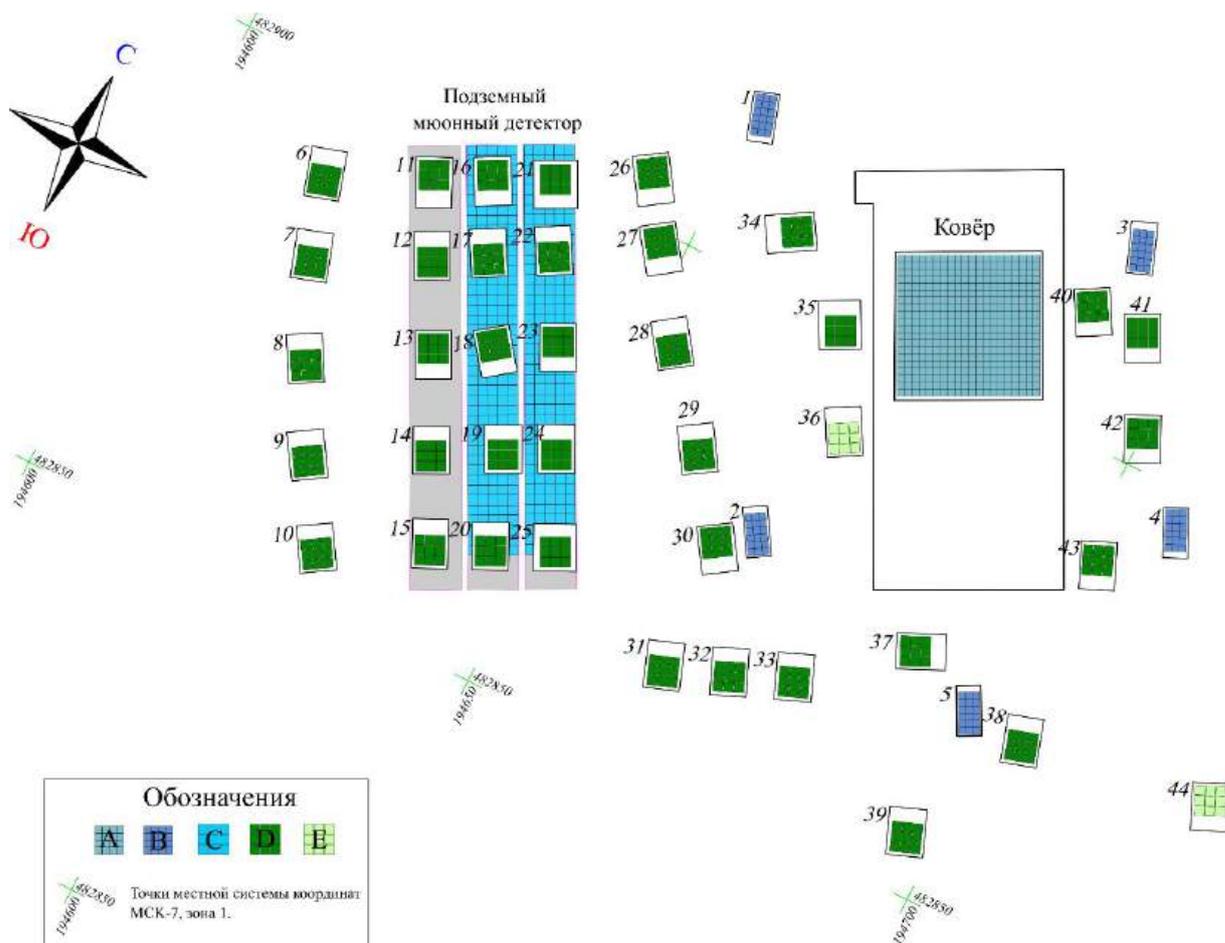


Рисунок 13.1 – Схема установки “Ковёр-3” с точной координатной привязкой выносных пунктов регистрации. Обозначения: А – центральная установка “Ковёр”; В – старые выносные пункты регистрации на основе жидкого сцинтиллятора; С – сцинтилляционные детекторы, входящие в состав подземного мюонного детектора, общей площадью 410 м²; D – полностью оснащенные выносные пункты регистрации; E – пункты регистрации, не оснащенные сцинтилляционными детекторами

14. Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий выше 200 ТэВ

В 2024 г. в статье 22 Приложения А был опубликован измеренный установкой Km2A методом ШАЛ энергетический спектр и массовый состав космических лучей. Этот результат показан на рисунке 14.1.

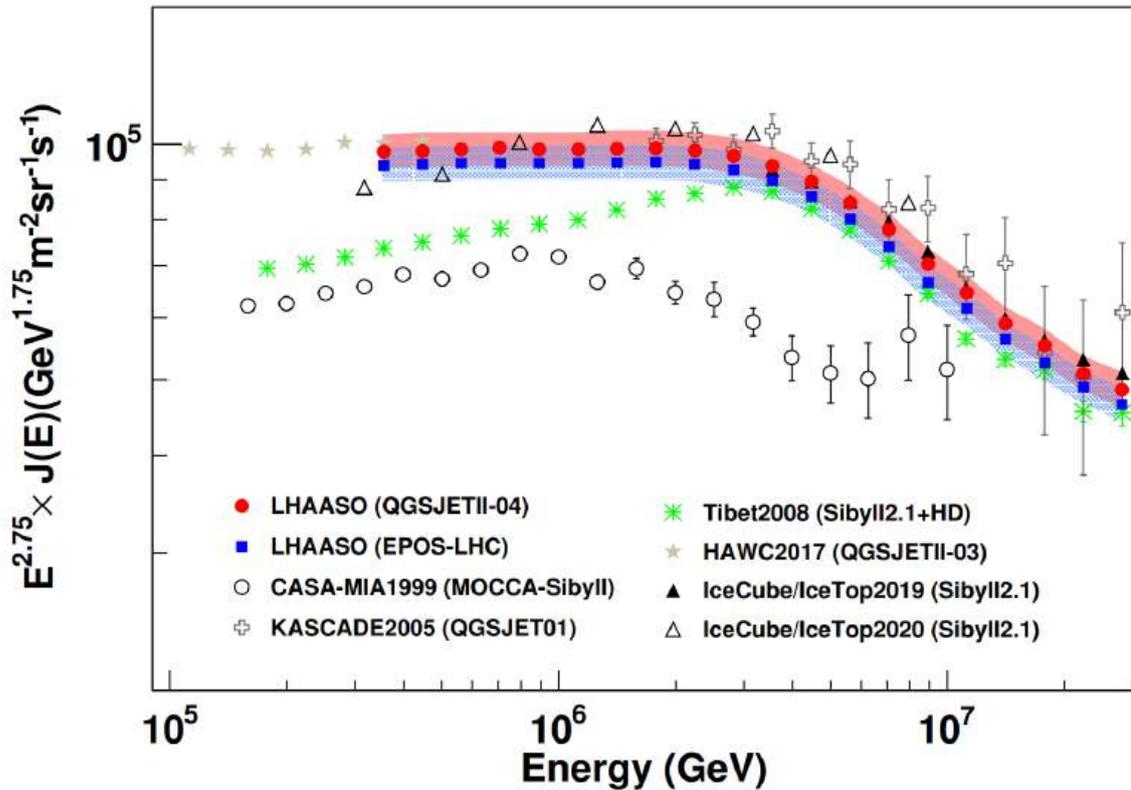


Рисунок 14.2 – Измеренный Km2A методом ШАЛ спектр космических лучей в сравнении с другими измерениями

Две работающие в штатном режиме установки ENDA-LHAASO (одна – прототип ENDA-INR в Москве, другая ENDA-64 в высокогорье) дают непрерывный поток научной информации, которая оперативно анализируется и сравнивается. Проводится сравнение данных, получаемых на установках при существенно различной высоте наблюдения.

В результате исследования протестирован в реальных условиях высокогорья, разработанный нами ранее новый метод регистрации широких атмосферных ливней с помощью эн-детекторов, регистрирующих адронную и электронную компоненты. В отчетном году началась штатная работа установки ENDA-64, что позволит нам в дальнейшем, впервые в мире, измерить спектр космических лучей из области 0,3-30 ПэВ по адронной компоненте ШАЛ. Предложена дальнейшая корректировка системы сбора и мониторинга данных.

Для сравнения измеренных и ожидаемых параметров установок проводится компьютерное Монте-Карло моделирование с помощью пакетов CORSIKA и GEANT всех разновидностей эксперимента с учетом геометрии установки, высоты наблюдения и т. д. Результаты опубликованы в статьях [23]-[25] Приложения А.

На установке Tunka-133 ведутся исследования первичного космического излучения в диапазоне энергий 10^{15} - 10^{18} эВ. Тогда, как детектор TAIGA-HiSCORE с энергетическим порогом ~ 40 ТэВ для гамма-квантов и ~ 80 ТэВ для протонов используется для изучения первичного космического излучения уже в диапазоне энергий $\sim 10^{14}$ – 10^{16} эВ. Продолжаются работы по дальнейшему расширению установки TAIGA-HiSCORE.

Результаты измерений массового состава и энергетического спектра космических лучей в диапазоне энергий $\sim 10^{14}$ – $\sim 10^{18}$ эВ, выполненных на установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE, хорошо согласуются с данными других экспериментов. Действительно, в области низких энергий результаты установки TAIGA-HiSCORE находятся в хорошем согласии с прямыми измерениями, проведенными на спутниках и баллонах, а при высоких энергиях данные установки Tunka-133 хорошо согласуются с результатами экспериментов, HAWC, ICE-TOPO, PAO(Pierre Auger Observatory) и TA (Telescope Array).

15. Разработка модели взаимодействий адронов FANSY 2.0, воспроизводящей сравнительно более широкий круг основных экспериментальных результатов в области энергий $10^{11} - 10^{18}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; и моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях

15.1. Необходимость разработки новых моделей

Основные эксперименты на БАК получают данные, в основном, по характеристикам центральной кинематической области взаимодействий адронов, которая играет второстепенную роль в развитии ШАЛ от частиц ПКИ, хотя и отвечает за генерацию мюонной компоненты. Только эксперимент LHCf даёт немного данных о характеристиках нейтральных частиц (n , K , γ) в области больших x_F , но узких интервалов по поперечному импульсу p_T . Экспериментальные данные по взаимодействиям мезонов, которые также играют существенную роль в развитии ШАЛ, ещё более скудные. Поэтому до настоящего времени существует несколько конкурирующих моделей адрон-ядерных взаимодействий, используемых для моделирования развития ШАЛ в атмосфере для наземных исследований при сверхвысоких энергиях, давая различные предсказания о наблюдаемых характеристиках ШАЛ. С другой стороны, эти модели воспроизводят генерацию только основных типов адронов, преимущественно, стабильных, тем самым упрощая себе задачу, но подавляя возможные корреляционные эффекты. В частности, только в SIBYLL моделируется рождение чармированных адронов. Рождение мезонных резонансов, дающих определённый вклад как в прямую генерацию мюонов, так и в корреляции частиц, учитывается в этих моделях довольно редко, хотя мюоны являются важной компонентой ШАЛ, используемой для оценки энергии протонов и ядер ПКИ.

Наконец, остаётся актуальной проблема разработки более детальных моделей генерации вторичных частиц в фрагментационной области при сверхвысоких энергиях, в частности, для изучения т.н. компланарности (ярко выраженной азимутальной асимметрии поперечных импульсов) наиболее энергичных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях при энергиях $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ, обнаруженной в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК).

15.2. Программный пакет FANSY 2.0

В связи с вышеизложенным продолжалась доводка и отладка программного пакета FANSY 2.0, предназначенного для моделирования взаимодействий адронов при E_0 от $\sim 10^{11}$

до $\sim 10^{20}$ эВ, как в рамках традиционных представлений (FANSY 2.0 QGSJ), так и с учетом компланарной генерации адронов (FANSY 2.0 CPG и 2D). В частности, была введена возможность розыгрыша этого процесса в рамках гипотезы о его связи с локальной эволюцией от 3D- к 2D-пространству.

В частности, для решения задачи №2 были уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов наиболее энергичных частиц для различных феноменологических моделей и введена возможность её розыгрыша в рамках гипотезы о связи компланарности с переходом от трехмерного к двумерному пространству.

Моделированию компланарной генерации частиц в фрагментационной области было уделено особое внимание. Были уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов p_t наиболее энергичных частиц. Была введена зависимость степени компланаризации p_t частиц от значения диапазона быстрот (рапидити) y , которая определяется выражением

$$\sigma_{\phi}^{CPG}(y) = \sigma_{\phi_0}^{CPG}(y)(|y_2/y|)^{\beta} \quad (15.1)$$

определяющим стандартное отклонение азимутального угла вектора поперечного импульса от плоскости компланарности в зависимости от быстроты частицы.

В рамках решения задачи были найдены эффективные значения нескольких основных параметров алгоритма для трёх различных версий модели с слабой, умеренной и сильной амплитудами получаемого «ridge» эффекта («weak», «moderate», «strong» [33], и, соответственно). Кроме того, получены соответствующие значения параметров для версии «2D», моделирующей процесс КГЧ в двухмерном пространстве [34]. Значения параметров приведены в таблице 15.1.

Таблица 15.1 – Эффективные значения параметров в «weak», «moderate», «strong» и «2D» версиях алгоритма компланаризации модели FANSY 2.0

Параметры	Версии FANSY 2.0			
	«weak»	«moderate»	«strong»	«2D»
Δ_y^{CPG}	3,7	4,5	5,0	6,0
$\sigma_{\phi_0}^{CPG}$	0,10	0,09	0,05	0,01
$\beta_{\phi_0}^{CPG}$	1,0	0,8	0,25	0,05
y_{thr}^{CPG}	3,7	2,9	2,5	2,0

В рамках решения задачи были получены соответствующие значения параметров для версии «2D», моделирующей процесс КГЧ в двухмерном пространстве [34].

16. Получение характеристик фрагментационной области генерации частиц во взаимодействиях адронов космических лучей в области энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ

16.1. Необходимость изучения фрагментационной области

Основную роль в развитии ШАЛ играют наиболее энергичные частицы каждого взаимодействия ($x_F \approx p/p_0 \gtrsim 0,01$). Но основные эксперименты на БАК (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) дают информацию, в основном, о характеристиках частиц в центральной кинематической области взаимодействий адронов ($\eta \lesssim 4$). Только эксперимент LHCf даёт информацию о характеристиках нейтральных частиц (n, K, γ) в области больших x_F . Экспериментальные данные по взаимодействиям π и K мезонов вообще получены при низких энергиях ($\sqrt{s} \lesssim 35$ ГэВ).

В стратосферных и высокогорных экспериментах с РЭЖ была найдена [28] – [31] тенденция к компланарности наиболее энергичных подстволов т.н. гамма-адронных (γ -h) семейств (групп коррелированных частиц наиболее высоких энергий, $E \gtrsim 10$ ТэВ, в стволах ШАЛ), интерпретированная как результат компланарной генерации частиц (КГЧ) именно во фрагментационной области во взаимодействиях частиц ПКИ с энергиями $E_0 \gtrsim 10$ ПэВ.

Идеи, предложенные для объяснения этого явления, разделяются на две принципиально разные группы: а) относительно традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий, связывающих эффект с образованием лидирующих систем [32], [35] – [37] или с угловым моментом кварк-глюонной струны [38], подразумевающие большие поперечные моменты в плоскости компланарности; б) гипотеза, постулирующая локальную $3D \leftrightarrow 2D$ эволюцию размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях [39].

Прямые исследования во фрагментационной области при сверхвысоких энергиях в настоящее время возможны только в космических лучах, а на коллайдерах этому мешают конструктивные особенности. Но можно попытаться изучать возможное влияние КГЧ на двухчастичные азимутальные корреляции характеристики частиц (т.н. long-range near-side «ridge» эффект), обнаруженный в эксперименте CMS для заряженных адронов при $|\eta| < 2,4$, $|\Delta\phi| \sim 0$ и $|\Delta\eta| < 4$ [33]. В рамках FANSY 2.0 этот «ridge» эффект является всего лишь побочным результатом компланарной генерации ЭВЧ [34].

16.2. Экспериментальные данные и 2D-эволюция сигнатуры пространства

Гипотезы [32], [35] – [37], объясняющие КГЧ во фрагментационной области в рамках ядерно-физических концепций, почти неизбежно связаны с большими значениями

поперечных импульсов (что противоречит данным LHC), тогда как феноменологически наиболее подходящим является предположение об локальной $3D \leftrightarrow 2D$ эволюции размерности пространства [12]. Предположим, что при энергиях взаимодействия адронов $\sqrt{s} \sim 7$ ТэВ какая-то причина вызывает подобную временную эволюцию. Время существования τ_{2D} и размеры этой локальной области, $L_{2D} \sim c \cdot \tau_{2D}$ (где c – скорость света), неизвестны. Частицы, родившиеся в 2D пространстве, разлетаются компланарно, какое-то время «помня» свою историю. Резонансы могут распадаться как в 2D-пространстве, если их время жизни $\tau \lesssim \tau_{2D}$, так и в 3D-пространстве, если $\tau > \tau_{2D}$. Моделирование [40] показывает, что экспериментальная и расчетная функции двухчастичных корреляций в области «ridge» эффекта близки друг к другу, если «компланаризация» имеет место при быстротах $y \gtrsim 3$. При $|y| \sim 3$ для ρ , ω , η и π^0 мезонов имеем $\tau \sim 10^{-22}$, 10^{-21} , 10^{-17} и 10^{-14} сек, соответственно, что задаёт порядок масштабов временных интервалов, где возможны изменения в поведении компланарности. Рисунок 16.1 показывает временные масштабы некоторых каналов распадов $\rho^{\pm,0}$, ω и η резонансов. Для получения более детальных результатов необходимы эксперименты по изучению характеристик генерации и распада энергичных адронов в широком кинематическом диапазоне при сверхвысоких энергиях (в идеальном случае, $3 \lesssim |y| \lesssim 10$, $x_F \gtrsim 0,01$ на LHC), для получения информации о каналах рождения, энергии и импульсах и угловых характеристиках резонансов; заряженных частиц; гамма-квантов, а также осуществления полного кинематического анализа каждого взаимодействия и восстановления кинематической истории распадов нестабильных частиц.

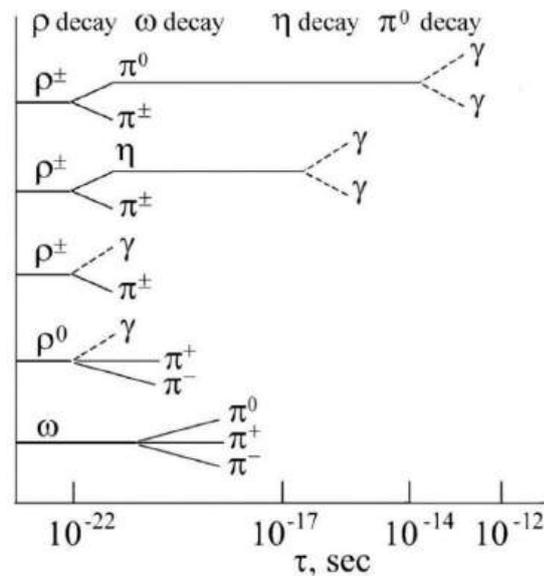


Рисунок 16.1 – Примерные временные масштабы некоторых каналов распадов первичных резонансов ($\rho^{\pm,0}$, ω) и последующих распадов вторичных частиц при $|y| \sim 3$

При различных значениях τ_{2D} высокую компланарность могут иметь продукты распада 1) ρ и ω резонансов (и других адронов прямой генерации) при $\tau_{2D} \gtrsim 10^{-22}$ с, к которым добавляются продукты распада 2) η мезонов при $\tau_{2D} \gtrsim 10^{-16}$ с, к которым добавляются γ -кванты от распада 3) π^0 мезонов при $\tau_{2D} \gtrsim 10^{-14}$ сек.

Отметим, что в рамках концепции изменения размерности пространства, как минимум, первый случай уже имеет место. На возможность третьего случая намекают характеристики стратосферного события «JF2af2» [35] (включающего только e^\pm и γ -кванты) с наблюдаемой энергией $\Sigma E_\gamma \gtrsim 1,4$ PeV и числом частиц $n_\gamma = 38$, имеющее экстремальную выстроенность треков вдоль прямой линии. Вероятность наблюдать подобное событие в результате флуктуаций крайне низка ($\lesssim 10^{-10}$). Была начата работа по анализу возможной связи процесса КГЧ с 2D-эволюцией сигнатуры метрики и получены результаты для различных частиц [40]. Было проведено моделирование двухчастичных корреляционных функций $R_{h^\pm h^\pm}(\Delta\eta, \Delta\phi)$, $R_{h^\pm \gamma}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ и $R_{\gamma\gamma}(\Delta\eta, \Delta\phi)$, полученные для пар $h^\pm h^\pm$, $h^\pm \gamma$, $\gamma\gamma$ соответственно при различных значениях τ_{2D} (от 0 до 10^{-12} сек).

На рисунке 16.2 представлена непосредственно область “ridge”-эффекта ($|\Delta\eta| \leq 4$, $-1 < \Delta\phi < 1$) функций $R_{h^\pm h^\pm}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ (a), $R_{h^\pm \gamma}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ (b) и $R_{\gamma\gamma}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ (c), полученных для пар $h^\pm h^\pm$, $h^\pm \gamma$, $\gamma\gamma$ соответственно при сечении процесса 2D-эволюции сигнатуры метрики $\sigma_{2D} = 11$ мб и ее времени существования $\tau_{2D} = 10^{-12}$ сек (после компланарной 2D-генерации адронов) и $\sigma_{2D} = 2,2$ мб. Был получен важный результат, а именно, что в рамках модели FANSY 2.0 2D-корреляции $\gamma\gamma$ -пар (рисунок 35b) заметно сильнее, чем корреляции заряженных частиц (рисунок 2a), при $\tau_{2D} \gtrsim 10^{-12}$ сек.

Для получения более детальных результатов необходимо проведение детальных экспериментов для исследования процессов генерации и распада энергичных адронов в широком кинематическом диапазоне при сверхвысоких энергиях (в идеальном случае, $3 \lesssim |\eta, y| \lesssim 10$, $x_F \gtrsim 0,01$ на LHC), для получения информации о каналах рождения, энергии и импульсах и угловых характеристиках резонансов, заряженных частиц, гамма-квантов, с целью проведения детального кинематического анализа всех частиц в каждом взаимодействии и восстановления истории распадов нестабильных частиц.

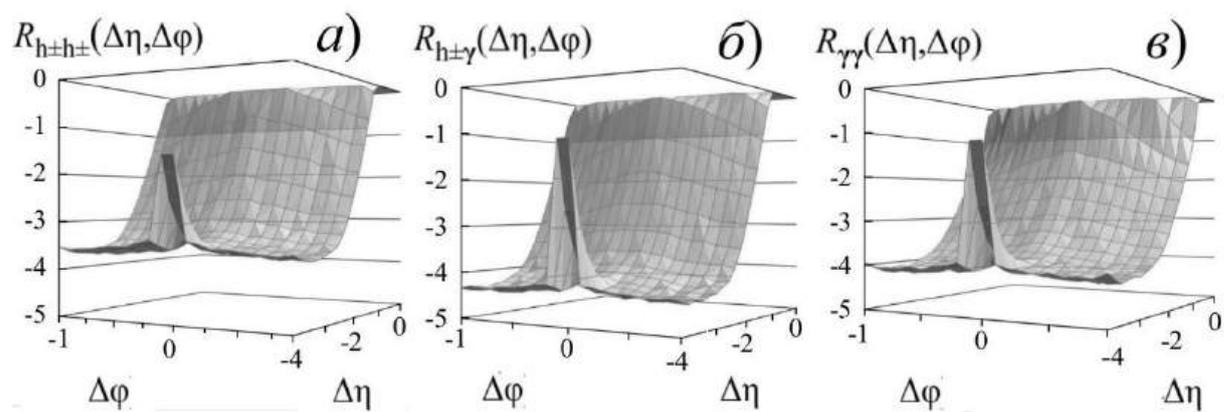


Рисунок 16.2 – Функции $R_{h^{\pm}h^{\pm}}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ (а), $R_{h^{\pm}\gamma}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ (б) и $R_{\gamma\gamma}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ (в), полученные для пар $h^{\pm}h^{\pm}$, $h^{\pm}\gamma$, $\gamma\gamma$ соответственно при $\tau_{2D} = 10^{-12}$ сек и $\sigma_{2D} = 2,2$ мб

17. Моделирование развития ШАЛ от взаимодействий частиц ПКИ различного типа на основе пакета CORSIKA

17.1. Моделирование характеристик ШАЛ от ядер ПКИ

Проведены расчеты развития широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных протонами и ядрами железа первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями 1, 10, 30 и 100 ПэВ с использованием стандартного пакета программ моделирования CORSIKA (модель QGSJETII-04) для высоты 3340 м н.у.м. применительно к эксперименту «Адрон-М», проводимому на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции.

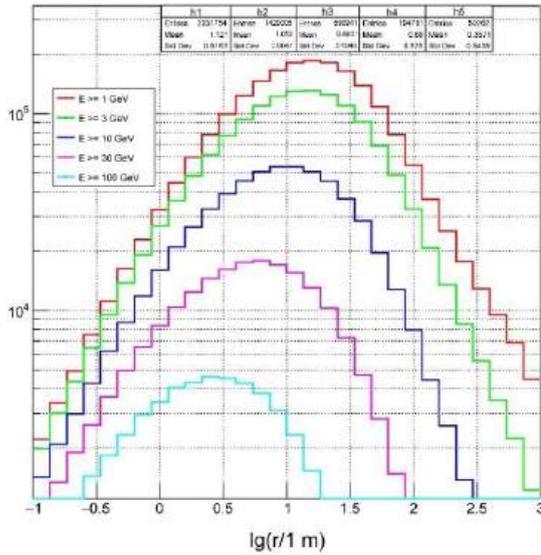
Моделировалось развитие вертикальных ШАЛ от границы атмосферы до уровня расположения установки «Адрон-55» (3340 м н.у.м.) от различных ядер с энергиями 1, 10, 30, 100 ПэВ. При моделировании использовались следующие энергетические пороги: 30 МэВ для электронов и гамма-квантов, 1 ГэВ для адронов и мюонов. Были получены пространственные и энергетические характеристики адронов, электронов, и мюонов при различных пороговых значениях E_{thr} .

На рисунке 17.1 для примера приведены расчеты функций пространственного распределения (ФПР) адронов (a) и мюонов (b) при различных пороговых значениях E_{thr} от 1 до 100 ГэВ в вертикальных ШАЛ от протонов с энергией $E_0 = 100$ ПэВ.

На рисунке 17.2 для примера приведены энергетические спектры адронов, электронов и мюонов в вертикальных ШАЛ, рожденных от первичных протонов с энергией $E_0 = 1$ ПэВ (a) и $E_0 = 100$ ПэВ (b).

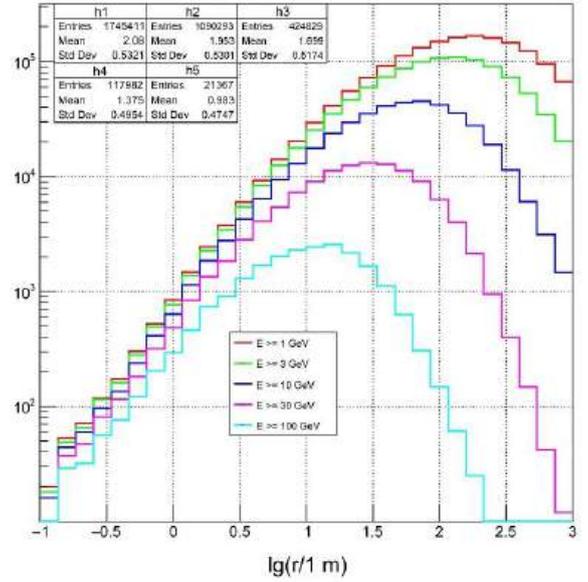
Получены также соответствующие данные по электронам и гамма-квантам.

3 x 100 PeV p EAS secondary hadron LDF at 3340 m a.s.l., different cut offs



a)

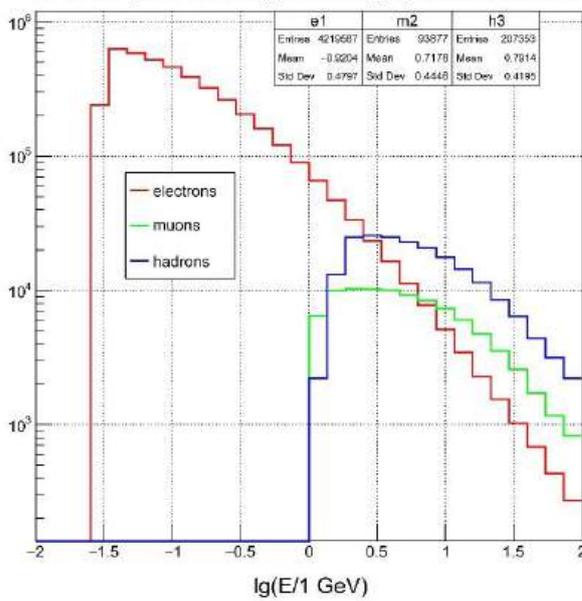
3 x 100 PeV p EAS secondary muon LDF at 3340 m a.s.l., different cut offs



b)

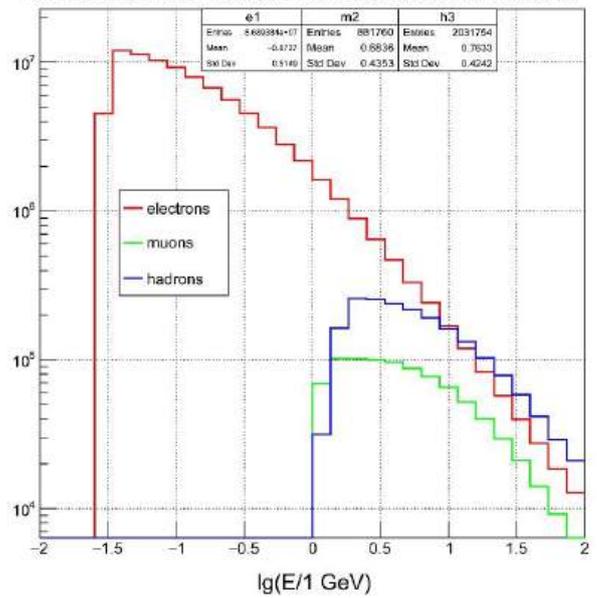
Рисунок 17.1 – ФПР адронов адронов (а) и мюонов (б) при различных пороговых значениях E_{thr} от 1 до 100 ГэВ в вертикальных ШАЛ от протонов с энергией $E_0 = 100$ ПэВ

20 x 1 PeV p EAS secondary particle energy spectra at 3340 m a.s.l.



a)

3 x 100 PeV p EAS secondary particle energy spectra at 3340 m a.s.l.



b)

Рисунок 17.2 – Энергетические спектры адронов, электронов и мюонов в вертикальных ШАЛ, рожденных от первичных протонов с энергией $E_0 = 1$ ПэВ (а) и $E_0 = 100$ ПэВ (б)

17.2. Моделирование характеристик ШАЛ от странглетов

Получены предварительные расчеты развития ШАЛ – ядерно-электромагнитных каскадов в атмосфере, инициированных частицами странной кварковой материи – странглетами, возможно входящими в состав ПКИ [82]. Основное отличие странглетов от традиционных ядер – гораздо больший вклад странных кварков и очень большая масса.

СКМ можно разделить на три состояния, отличающихся барионным числом A_s :

1) Блоковая СКМ: $A_s > 10^7$; 2) Стабильные частицы СКМ (странглеты): $10^2 < A_s < 10^7$; $n_u : n_d : n_s = 3 : 2 : 1$ (т.е. странглет – это, по сути, сверхтяжёлое квазиадро (естественно, со своей спецификой) с зарядом до $Z \sim +1000$); 3) Нестабильные частицы СКМ: $A_s < 10^2$.

В связи с большим числом теоретических неопределённостей, моделирование разумно начать с умеренной модели странглетов ($10^2 < A_s < 10^7$). Для начала было принято, что $A_s = 2000$. Тогда в первом приближении можно считать, что он содержит в себе 1000 протонов с нейтронами и 1000 Λ^0 -гиперонов. Для ядер (в т.ч.) сечение взаимодействия странглета в воздухе $\sigma_{s-air} \approx \sigma_{pp} (A_s^{2/3} + A_{air}^{2/3})$.

Принималось [41,83], что после входа в атмосферу пробег до первого взаимодействия странглета $\lambda_s^1 \approx 1$ г/см². При этом часть барионов взаимодействует и выбывает из состава странглета, как индивидуально, так и в составе обычных ядер. Тогда сечение взаимодействия остатка странглета при каждом следующем k+1-м взаимодействии будет определяться барионным числом A_s^k . Очевидно, для каждого k-го остатка странглета $\lambda_s^k > \dots > \lambda_s^2 > \lambda_s^1$ и т.д. При каждом взаимодействии образуются свободные обычные ядра с массой A_i , распределенные по массе следующим образом: чем тяжелее ядро, тем меньше вероятность его рождения. При расчете ШАЛ от странглета в каждом из его взаимодействий рождается одно или несколько ядер с массами 1 (протоны), 4 (He), 12 (C), 32 (S), 56 (Fe). Реально в каждом взаимодействии разыгрывается число откалывающихся нуклонов N_{nucl} по Пуассону со средним числом откалывающихся нуклонов $\langle N_{nucl} \rangle = 12$, которые далее формируют ядро или ядра из приведенного набора.

В ходе развития ШАЛ имеет место более сотни взаимодействий странглета до его полного рассыпания на отдельные ядра различных атомных весов, инициирующие независимые подстволы в составе центрального ствола ШАЛ. Судьба всех образовавшихся частиц и ядер далее прослеживалась с помощью стандартного пакета CORSIKA (QGSJETII-04) вплоть до уровня наблюдения с порогами 30 МэВ по электронам и гамма-квантам и 1 ГэВ по мюонам и адронам.

На рисунке 17.3 для примера приведены энергетические спектры адронов, электронов и мюонов в вертикальных ШАЛ от протонов, ядер Fe, странглетов (красная, зеленая, синяя линии, соответственно), представленные в дважды логарифмическом масштабе и простирающиеся от E_{thr} до 10^6 ГэВ. Можно видеть различия в характеристиках компонент ШАЛ от разных типов частиц ПКИ.

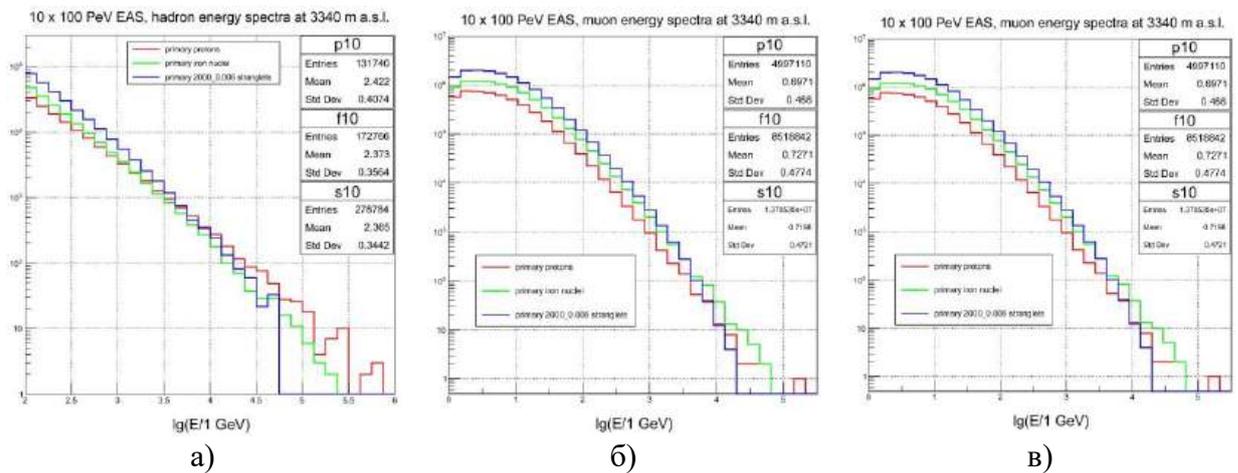


Рисунок 17.3 – Энергетические спектры частиц ШАЛ на уровне 3340 м н.у.м. от частиц ПКИ с $E_0 = 100$ ПэВ: а) адроны с энергией выше $E_{thr} = 100$ ГэВ, б) электроны с энергией выше $E_{thr} = 100$ МэВ, в) мюоны с энергией выше $E_{thr} = 1$ ГэВ

На рисунке 17.4а показаны энергетические спектры адронов в центральной области ШАЛ (< 10 м), инициированных протонами, ядрами железа и странглетами ПКИ с энергий $E_0 = 100$ ПэВ. Можно видеть сильную зависимость спектров от типа первичного ядра.

На рисунке 17.4б показаны зависимость средних энергий $\langle E_h \rangle$ адронов от расстояния до оси ливня в центральной области ШАЛ (< 10 м), инициированных протонами, ядрами железа и странглетами ПКИ с энергий $E_0 = 100$ ПэВ. Можно видеть сильную зависимость спектров от типа первичного ядра в области $R \lesssim 2$ м.

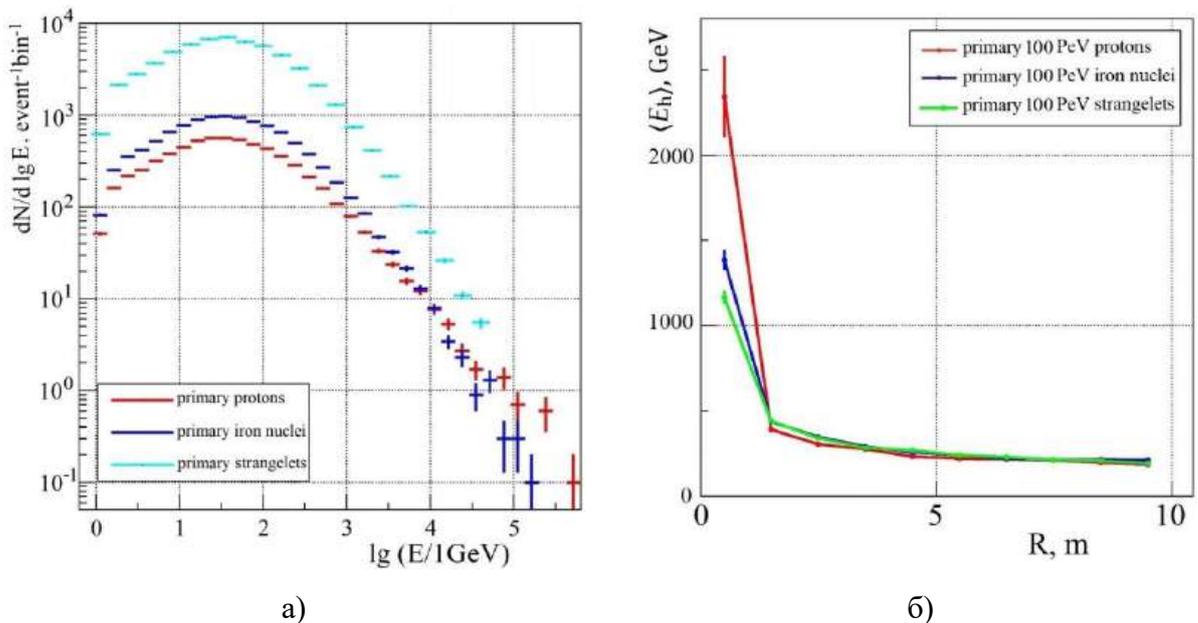
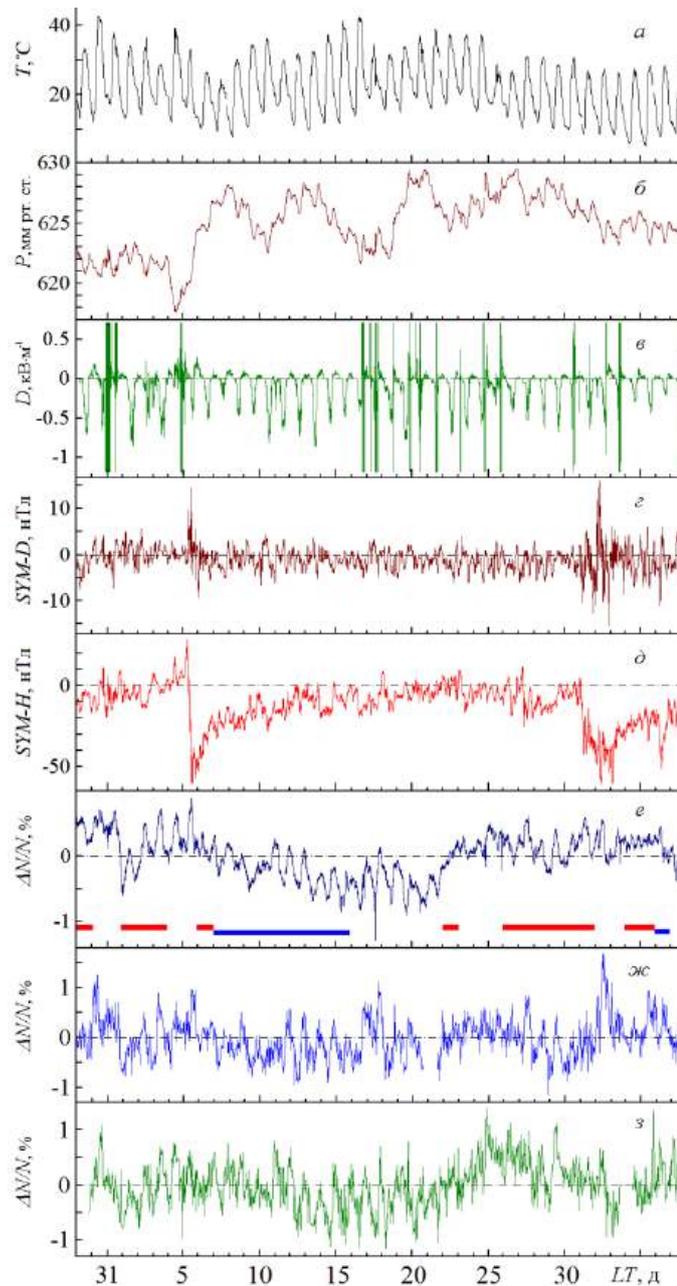


Рисунок 17.4 – а) Энергетические спектры адронов в центральной области ШАЛ (< 10 м), инициированных протонами, ядрами железа и странглетами ПКИ с $E_0 = 100$ ПэВ; б) зависимость средних энергий адронов $\langle E_h \rangle$ от расстояния до центральной оси ШАЛ в области (< 10 м), в ливнях от протонов, ядер железа и странглетов ПКИ с $E_0 = 100$ ПэВ

18. Разработка метода регистрации локальных возмущений температуры атмосферы над установкой Ковёр для оценки их вклада в вариации мюонов космических лучей и выделения событий, сопровождающих возмущения солнечного ветра или связанных с другими геофизическими процессами. Создание отдельных баз данных событий для периодов хорошей погоды и грозовой

18.1. Описание эксперимента и метода обработки данных

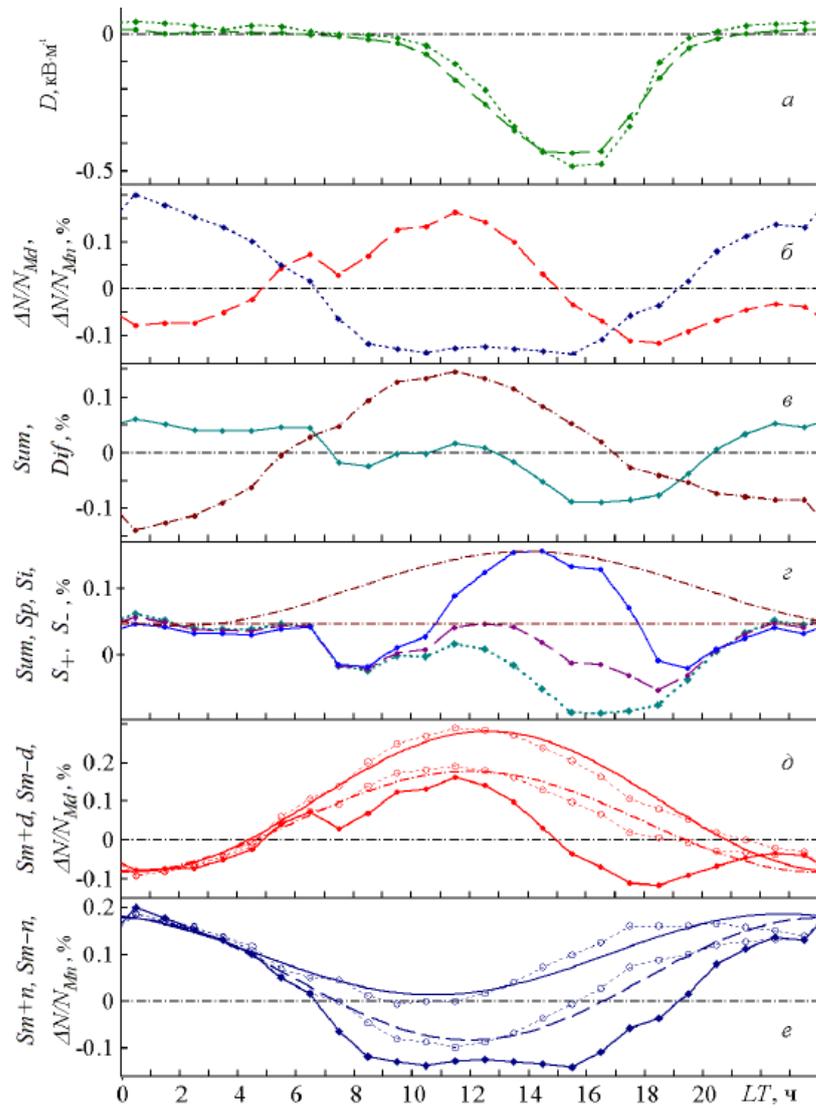
На рисунке 18.1а, 18.1б, 18.1в приведены графики температуры улицы, давления и приземной напряжённости, измеряемые на установке «Ковёр». Все они сохраняют форму СВ, согласно ориентации установки к Солнцу. На рисунке 18.1г и 18.1д приводятся графики поведения дипольной составляющей геомагнитного поля $SYM-D$ и $SYM-H$ [84], характеризующие межполушарный и кольцевой ток Земли, соответственно. Моменты ярких возмущений этих параметров, 05.08.2019 и 31.08.2019, отмечают начало развития магнитных бурь на Земле. На рисунке 18.1е – представлен график интенсивности мюонов, исправленной на вариации давления. Из графика видно, что её СВ, имеющая максимум днём в начале исследуемого периода, в ночь с 6 на 7 августа, испытала инверсию. Восстановилась обратно спустя 14 дней. Тот же самый эффект наблюдается для нейтронных мониторов из мировой сети [85]. Для примера, на рисунке 18.1ж показаны данные Aragats Neutron Monitor, Armenia (NANM), 40,37°N, 44,25°E, расположенного в том же часовом поясе что и установка «Ковёр», но ближе к экватору. Для демонстрации поведения суточной волны нейтронных мониторов в других часовых поясах, взяты данные Newark/Swarthmore, USA (NEWK), 39,68°N, 75,75°W. В силу большой разницы по долготе, график данных сдвинут по времени на $\Delta T = (75,75^\circ + 42,7^\circ) / (15^\circ \text{ ч}^{-1}) = 7,9 \text{ ч}$ так, чтобы шкала абсцисс на графике, соответствующая местному для установки «Ковёр» времени, в его случае, соответствовала местному времени NEWK (рисунок 18.1з). Сравнивая рисунки 18.1ж, 18.1з и 18.1е, можно убедиться, что положения максимумов наступают в одно и то же местное для каждой станции время на протяжении всего исследуемого периода. Следовательно, инверсия СВ мюонной интенсивности имеет космическое происхождение.



(а) Вариации приземной температуры (а). Давление (б). Напряжённость приземного поля (в). Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (направление на восток), индекс SYM-D [44] (г). Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (направление на север), индекс SYM-H [3] (д). Вариации интенсивности мюонов ($E > 100$ МэВ); прямоугольниками отмечены интервалы суток с хорошей погодой, составившие массивы статистической обработки: Md (максимум интенсивности мюонов днём – прямоугольники уровнем выше) и Mn (максимумы интенсивности мюонов ночью – прямоугольники уровнем ниже) (е). Вариации данных нейтронного монитора Aragsats Neutron Monitor, Armenia (NANM), $40,37^{\circ}\text{N}$, $44,25^{\circ}\text{E}$, жёсткость порога обрезания 7,1 ГВ [4] (ж). Вариации данных нейтронного монитора NEWK ($39,68^{\circ}\text{N}$, $75,75^{\circ}\text{W}$, порог обрезания 2,4 ГВ [84], относительно его собственного местного времени (з).

Рисунок 18.1 – Вариации различных геофизических параметров в период 29.07.2019–06.09.2019 г. Везде, если не оговорено специально, измерения местные, выполненные на установке «Ковёр» БНО ИЯИ РАН, по оси абсцисс - местное время

Для дальнейшей обработки данных отобран массив Ms из 23 суток хорошей погоды. Из них сформированы два массива: Md (13 суток, максимум КЛ днём) и Mn (10 суток, максимумом КЛ ночью). На рисунке 18.1*e* отмечены интервалы суток с хорошей погодой, составившие массивы статистической обработки: Md – прямоугольники уровнем выше, и Mn – прямоугольники уровнем ниже. Для каждого массива получены среднесуточные вариации. Далее, представлены процедура обработки и её результаты. На рисунке 18.2*a* приведены среднесуточные вариации напряжённости поля, определённые по массивам Md и Mn . Как видно, их форма неизменна. Ночью амплитуда $20 - 40 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, что в ущелье ожидаемо, днём появляется отрицательное поле с максимумом $-0,45 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ в 15,5 ч. Также, сохраняя форму, ведут себя вариации температуры (минимум в 5,5 ч, максимум в 13 ч) и давления (минимум в 14 ч, максимум в 21 ч). На рисунке 18.2*б*, приведены среднесуточные вариации интенсивности мюонов, поправленные на вариации давления. Вариации, определённые по Md – пунктирная линия с крупными часовыми точками ($\Delta N/N_{Md}$), по Mn – линия из мелких и крупных точек ($\Delta N/N_{Mn}$). Видна явная противофазность. На рисунке 2*в* представлена их полуразность и полусумма. Основная составляющая СВ КЛ, должна иметь косинусоидальный вид. Поэтому, даже в случае разных её амплитуд и фаз в Md и Mn , результат сложения (вычитания) волн, также должен быть представлен этой функцией. График полуразности представлен штихпунктиром с часовыми точками. В рамках предположения стабильности формы СВ Земного происхождения, она полностью определяется вариациями КЛ. Её аппроксимация: $Dif = D_0 \cdot \cos(2\pi(t-t_d)/T_d) \pm \sigma$, где $D_0 = 0,13$, $T_d = 24$ ч, $t_d = 12$ ч, $\sigma = 0,02$. Полусумма вариаций $\Delta N/N_{Md}$ и $\Delta N/N_{Mn}$, также представленная на рисунке 2*в*, является среднесуточной вариацией Sum по массиву Ms . Её график – сплошная линия с крупными часовыми точками. Эта вариация и является предметом исследования. В случае отсутствия влияния вариаций Земного происхождения она должна иметь косинусоидальный вид. На графике это не так, следовательно, не на все Земные вариации проведены поправки. В частности, поправка не проводилась на влияние электрического поля атмосферы, полагая, что ночью оно мало, а дневное возмущение, представленное полем приземного аэрозоля, имеет малую высоту. Но, возможно, оно является электрическим проявлением регулярных процессов колебания горных блоков [86]. В отличие от поля аэрозоля, такое поле может достигать больших высот, формируя разность потенциалов, способную влиять на интенсивность регистрируемых мюонов, трансформируя суточную волну (СВ).



Напряжённость приземного поля: пунктирная линия – вариация по Md , линия мелких и крупных точек – по Mm (а). Экспериментальная среднесуточная вариация интенсивности мюонов: по Md ($\Delta N/N_{Md}$) - пунктирная линия, по Mm ($\Delta N/N_{Mn}$) – линия мелких и крупных точек (б). Среднесуточная вариация мюонной интенсивности по массиву Ms (Sum) – сплошная линия с часовыми точками, полуразность вариаций мюонной интенсивности по Md и Mn в отдельности – штрихпунктирная линия с часовыми точками (в). Sum – линия мелких и крупных точек, коррекция Sum на влияние поля высотой 2 км (Sp) – пунктирная линия, соответствующая минимальная СВ КЛ (S_-) - прямая штрихпунктирная линия, коррекция Sum на влияние поля максимальной высоты (Si) – сплошная линия, максимальная СВ КЛ (S_+) – верхняя штрихпунктирная синусоида (г). Вариации, определённые для массива Md : $\Delta N/N_{Md}$ - сплошная линия с часовыми точками, минимальная СВ КЛ – штрихпунктир, максимальная СВ КЛ – сплошная линия, мелкими точками с кружками отмечена граница методической ошибки (д). Вариации, определённые для массива Mn : $\Delta N/N_{Md}$ - сплошная линия с часовыми точками, минимальная СВ КЛ – пунктир, максимальная СВ КЛ – сплошная линия, мелкими точками с кружками отмечена граница методической ошибки (е).

Рисунок 18.2 – Среднесуточные вариации периода 29.07.2019-06.09.2019 г., посчитанные по трём массивам Md (13 суток с дневным максимумом мюонной интенсивности), Mn (10 суток с максимумом ночью) и их сумме Ms .

Теперь, проведём коррекцию, допуская произвольную протяжённость поля по вертикали. В качестве этого характерного размера можно принять протяжённость от уровня установки ($840 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$) до верхнего уровня, соответствующего половине среднего значения вертикальной составляющей напряжённости реального поля в ущелье. Эту границу определим, требуя максимальную близость поправленной вариации Sum к косинусоидальному виду произвольной амплитуды и фазы. Задавая характерную протяжённость вертикального поля (Δh), учитывая сохранение тока в нём, приняв проводимость обратно пропорциональной плотности, получаем значение разности потенциалов от верхней характерной границы вертикальной составляющей поля до установки: $\Phi(h) = \Delta h \cdot k_D \cdot D \cdot (\beta / D_c) \cdot (\rho / \rho_0)$. Здесь $k_D = 5,3$ – коэффициент связи приземной напряжённости поля со средним значением в ущелье (см. таблицу 3 в работе [1]). $D_c = 216 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ – критическая напряжённость для убегания электронов в воздухе. $\beta = 1,67 \text{ МэВ} / (\text{г} \cdot \text{см}^{-2})$ – минимум скорости ионизационных потерь энергии релятивистских электронов в воздухе. $\rho_0 = 1,037 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ плотность воздуха при нормальных условиях. $\rho = 1,225 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ – плотность воздуха на высоте установки. Вариация под влиянием вертикального поля (ΔN_D), пренебрегая малым вкладом приземной части, сводится к формуле $\Delta N_D / N_0 = A_\Phi \cdot \Phi + B_\Phi \cdot \Phi^2$, где $A_\Phi = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ \%} / (\text{МВ})$, $B_\Phi = 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ \%} / (\text{МВ})^2$ (см. [42], таблица 2). Результат коррекции представлен на рисунке 2г. График, отмеченный линией из мелких и крупных точек, отвечает вариации Sum . Пунктиром с крупными часовыми точками (S_p) отмечен результат коррекции Sum на влияние поля протяжённостью $200 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, до высоты $3,75 \text{ км}$ над ур. м. Эта высота характерна для высоты окружающих горных вершин, удалённых на 5 км . Соответствующая разность потенциалов в максимуме амплитуды: $\Phi = -4,4 \text{ МВ}$. Сплошной линией с часовыми точками (S_i) представлен результат коррекции на максимальное влияние поля протяжённостью $600 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, до 11 км над ур. м., что примерно, отвечает среднему уровню генерации регистрируемых мюонов. Разность потенциалов в максимуме: $\Phi = -13,2 \text{ МВ}$. Прямая штрихпунктирная линия ($S_- = 0,047$) отвечает ночному уровню вариации Sum , характеризующему фон. Коррекция на влияние поля протяжённостью до вершин гор выводит S_p на фоновый уровень. Следовательно, эта протяжённость поля является минимальной, а S_- является нижней границей среднесуточной вариации КЛ по Ms . При этом, проявляются утро - вечерние отрицательные возмущения Земного происхождения: $S_{xp} = S_- - S_p$. Верхняя штрихпунктирная линия (S_+) – результат аппроксимации косинусоидальной функцией линии, проходящей через две ночные часовые точки ($0,5 - 2,5 \text{ ч}$) вариации Sum и две дневных ($12,5 - 14,5 \text{ ч}$) вариации Si . $S_+ = 0,056 \cdot \cos(2\pi(t -$

$t_m)/T_d) + 0,1$, где $t_m = 14$ ч. S_+ является верхней границей среднесуточной вариации КЛ определяемой по M_s . Утро - вечерние возмущения: $S_{xi} = S_+ - S_i$. Имея аппроксимацию полуразности Dif и границы полусуммы, S_+ и S_- , получим границы суточных вариаций КЛ для массивов Md и Mn : $S_{m+d} = Dif + S_+$, $S_{m-d} = Dif + S_-$, $S_{m+n} = S_+ - Dif$, $S_{m-n} = S_- - Dif$. На рисунке 2e и рисунке 2ж представлены измеренные суточные вариации $\Delta N/N_{Md}$ и $\Delta N/N_{Mn}$, определённые по массивам Md и Mn и предельные границы реальной суточной вариации КЛ в каждом из них.

18.2. Результаты и обсуждение

На установке «Ковёр», обнаружены ранее неизученные регулярные утро-вечерние отрицательные возмущения Земного происхождения интенсивности регистрируемых мюонов с энергией более 100 МэВ. Их амплитуда $\sim -0,1\%$ в районе 9 и 19 часов. В околополуденный период, с 12 по 15 часов, наблюдается снижение амплитуды до нуля. В процессе анализа материала замечено, что с увеличением «пробной» протяжённости поля, увеличивается и их симметрия. При предельной высоте (более 11 км), максимальные амплитуды сравниваются: $-0,127 \cdot (1 \pm 0,02)\%$, длительность на полувывоте амплитуды $4,06 \cdot (1 \pm 0,10)$ ч. Причиной утро - вечерних возмущений может быть появление над установкой горизонтального электрического поля, связанное с регулярно действующим сеймотектоническим процессом под установкой. В этом случае, понижение интенсивности мюонов может объясниться их нелинейной зависимостью функции выживания от энергии. Появление горизонтального поля можно проверить, измеряя теллурические токи. Работа в этом направлении планируется.

19. Проведение набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ по нейтринной задаче и контроля экспериментальных данных БПСТ. Время набора информации по нейтринной задаче составило 7777,9 часа, (324,1 суток, 97% от календарного времени), за период с 01.01.2024 по 28.11.2024. Чистое время набора, с учетом мёртвого времени установки, составило 7640,8 часа (318,4 суток).

Проведена обработка информации, полученной за период с 01.01.2024 по 28.11.2024 – всего зарегистрировано 462407960 событий. На глубине БПСТ фон мюонов полностью исключается при зенитных углах $\theta > 100^\circ$. Из общего потока информации было отобрано 2553 событий, соответствующих формальным критериям для поиска мюонов из нижней полусферы, заложенным в программы обработки. Затем эти события были рассмотрены более подробно. Проверяются энерговыделения и времена появления сигналов на плоскостях, длины траекторий мюонов в установке, осциллограммы. В 2024 году (до 28 ноября) на БПСТ зарегистрировано 41 событие, которые прошли по критериям для мюона из нижней полусферы. За весь период наблюдения с декабря 1978 года по 28.11.2024 чистое время наблюдения составило 333304,3 часов (38,0 года). Всего с декабря 1978 года на БПСТ зарегистрировано 1991 событие.

В 2024 году работала предварительная версия программы сверки данных БПСТ и оповещений с платформы The General Coordinates Network (GCN). Оповещения с портала GCN приходят от коллаборации LIGO-Virgo-KAGRA, с инструментов Fermi-GBM, Fermi-LAT, Swift-BAT, INTEGRAL, с установки IceCube. Данные о событиях с этих установок сохраняются в отдельный файл. В то же время онлайн программа поиска мюонов из нижней полусферы с периодичностью раз в 15 минут обрабатывает файл с данными БПСТ. В случае если обнаружен кандидат на нейтринное событие, информация об этом событии сохраняется во второй файл. При появлении нового события программа сверки данных проводит сравнение информации из оповещений GCN с событиями БПСТ. Если обнаружено пересечение событий по областям локализации во временном интервале ± 500 секунд, считается, что найдены кандидаты на совпадение. За период с 01.01.2024 по 28.11.2024 было обнаружено 4 события из оповещений портала GCN, которые пересеклись с событием на БПСТ во временном промежутке ± 500 секунд. 3 из этих 4 событий являются кандидатами на гравитационные волны от установок LIGO/Virgo и принадлежат к числу

событий с низкой значимостью. 1 событие является гамма-вспышкой, зарегистрированной инструментом Fermi-GBM. При этом пересечений по координатам не обнаружено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задачам 1 и 3 вошли в число важнейших достижений Института в 2024 году. По результатам исследований в 2024 году было выпущено 43 статьи в научных журналах.

1. Задача «Увеличение объема и развитие научно-технической инфраструктуры нейтринного телескопа Baikal- GVD».

Установлен и запущен в режим набора данных 13 кластеров телескопа, в результате чего рабочий объем Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD превысил $0,6 \text{ км}^3$ и остается крупнейшим из работающих телескопов в Северном полушарии.

Проведен плановый ремонт и регламентные работы по поддержанию работоспособности телескопа, завершены исследования, разработаны, скомплектованы, изготовлены и подготовлены все элементы и системы для установки следующих двух кластеров телескопа Baikal-GVD во время зимней экспедиции 2025 г.

2. Задача «Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD».

В результате физического и компьютерного моделирования установлены все параметры системы сбора данных запущенного в эксплуатацию в 2024 году телескопа Baikal-GVD из 13 кластеров.

3. Задача «Исследования диффузных потоков астрофизических нейтрино, поиск источников нейтрино высоких энергий, анализ данных в рамках многоканальной астрофизики и астрономии высоких энергий».

Сформированы два набора кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы с энергиями выше 70 ТэВ и 15 ТэВ. Значимость наблюдаемого превышения числа экспериментальных событий над ожидаемым фоном от атмосферных нейтрино и мюонов составила $2,73\sigma$ и 5.5σ соответственно.

4. Задача «Разработка научной программы и поиск технического решения для следующего после BEST эксперимента по измерению скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам».

В 2024 году получена оценка ожидаемых результатов и их статистических ошибок в эксперименте BEST2. Рассмотрены необходимые меры по обеспечению и созданию условий безопасности работы персонала с источником.

Разделение галлиевой мишени на 3 независимых зоны и использование монохроматического источника нейтрино ^{58}Co активностью 400 кКи делает эксперимент BEST2 чувствительным к гипотезе осцилляций в стерильные состояния в широком диапазоне параметров осцилляций. При попадании параметров осцилляций в области чувствительности эксперимента, значения обоих параметров – амплитуды $\sin^2 2\theta$ и частоты Δm^2 – будут определены в эксперименте. Также будет исследована зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино.

Эксперимент BEST2 предоставляет уникальную возможность для обнаружения и исследования явлений, связанных с «новой физикой».

В эксперименте с источником антинейтрино могут быть исследованы переходы антинейтрино в нейтрино с вероятностью порядка $\alpha^2 \sim 10^{-2}$.

Результаты, полученные в предлагаемых экспериментах, могут быть применены для поиска физических явлений за пределами Стандартной модели физики частиц, в том числе кандидатов на роль темной материи.

5. Задача «Создание прототипов Большого баксанского нейтринного телескопа (ББНТ) и проведение физических измерений на прототипах ББНТ».

В 2024 году с полутонным прототипом выполнены измерения эффекта гашения сцинтилляционного излучения и концентрации радиоактивного изотопа углерода ^{14}C в жидком сцинтилляторе. Из анализа измеренного спектра после учета фона от естественной радиоактивности получен верхний предел концентрации радиоактивного изотопа углерода ^{14}C , $\leq 7 \cdot 10^{-16}$. Из анализа спектра фоновых событий получено ограничение на содержание ^{238}U и ^{232}Th на уровне $< 10^{-15}$ г/г.

Полученные результаты измерений необходимы для дальнейших работ по созданию подземного сцинтилляционного детектор большого объема (ББНТ), направленного на регистрацию солнечных нейтрино CNO цикла, геонейтрино и решения других задач на стыке физики частиц, астрофизики и геофизики.

6. Задача «Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле».

Новый анализ данных детектора Борексино был опубликован в 2024 году. Анализ показал, что набор источников событий с $^{40}\text{K-geo-}\nu$ описывает экспериментальные данные, полученные детектором Борексино на заключительном этапе, значительно лучше набора источников без $^{40}\text{K-geo-}\nu$. Полученное значение скорости счёта калийных гео-антинейтрино $R(^{40}\text{K-geo-}\nu) = 11,0 \text{ cpd}/100\text{t}$ не может являться статистической флуктуацией, если в природе количество калия соответствует общепринятой сейчас модели Земли. Это полученное значение $R(^{40}\text{K-geo-}\nu) = 11,0 \text{ cpd}/100\text{t}$

соответствует количеству калия в Земле равному 3,2% от массы Земли при условии равномерного распределения калия в Земле. Также получены аргументы в пользу модели Солнца с малой металличностью.

Такое большое количество калия предсказано Гидридной моделью Земли, и объясняет наблюдаемую сейчас скорость нагрева мирового океана. Оставшаяся часть выделенного радиогенного тепла в теле Земли может быть поглощена расширением Земли (без увеличения её массы). Актуальным является организация наблюдения за изменением радиуса Земли. Ожидаемые величины увеличения радиуса Земли в период развитого потепления климата – один сантиметр за 30 лет. Это позволит предсказать окончание периода потепления на Земле.

7. Задача «Запуск оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10-19 Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций».

Получены новые данные долговременных наблюдений на оптоакустической гравитационной антенне (ОГРАН) за статистикой галактических релятивистских коллапсов на теоретически оправданном уровне чувствительности. Установлена новая верхняя граница для событий указанного типа на основе параллельного (двухканального нейтрино-гравитационного) мониторинга коллапсирующих объектов.

Получены новые данные по статистике ньютоновских высокочастотных вариаций гравитационного градиента в подземных туннелях БНО ИЯИ РАН. Эмпирическая оценка сравнительной эффективности “сайта” БНО по отношению к европейским конкурентам, предлагаемым для размещения гравитационных детекторов 3-го поколения. Эти же данные представят материал для уточнения и дополнения картины геодинамических процессов внутренней земли, порождающих высокочастотные компоненты ньютоновского гравитационного шума.

Получены новые экспериментальные данные по использованию прецизионных оптических измерителей (резонаторы ФП высокой резкости) в гравитационных экспериментах с пробными телами.

Полученные результаты предварительных экспериментов с моделью Гироскопа Саньяка подтверждают перспективность продолжения исследований, возможность даже на малой модели с периметром 20 см выйти на уровень чувствительности 10^{-3} угл. сек/с при стабилизации температуры, соответствующем магнитном экранировании и дополнительной алгоритмической коррекции остаточных колебаний температуры, что

соответствует $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/(с Гц^{1/2}), за время накопления один–четыре часа. При успешной долговременной стабилизации параметров установки, в частности в условиях подземного размещения в лаборатории БНО ИЯИ РАН, будет возможно и увеличение времени накопления данных, что позволит еще больше увеличить чувствительность.

8. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино».

В 2024 году велись исследования по поиску нейтрино от коллапсирующих звезд с помощью нейтринных детекторов. По данным детектора LVD установлено ограничение на частоту вспышек в Галактике: менее 1 события за 13,9 г. на 90% уровне достоверности.

Анализируя данные гравитационных антенн во время вспышки Сверхновой SN1987A, было объяснено происхождение сигналов в Римской и Мэрилендской антеннах. Было рассчитано полное энерговыделение и количество мюонов, которые должны были пересечь Римскую антенну за 1 секунду и проанализировали форму энергетических распределений. Исходя из анализа делается заключение, что события в гравитационных антеннах RGA, MGA вызваны мюонами от распадов пионов и каонов.

В течение 2024 года на БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации по задаче регистрации нейтринных всплесков, проводилась обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установке, и мониторинг вспышек сверхновых в нашей галактике. Получено новое верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в галактике на 90% уровне достоверности: $f_{col} < 0,0594$ год⁻¹ (5,9 события за 100 лет).

9. Задача «Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов по данным детекторов БПСТ (Баксан, Россия) и LVD (Италия, LNGS), связанных с событиями от астрофизических источников».

В 2024 году разрабатывались методики поиска редких сигналов в детекторах LVD, БПСТ и АСД, коррелированных с данными редких астрофизических событий. Выработан алгоритм оценки среднего времени образования фоном кластеров-кандидатов на обнаружение нейтринной вспышки от взрыва Сверхновой. Показана возможность мониторинга изменения потока нейтрино с помощью корреляционного подхода на основе экспериментальных данных с двух независимых детекторов. Написана программа, вычисляющая коэффициенты корреляции на любом отрезке экспериментальных данных в режиме скользящего окна.

10. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок TAIGA и LHAASO».

Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».

На установках LHAASO были получены значимые научные результаты, превосходящие мировой уровень. Этого удалось достичь благодаря уникальным параметрам установок эксперимента LHAASO, а именно, огромной площади, занимаемой детекторами, большой плотности (малым расстояниям между ними) и информативности детекторов, и их различных типов: ~5500 электронных детекторов, ~1200 мюонных детекторов, а также черенковских детекторов разного типа. Все это позволило достичь огромной светосилы установки для целей гамма-астрономии и уникально низкого углового разрешения, равного 0,05 градуса, что помогло, в свою очередь, получить выдающиеся научные результаты: открыть неизвестные ранее гамма-источники в нашей Галактике; измерить потоки и спектры излучения многих гамма-источников. Кроме того, проведены методические и расчетные работы по моделированию отклика детекторов и влияния на них метеопараметров.

Продолжены исследования диффузного потока гамма-квантов сверхвысоких энергий на сцинтилляционной установке TAIGA-GRANDE.

11. Задача «Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO».

На установках LHAASO были получены значимые научные результаты, превосходящие мировой уровень. Этого удалось достичь благодаря уникальным параметрам установок эксперимента LHAASO, а именно, огромной площади, занимаемой детекторами, большой плотности (малым расстояниям между ними) и информативности детекторов, и их различных типов: ~5500 электронных детекторов, ~1200 мюонных детекторов, а также черенковских детекторов разного типа. Все это позволило достичь огромной светосилы установки для целей гамма-астрономии и уникально низкого углового разрешения, равного 0,05 градуса, что помогло, в свою очередь, получить выдающиеся научные результаты: открыть неизвестные ранее гамма-источники в нашей Галактике; измерить потоки и спектры излучения многих гамма-источников. Кроме того, проведены методические и расчетные работы по моделированию отклика детекторов и влияния на них метеопараметров. Ведется набор научной информации в непрерывном режиме. Поступающая информация оперативно обрабатывается и анализируется. В результате, в отчетном году были опубликованы две статьи в высокорейтинговых журналах: по измерению гамма-излучения двух радиогалактик NGC 4278 и M87. Был зарегистрирован

всплеск потока от галактики M87 продолжительностью 8 дней и проведены измерения временного профиля этого всплеска. Показано также, что даже слабые радиогалактики типа NGC 4278 способны ускорять частицы производящие гамма-лучи ТэВных энергий.

Исследовались потоки гамма-квантов высоких энергий от галактических и внегалактических локальных источников с помощью узкоугольных атмосферных черенковских телескопах изображения TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA. Измерен поток гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой в Крабовидной туманности. Измерен энергетический спектр гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой в Крабовидной туманности в моно-моде и стерео-моде со статистической значимостью, превышающей 14 сигм, на основе 92 гамма-подобных событий. Получено ограничение на поток гамма-квантов высоких энергий от источника Fermi Cygnus Cocoon. Вводится в строй четвертый узкоугольный атмосферный черенковский телескоп изображения TAIGA-IACT в составе эксперимента TAIGA.

12. Задача «Модернизация экспериментальной установки по поиску Солнечных аксионов: изготовление вставок из чистого железа толщиной не более 50мкм плотно примыкающих к внутренней поверхности корпуса медного пропорционального счетчика (в природном изотопном составе железа имеется ~ 2,1% изотопа Fe-57). Гамма-кванты возникающие при поглощении аксионов ядрами Fe-57 в вставке частично поглощаются в рабочем газе счетчика. В этом случае на спектре фона счетчика должен быть пик при энергии 14.4. кэВ».

Разработана конструкция нового пропорционального счетчика из нержавеющей стали с катодом из АРМКО-железа. Счетчик предназначен для работы в составе низкофоновой экспериментальной установки для отработки методики поиска аксионов с энергией 14,4 кэВ, излучаемых в M1-переходах в ядрах Fe-57 в недрах Солнца. Счетчик изготовлен и тестируется с целью оптимизации рабочих характеристик. К счетчику прилагается комплект рабочих чертежей и рекомендации по выбору материалов и изготовлению прибора.

Планируется проведение с помощью нового счетчика поисковых измерений в течении года и достижение, за один год живого времени измерений, уровня чувствительности по константе связи аксионов с нуклонами на уровне $|g_{3AN-1,19} * g_{0AN}| \leq 2,2 * 10^{-6}$, что ниже существующего верхнего предела $|g_{3AN-1,19} * g_{0AN}| \leq 3,7 * 10^{-6}$ в эксперименте с мишенью из Fe-57 [5] для области масс аксионов больше 1 эВ.

Запланировано дальнейшее развитие конструкции счетчика с существенным повышением его чувствительности за счет нанесения на катод ультратонких слоев изотопа железа Fe-57.

13. Задача «Развертывание и эксплуатация установки Ковер-3».

Проведено расширение установки Ковер-3, за счет ввода в эксплуатацию трех новых выносных пунктов регистрации. Выполнена точная координатная привязка детекторов установки Ковер-3. В течение всего года выполнялся анализ и обработка экспериментальных данных, в том числе с целью диагностики оборудования и устранения неисправностей.

14. Задача «Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок TAIGA, LHAASO, и Telescope Array».

Установка ENDA-64 начала штатный набор информации с 02.01.24. Идет накопление научной информации и ее непрерывный анализ. Кроме того, проводится совместное компьютерное Монте-Карло моделирование установок ENDA-64 и Km2A, с помощью пакетов CORSIKA и GEANT всех разновидностей эксперимента с учетом геометрии установок, высоты наблюдения и т. д. В январе 2024 г. начался штатный набор информации на установке ENDA-64. Проводится оперативный анализ объединенной по нескольким установкам информации.

На установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE эксперимента TAIGA продолжены исследования энергетического спектра и массового состава космических лучей в области энергий 10^{14} - 10^{18} эВ. Продолжены работы по расширению установки мюонных детекторов TAIGA-Muon. Начаты работы по разработке водного черенковского мюонного детектора.

Были исследованы свойства космического луча с рекордной энергией, детектированного в эксперименте Telescope Array. Было получено наиболее строгое на сегодня ограничение на расстояние до ближайшего источника КЛУВЭ, также впервые было получено ограничение на концентрацию источников КЛУВЭ излучающих тяжелые частицы. Был разработан новый, основанный на машинном обучении, метод реконструкции спектров отдельных массовых компонент потока космических лучей высоких энергий по архивным данным эксперимента KASCADE. С помощью этого метода были реконструированы спектры отдельных массовых компонент. Со значимостью более 5 σ было обнаружено «колени» в спектре протонной компоненты.

15. Задача «Разработка модели взаимодействий адронов FANSY 2.0, воспроизводящей сравнительно более широкий круг основных экспериментальных результатов в области энергий $10^{11} - 10^{18}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; и моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях».

Получены значимые научные результаты. Усовершенствован программный пакет FANSY 2.0. Уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов наиболее энергичных частиц, в частности, для моделирования компланарной генерации частиц с различными временами существования локальной $3D \leftrightarrow 2D$ эволюции сигнатуры метрики пространства.

16. Задача «Исследование возможной связи между коллайдерным “ridge” эффектом и компланарной генерацией частиц в космических лучах на основе анализа экспериментальных и расчетных данных по азимутальным эффектам».

Получены значимые научные результаты. Впервые предложен способ проверки гипотезы о существовании локальной $3D \leftrightarrow 2D$ эволюции сигнатуры метрики пространства.

17. Задача «Моделирование развития ШАЛ от взаимодействий частиц ПКИ различного типа на основе пакета CORSIKA; включение в пакет CORSIKA модели FANSY 2.0, разработанной в ИЯИ РАН; разработка методов машинного обучения для анализа данных проекта «Памир-XXI», включающих оптимизацию чувствительности эксперимента, с целью, в частности, разделения шумовых и сигнальных срабатываний детекторов заряженных частиц, черенковского света, адронов высоких энергий в стволах ШАЛ, а также разделение событий, инициированных частицами ПКИ различного типа».

Получены значимые научные результаты. Впервые предложено исследование характеристик ШАЛ от гипотетических частиц странной кварковой материи (странглетов).

18. Задача «Разработка метода регистрации локальных возмущений температуры атмосферы над установкой Ковер для оценки их вклада в вариации мюонов космических лучей и выделения событий, сопровождающих возмущения солнечного ветра или связанных с другими геофизическими процессами. Создание отдельных баз данных событий для периодов хорошей погоды и грозовой».

В подотчётный период опубликована статья с подробным аналитическим описанием механизма формирования вариаций мюонов, регистрируемых установкой «Ковёр» под разными углами.

Разработан метод регистрации локальных возмущений температуры атмосферы над установкой Ковер для оценки их вклада в вариации мюонов космических лучей и выделения событий, сопровождающих возмущения солнечного ветра или связанных с другими геофизическими процессами. Обнаружены ранее незамеченные вариации земного происхождения. Амплитуда регулярного занижения дневной интенсивности регистрируемых с энергией более 100 МэВ одиночных мюонов $\sim -0,1\%$.

Развитый в работе метод верификации предлагаемых моделей диагностики состояния атмосферы по вариациям космических лучей, регистрируемых на уровне земли, возможно применять повсеместно.

Наиболее значимым результатом работы в текущем году является осознание факта не полной готовности измерительного комплекса «Ковёр» для достижения поставленной в проекте цели. Необходимо расширение экспериментальной базы в части измерений теллурических токов.

19. Задача «Проведение набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино».

План работ на 2024 год выполнен полностью. В течение 2024 года на БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации по задаче регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино из нижней полусферы. Проводились обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установке, и поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино по экспериментальным данным БПСТ. Работала предварительная версия программы сверки данных БПСТ и оповещений с платформы GCN.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Light Sterile Neutrinos: A White Paper [Электронный ресурс] / Abazajian K. N. [et al.] // arXiv:1204.5379 [hep-ph]. – 2012. – 269 p.
2. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2022. – vol. 128. – p. 232501.
3. A Search for electron-neutrino transitions to sterile states in the BEST experiment / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. C. – 2022. – vol. 105. – p. 065502.
4. Gallium Anomaly: Critical View from the Global Picture of ν_e and $\bar{\nu}_e$ Disappearance [Электронный ресурс] / Giunti C. [et al.] // arXiv:2209.00916v1 [hep-ph] – 2022. – 19 p.
5. Search for sterile neutrinos with the Neutrino-4 experiment and measurement results / Serebrov A. P. [et al.] // Phys. Rev. D. – 2021. – vol. 104, № 3. – p. 032003.
6. Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). – М: Агар, 2005 – 247с.
7. Toulhoat H., Zgonnik V. Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue // The Astrophysical Journal. – 2022. – V. 924. – P. 83.
8. Improved Measurement of Solar Neutrinos from the Carbon-Nitrogen-Oxygen Cycle by Borexino and Its Implications for the Standard Solar Model / Appel S. [et al.] // Physical Review Letters. – 2022. – V. 129. – P. 252701.
9. Final results of Borexino on CNO solar neutrinos / Basilico D. [et al.] // Phys. Rev. D. – 2023. – V. 108, Art. No. 102005.
10. What Fraction of Potassium in the Earth Does the Borexino Experiment Allow? / L. B. Bezrukov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics – 2023. – Vol. 87, No. 7. – P. 972. – DOI: 10.3103/S1062873823702519
11. Bezrukov L., Karpikov I., Sinev V. The indication for ^{40}K geo-antineutrino flux with Borexino phase-III data. // arXiv:2304.02747v2 [hep-ex] (18 Nov 2023).
12. Bezrukov L.B., Sinev V.V. Searches for Geo-antineutrino Flux from ^{40}K on the Basis of Data from the Borexino Detector // Physics of Atomic Nuclei – 2024. – Vol. 87, No. 6. – P. 711–717. <https://doi.org/10.1134/S1063778824700674>.
13. Stringent Tests of Lorentz Invariance Violation from LHAASO Observations of GRB 221009A / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2024. – Vol. 133(7). – P. 071501. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.071501>.
14. The First LHAASO Catalog of Gamma-Ray Sources / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // ApJS. – 2024. – Vol. 271. – P. 25. – <https://doi.org/10.3847/1538-4365/acfd29>.

15. Does or Did the Supernova Remnant Cassiopeia A Operate as a PeVatron? / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJL*. – 2024. – Vol. 961(2). – P. L43. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad1d62>.
16. An ultrahigh-energy γ -ray bubble powered by a super PeVatron / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Sci. Bull.* – 2024. – Vol. 69(4). – P. 449-457. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.12.040>.
17. Discovery of Very High Energy Gamma-Ray Emissions from the Low-luminosity AGN NGC 4278 by LHAASO / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJL*. – 2024. – Vol. 971(2). – P. L45. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad5e6d>.
18. Evidence for particle acceleration approaching PeV energies in the W51 complex / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Sci. Bull.* – 2024. – Vol. 69(18). – P. 2833-2841. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.07.017>.
19. Detection of Very High-energy Gamma-Ray Emission from the Radio Galaxy M87 with LHAASO / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJL*. – 2024. – Vol. 975(2). – P. L44. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad8921>.
20. Measurements of all-particle energy spectrum and mean logarithmic mass of cosmic rays from 0.3 to 30 PeV with LHAASO-KM2A / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2024. – Vol. 132(13). – P. 131002. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.131002>.
21. Новый эксперимент по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов, излучаемых в M1-переходе ядер ^{83}Kr / Гаврилюк Ю.М. [и др.] // *Письма в ЖЭТФ* – 2015. Т. 101, № 10. – С.739–745.
22. Probing the axion–nucleon coupling with the next generation of axion helioscopes / Di Luzio L. [et al.] // *Eur. Phys. J. C*. – 2022. – Vol. 82, № 2. – Art. 120. – P. 1–15.
23. Probing high-energy solar axion flux with a large scintillation neutrino detector / Lucente G. [et al.] // *Phys. Rev. D*. – 2022. – Vol. 106, № 12. – Art. 123007. – P. 1–15.
24. Moriyama S. Proposal to Search for a Monochromatic Component of Solar Axions Using ^{57}Fe // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – Vol. 75, № 18. P. – 3222-3225.
25. Search for resonant absorption of solar axions emitted in M1 transition in ^{57}Fe nuclei / A.V. Derbin [et al.] // *Eur. Phys. J. C* – 2009. – Vol. 62. – P. 755–760.
26. Search for hadronic solar axions / Akhmatov Z.A. [et al.] // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1787, 012036. – P. 1-5.

27. Measurements of all-particle energy spectrum and mean logarithmic mass of cosmic rays from 0.3 to 30 PeV with LHAASO-KM2A / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2024. – Vol. 132(13). – P. 131002. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.131002>.
28. Сотрудничество «Памир». Изучение событий с компланарным разлётом частиц при сверхвысоких энергиях // *Известия АН СССР, сер. физ.* – 1986. – Т. 50. – С. 2125.
29. Xue L., Dai Z.Q., Li J.Y. Study of alignment of high energy γ -hadron families with iron emulsion chambers // *Proc. 26th ICRC, Salt Lake City.* – 1999. – Vol. 1. – P. 127.
30. Stratospheric superfamily with $\Sigma E_{\gamma} \sim 2 \cdot 10^{15}$ eV / Apanasenko A.V. [et al.] // *Proc. 15th ICRC, Plovdiv.* – 1977. – Vol. 7. – P. 220.
31. Capdevielle J.N., Attallah R., Talai M.C. Coplanar emission in gamma-ray families, geometrical and dynamical coincidence or new mechanism? // *Proc. 27th ICRC, Hamburg.* – 2001. – Vol. 1. – P. 1410.
32. Royzen I.I. Theoretical approach to alignment phenomenon // *Mod. Phys. Lett. A.* – 1994. – Vol. 9. – № 38. – P. 3517.
33. Observation of long-range, near-side angular correlations in proton-proton collisions at the LHC / The CMS Collaboration // *JHEP.* – 2010. – Vol. 09. – P. 1 (2010). – [https://doi.org/10.1007/JHEP09\(2010\)091](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2010)091).
34. Mukhamedshin R. A. On connection between the collider long-range near-side “ridge” effect at $|\eta| < 2,4$ and cosmic-ray coplanarity of most energetic particles // *Eur. Phys. J. C.* – 2022. – Vol. 82:155.
35. Capdevielle J.N. Cosmic ray interactions near the LHC energy range (approach with XREC at mountain altitude and in the stratosphere) // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. – 2008. – Vol. 175. – P. 137.
36. Yuldashbaev T.S., Nuritdinov Kh., Chudakov V. M. // Unusual family characteristics at energies above 10 PeV // *Nuovo Cim.* – 2001. – Vol. 24C. – P. 569.
37. Mukhamedshin R.A. On a mechanism of coplanar generation of particles at superhigh energies // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. – 1999. – Vol. 75A. – P. 131.
38. Wibig T. Alignment in hadronic interactions // *arXiv: hep-ph/0003230*.
39. Searching for the Layered Structure of Space at the LHC / Anchordoqui L. [et al.] // *Mod. Phys. Lett. A.* – 2012. – Vol. 27 – 1250021.
40. Мухамедшин Р.А. Об изучении сигнатуры метрики пространства по корреляциям частиц во взаимодействиях адронов. // *Известия РАН. Сер. Физ.* – 2023. – Т. 87. – № 7– С. 962.

41. First results of studies of EAS cores using a high-mountain ionization calorimeter / Т. Sadykov [et al.] // *Particles*. – 2024. – Vol. 7. – P. 40. – <https://doi.org/10.3390/particles 7010003>.
42. Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. // *ЖЭТФ*. – 2022. – Т. 161, вып. 4. – С. 497; Lidvansky A.S., Khaerdinov M.N., and Khaerdinov N.S. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2022 – Vol. 134, No. 4. – pp. 417. DOI: 10.1134/S1063776122040069.
43. Локальные вариации полного электронного содержания ионосферы, измеренные в горах Северного Кавказа / Хаердинов Н.С. [и др.] // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. – 2023. – Т. 45, № 4. – С. 166-189. EDN: EJSJDU. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-166-189>.
44. Хаердинов Н.С. // Суточная волна приземного электрического поля «хорошей погоды» в условиях гор и её влияние на интенсивность мюонов // 38-я Всероссийская конференция по космическим лучам, г. Москва, 01 – 05 июля 2024 г.,
45. Gonzalez-Garcia M.C., Halzen F., Niro V. Reevaluation of the Prospect of Observing Neutrinos from Galactic Sources in the Light of Recent Results in Gamma Ray and Neutrino Astronomy // *Astropart. Phys.* – 2014. – V.57 - 58. – P. 39 – 48.
46. Kalashev O.E., Kusenko A., Essey W. PeV Neutrinos from Intergalactic Interactions of Cosmic Rays Emitted by Active Galactic Nuclei // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – V. 111. – P. 041103.
47. On the GeV and TeV detections of the starburst galaxies M82 and NGC 253 / Lacki B.C. [et al.] // *Astrophys. J.* – 2011. – V. 734, Is. 2. – P. 107 – 120.
48. Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III. Results for the 2002–2007 data-taking period / Abdurashitov J. N. [et al.] // *Phys. Rev. C*. – 2009. – vol. 80. -p. 015807.
49. Measurement of the response of a Ga solar neutrino experiment to neutrinos from a ³⁷Ar source / Abdurashitov J. N. [et al.] (SAGE Collab.) // *Phys. Rev. C*. – 2006. – vol. 73. – p. 045805.
50. Final Search for Short-Baseline Neutrino Oscillations with the PROSPECT-I Detector at HFIR [Электронный ресурс] / Andriamirado M. [et al.] (The PROSPECT Collab.) // [arXiv:2406.10408v1 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/2406.10408v1) – 2024. – 6 p.
51. Improved eV-scale Sterile-Neutrino Constraints from the Second KATRIN Measurement Campaign / Aker M. [et al.] (KATRIN Collab.) // *Phys. Rev. D*. – 2022. – vol. 105. – p. 072004

52. Search for short baseline ν_e disappearance with the T2K near detector / Abe K. [et al.] (The T2K Collab.) // *Phys. Rev. D.* – 2015. – vol. 91. – p. 051102
53. Exploration of mass splitting and muon/tau mixing parameters for an eV-scale sterile neutrino with IceCube [Электронный ресурс] / Abbasi R. [et al.] (IceCube Collab.) // arXiv:2406.00905v1 [hep-ex] – 2024. – 11 p.
54. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. – Киев: Наукова думка, 1975. – 415 с.
55. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 N 47 "Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09" (вместе с "НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы") (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 N 14534). – URL: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-glavnogo-gosudarstvennogo-sanitarnogo-vracha-rf-ot-07072009-n/> (дата обращения: 28.11.2024).
56. Devis R. An attempt to observe the capture of reactor neutrinos in chlorine-37 // *Proc. Intern. Conf. on Radioisotopes on Scien. Research., Paris Septem. -1958.* - vol. 1. - p. 728.
57. Devis R., Jr. and Don Harmer S. Attempt to observe the $Cl^{37}(\bar{\nu}, e^-)A^{37}$ reaction induced by reactor antineutrinos // *Bull. Amer. Phys. Soc.* -1959. - vol. 4. - p. 217.
58. SOX: Short distance neutrino Oscillations with Borexino. / G. Bellini [et al.], (Borexino Collaboration) // *JHEP08.* –2013. – vol. 2013, № 038.
59. CeLAND: search for a 4th light neutrino state with a 3 PBq ^{144}Ce - ^{144}Pr electron antineutrino generator in KamLAND. / Gando A. [et al.] // arXiv:1312.0896 [physics.ins-det] – 2013. –67 p.
60. Final results of Borexino on CNO solar neutrinos / Basilico D. [et al.] // *Phys. Rev. D.* – 2023. – V. 108, Art. No. 102005.
61. Двухканальный поиск излучения коллапсов в галактике / С. И. Орешкин [и др.] // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2024. – Т. 15, № 6. – С. 631–641.
62. Грави-инерциальный лазерный измеритель астро-гео-физических возмущений в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН / К. В. Руденко [и др.] // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2024. – Т. 15, № 6. – С. 599–606.
63. The large-volume detector (LVD): a multipurpose underground detector at Gran Sasso / Bari G. [et al.] // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* – 1989. – V. 277 – P.11-16.
64. Стотонный сцинтилляционный счетчик для регистрации потоков антинейтрино от коллапсирующих звезд в нашей Галактике и для исследования взаимодействия мюонов высоких энергий / Береснев В.И. [и др.] // *ПТЭ.* –1981. –№ 6. – С. 48-51.

65. Сорок лет Артемовскому сцинтилляционному детектору нейтрино / Антоненко А.Г. [и др.] // Ядерная Физика. –2018. – Т. 81, №1. – С. 78-84.
66. Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector / Agafonova N.Y. [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2015. – V. 802:47.
67. Correlation between the Maryland and Rome gravitational-wave detectors and the Mont Blanc, Kamioka and IMB particle detectors during SN 1987 A / Aglietta M [et al.] // Europhys. Lett. – 1987 – Vol.3. – P. 1315.
68. Алексеев Н., Алексеева Л.Н., Волченко В.И., Кривошейна И.В. // Письма в ЖЭТФ – 1987. – Vol. 45. – P. 461.
69. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A / Hirata K. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1987 – Vol.58. – P. 1490.
70. Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud / Bionta R. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1987 – Vol.58 – P. 1494.
71. Bronzini T., Frasca S., Pizzella G., Pallottino G.V., Vannaroni G. An experimental apparatus for studying the background of gravitational-wave antennas and its correlation with geophysical phenomena // Il Nuovo Cimento C – 1985. – Vol. 8 – P.300.
72. Weber J. Evidence for Discovery of Gravitational Radiation // Phys. Rev. Lett. – 1969. – Vol. 22, N24 – P. 1320.
73. Data Recorded by the Rome Room Temperature Gravitational Wave Antenna, during the Supernova SN 1987A in the Large Magellanic Cloud. /Amaldi E. [et al.] / Europhysics Letters – 1987. – Vol. 3 N12. – P. 1325.
74. Coincidences among the data recorded by the baksan, kamioka and mont blanc underground neutrino detectors, and by the Maryland and Rome gravitational-wave detectors during Supernova 1987 A / Aglietta M. [et al.]// Il Nuovo Cimento C – 1991. – Vol. 14. – P. 171.
75. Galeotti P., Pizzella G. New analysis for the correlation between gravitational wave and neutrino detectors during SN1987A. // Eur. Phys. J. C – 2016. – Vol. 76 – P. 426.
76. Bonifazi P., Ferrari V., Frasca S., et al. Data analysis algorithms for gravitational-wave experiments. // Il Nuovo Cimento C – 1978. – V.1. – P. 465.
77. Analysis of the data recorded by the Mont Blanc neutrino detector and by the Maryland and Rome gravitational-wave detectors during SN1987A / Aglietta M. [et al.]// Il Nuovo Cimento C – 1989. – Vol. 12. – P. 75.
78. Ezrow D.H., Wall N.S., Weber J. and Yodh G.B. Insensitivity to Cosmic Rays of the Gravity Radiation Detector// Phys. Rev. Lett. – 1970. – Vol. 24. – P. 945.

79. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей Москва, Атомиздат (1979) p. 304 (in Russian).
80. Amaldi E., Pizzella G. Data analysis for a gravitational wave antenna with resonant capacitive transducer. // *Il Nuovo Cimento C* – 1986. – Vol. 9. – P. 612.
81. Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп. Алексеев Е.Н. [и др.] // Известия АН СССР, Сер. Физ. – 1980. – Т.44, в.3 – С. 609.
82. Witten E. Cosmic Separation of Phases. // *Physical Review D*. – 1984. – Vol. 30. – P. 272.
83. Simulations of the EAS Development in the Atmosphere and Detectors for Experiments with the High-Altitude Ionization Calorimeter ADRON-55 / T. Sadykov [et al.] // *Particles*. – 2024. – Vol. 7, P. 768. – <https://doi.org/10.3390/particles7030044>.
84. http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php.
85. <http://www.nmdb.eu>.
86. Freund F. // *J. Asian Earth Sci.* – 2011. – V. 41. No. 4–5. – P. 383.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2024 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/25-пр от 17.07.2024 г.)

1. The Baikal-GVD Neutrino Telescope: Current Status and Development Prospects // V.M. Aynutdinov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // *Elementary Particles and Fields. Experiment*. 2024. – Vol. 86, No.6. – P. 989. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778824010101>.

2. The Baikal-GVD Neutrino Telescope: Recent Results // Zh.-A.M. Dzhilkibaev [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // *Elementary Particles and Fields / Experiment*. – 2024. – Vol.86. – No.6. – P. 995. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S10637788240101014>.

3. Expected Neutrino Rates from Point-Like Astrophysical Sources in Baikal-GVD // M.I. Kleimenov, D.N. Zaborov (Baikal-GVD Collaboration) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* – 2024. – Vol. 21, No. 4. – P. 646. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477124700912>.

4. Follow-Up Analysis and Visualization of Multimessenger Data for Baikal-GVD // A.A. Kulikov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* – 2024. – Vol. 21, No. 4. – P. 804. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477124701401>.

5. Applying Databases for Data Visualization in Enhanced Follow-Up Regime of Baikal-GVD Neutrino Telescope // A.A. Semeniuk [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* – 2024. – Vol. 21, No. 4. – P. 774. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477124701322>.

6. Elliott S.R., Gavrin V.N., Haxton W.C. The gallium anomaly // *Progress in Particle and Nuclear Physics*. – 2023 (Published: 31.01.2024). – Vol. 134. - P.104082.- <https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2023.104082>.

7. Gorbachev V.V., Gavrin V.N., Ibragimova T.V. Gallium neutrino absorption cross section and its uncertainty // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2023 (Published: 22 February 2024). – Vol. 86, N. 5. – P. 1385–1388. - <https://doi.org/10.1134/S1063778823060194>

8. Горбачев В.В., Гаврин В.Н., Ибрагимова Т.В. Галлиевая аномалия и эксперимент BEST-2 с источником ^{58}Co // принята в печать в ЖЭТФ

9. Baksan Large Neutrino Telescope Project: Prototypes and Perspectives / Lukanov A.D. [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2023 (Published: 22.02.2024). – Vol. 86, N. 6. – P.1380–1384. - <https://doi.org/10.1134/S1063778823060182> .

10. Bezrukov L.B., Sinev V.V. Searches for Geo-antineutrino Flux from 40K on the Basis of Data from the Borexino Detector // *Physics of Atomic Nuclei* – 2024. - Vol. 87, No. 6. – P. 711–717. <https://doi.org/10.1134/S1063778824700674>.
11. Двухканальный поиск излучения коллапсов в галактике / С. И. Орешкин [и др.] // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2024. – Т. 15, № 6. – С. 631–641.
12. Грави-инерциальный лазерный измеритель астро-гео-физических возмущений в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН / К. В. Руденко [и др.] // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2024. – Т. 15, № 6. – С. 599–606.
13. Прецизионное измерение гравитационного смещения частоты электромагнитных сигналов / В. Н. Руденко [и др.] // *ЖЭТФ*. – 2024. – Т. 166, вып. 5 (11). – С. 632–640. <https://doi.org/10.31857/S0044451024110063>
14. N. Yu. Agafonova, A. S. Malgin. Origin of the Signals Recorded on February 23, 1987 in Gravity Antennas // *Physics of Atomic Nuclei* – 2024. – Vol. 87, No. 2 – P. 118–124. <https://doi.org/10.1134/S1063778824020030>
15. Stringent Tests of Lorentz Invariance Violation from LHAASO Observations of GRB 221009A / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2024. – Vol. 133(7). – P. 071501. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.071501>.
16. The First LHAASO Catalog of Gamma-Ray Sources / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJS*. – 2024. – Vol. 271. – P. 25. – <https://doi.org/10.3847/1538-4365/acfd29>.
17. Does or Did the Supernova Remnant Cassiopeia A Operate as a PeVatron? / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJL*. – 2024. – Vol. 961(2). – P. L43. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad1d62>.
18. An ultrahigh-energy γ -ray bubble powered by a super PeVatron / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Sci. Bull.* – 2024. – Vol. 69(4). – P. 449-457. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.12.040>.
19. Discovery of Very High Energy Gamma-Ray Emissions from the Low-luminosity AGN NGC 4278 by LHAASO / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJL*. – 2024. – Vol. 971(2). – P. L45. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad5e6d>.
20. Evidence for particle acceleration approaching PeV energies in the W51 complex / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Sci. Bull.* – 2024. – Vol. 69(18). – P. 2833-2841. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.07.017>.
21. Detection of Very High-energy Gamma-Ray Emission from the Radio Galaxy M87 with LHAASO / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *ApJL*. – 2024. – Vol. 975(2). – P. L44. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad8921>.

22. Measurements of all-particle energy spectrum and mean logarithmic mass of cosmic rays from 0.3 to 30 PeV with LHAASO-KM2A / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2024. – Vol. 132(13). – P. 131002. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.131002>.
23. Optimization of performance of the KM2A full array using the Crab Nebula / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Chinese Phys. C.* – 2024. – Vol. 48(6). – P. 065001. – <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad2e82>.
24. Research on the knee region of cosmic ray by using a novel type of electron–neutron detector array / BB. Li [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Front. Phys.* – 2024. – Vol. 19. – P. 44200. – <https://doi.org/10.1007/s11467-023-1383-2>.
25. LHAASO-KM2A detector simulation using Geant4 / Z. Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Radiat. Detect. Technol. Methods.* – 2024. – Vol. 8. – P. 1437-1447. – <https://doi.org/10.1007/s41605-024-00467-8>.
26. γ -Ray Detection with the TAIGA-IACT Installation in the Stereo Mode of Observation / P.A. Volchugov [et al.] // *Instruments and Experimental Techniques.* – 2024. – Vol.67, №1. – P.143. – <https://doi.org/10.1134/S0020441224700106>.
27. Search for High-Energy Gamma Quanta from the Cygnus Cocoon Source in October–November 2020 / E. Okuneva [et al.] // *Phys. Atom. Nucl.* – 2024. – Vol.87, № 3. – P.165. <https://doi.org/10.1134/S1063778824700194>.
28. A nearby source of ultra-high energy cosmic rays / Kuznetsov M. Yu. // *JCAP* – 2024. – Vol. 04. – P. 042. – <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/04/042>
29. Methods of machine learning for the analysis of cosmic rays mass composition with the KASCADE experiment data / Kuznetsov M. Yu. [et al.] // *JINST* – 2024. – Vol. 19. – P. P01025. – <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/01/P01025>
30. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays with the KASCADE experiment data and machine learning / Kuznetsov M. Yu. [et al.] // *JCAP* – 2024. – Vol. 05. – P. 125. – <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/05/125>
31. First results of studies of EAS cores using a high-mountain ionization calorimeter / T. Sadykov [et al.] // *Particles.* – 2024. – Vol. 7. – P. 40. – <https://doi.org/10.3390/particles7010003>.
32. Simulations of the EAS Development in the Atmosphere and Detectors for Experiments with the High-Altitude Ionization Calorimeter ADRON-55 / T. Sadykov [et al.] // *Particles.* – 2024. – Vol. 7. – P. 768. – <https://doi.org/10.3390/particles7030044>.

33. Хаердинов Н.С. Суточная волна приземного электрического поля «хорошей погоды» в условиях гор и её влияние на интенсивность мюонов // Изв. РАН. Сер. физ. В печати.

34. Лидванский А. С. "Кто и когда открыл космические лучи?" // УФН. – 2024. – Т. 194, вып. – С. 999–1006. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.08.039728>

А.2 Публикации, индексируемые Web of Science и Scopus (не вошедшие в подраздел А.1)

1. Generating Baikal-GVD high energy cascade-like neutrino events with a GEANT4-based simulation toolkit / Z. Wang [et al.] // Chinese Phys. C. – 2024. – Vol. 48. – No. 10. –P. 105001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad5bd4>.

2. Large neutrino telescope Baikal-GVD: status 2023 / R. Dvornicky [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2024. – PoS EPS-HEP2023. –P. 059. – DOI: <https://doi.org/10.22323/1.449.0059>.

3. Reconstruction of double cascades in the Baikal-GVD neutrino telescope / E. Eckerova [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2024. – PoS TAUP2023. –P. 258. – DOI: <https://doi.org/0.22323/1.441.0258>.

4. Selection techniques of neutrino-induced cascades in the Baikal-GVD neutrino telescope of double cascades in the Baikal-GVD neutrino telescope / Z. Bardacova [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2024. – PoS TAUP2023. –P. 248. – DOI: <https://doi.org/0.22323/1.441.0248>.

5. Руденко В.Н. Поиск гравитационных сигналов коллапсирующих объектов Галактике // Вестник РФФИ. – 2024. – №4. в печати 26 страниц.

А.3 Статьи в журналах из списка ВАК (не вошедшие в предыдущие пункты)

1. Лазерная калибровочная система нейтринного телескопа Baikal-GVD / В.А. Аллахвердян [и др.] (Baikal-GVD Collaboration) // Приборы и техника эксперимента. – 2024. – Вып.5. – УДК 539.123. – <https://iet.ras.ru/2024/5/pub/avrorin.pdf>.

А.4 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ (не вошедшие в предыдущие пункты)

1. Probing the Galactic neutrino flux at neutrino energies above 200 TeV with the Baikal Gigaton Volume Detector / V.A. Allakhverdyan [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // e-Print: 2411.05608 [astro-ph]. – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.05608>.

2. Resent results from the Baikal-GVD neutrino telescope / G.B. Safronov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Moscow University Phys. Bull. – 2024. – Special Is.: 21st Lomonosov Conf. Elem. Part. Phys. – in press.

3. Горбачев В.В., Гаврин В.Н., Ибрагимова Т.В. Галлиевая аномалия и эксперимент BEST-2 с источником ^{58}Co // принята в печать в журнал ЭЧАЯ.