

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

УДК 539.1, 539.12, 539.123

Рег. № 122041100011-7

Рег. №



М.В. Либанов

«30» декабря 2022 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

(промежуточный за 2022 год)

ФЦП

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

 Г.И. Рубцов
«30» декабря 2022 г.

Москва 2022 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Зам. директора,
д-р физ.-мат. наук,
профессор

 30.12.2022
подпись, дата

Г.И. Рубцов
(введение, разделы 10, 11, 12,
заключение)

Исполнители:

Зав. лабораторией,
д-р физ.-мат. наук,
чл.-корр. РАН

 30.12.2022
подпись, дата

Г.В. Домогацкий
(разделы 1-5)

Зав. лабораторией,
д-р физ.-мат. наук
чл.-корр. РАН

 30.12.2022
подпись, дата

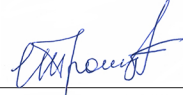
В.Н. Гаврин
(разделы 6, 7)

Зав. лабораторией,
д-р физ.-мат. наук

 30.12.2022
подпись, дата

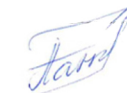
Л.Б. Безруков
(разделы 8, 9)

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

 30.12.2022
подпись, дата

С.В. Троицкий
(введение, заключение)

Зам. зав. филиалом,
канд. физ.-мат. наук

 30.12.2022
подпись, дата

А.М. Гангапшев
(раздел 15)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук
доцент

 30.12.2022
подпись, дата

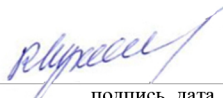
В.В. Кузьминов
(раздел 21)

Зав. лабораторией,
канд. физ.-мат. наук

 30.12.2022
подпись, дата

А.С. Лидванский
(раздел 20)

Зав. лабораторией,
канд. физ.-мат. наук

 30.12.2022
подпись, дата

Р.А. Мухамедшин
(разделы 18, 19)

Зав. филиалом,
д-р физ.-мат. наук
доцент

 30.12.2022
подпись, дата

В.Б. Петков
(разделы 10, 16, 21)

Вед. науч. сотр,
д-р физ.-мат. наук

 30.12.2022
подпись, дата

Ю.В. Стенькин
(разделы 13, 14, 17)

Нормоконтроль

 30.12.2022
подпись, дата

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 129 с., 1 кн., 41 рис., 7 табл., 112 источн., 1 прил.

ПЕРЕЧЕНЬ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ: КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ, ГАММА-АСТРОНОМИЯ, ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА, ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ, НЕЙТРИНО, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, АДРОННЫЕ АКСИОНЫ, ГЕОНЕЙТРИНО, ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА

Объектами исследования являются: астрофизические нейтрино и антинейтрино, нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников, антинейтрино от распада 40K в Земле, темная материя, гравитационно-волновые всплески, источники космического гамма-излучения, широкие атмосферные ливни, адронные аксионы, генерация частиц при сверхвысоких энергиях, связь между мюонами космических лучей и высотными разрядами.

Цель работы – регистрация и исследование потоков астрофизических нейтрино и антинейтрино, поиск осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, изучение модели Земли с точки зрения величины потока антинейтрино от распадов 40K , мониторинг гравитационно-волновых всплесков и поиск гравитационно-нейтринных корреляций, мониторинг и исследование моделей взрывов сверхновых, поиск и мониторинг источников космического гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ и выше 100 ТэВ, исследование свойств солнечных адронных аксионов, создание установки Ковер-3 для регистрации широких атмосферных ливней, изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей с энергиями от 200 ТэВ до 100 ЭэВ, разработка модели взаимодействий адронов FANSY-2.0, исследование связи между коллайдерным «ridge» эффектом и компланарной генерацией частиц, разработка теоретической модели вариаций потоков мюонов во время гроз для геофизических исследований.

В результате исследования: объем установки Baikal-GVD увеличен до $0,4 \text{ км}^3$, впервые с достоверностью в 2,7 сигма зарегистрирован каскад, вызванный нейтрино с энергией порядка 43 ТэВ, как событие, совпадающее с допустимыми пределами по времени и направлению с событием, зарегистрированным IceCube, впервые независимый анализ последних экспериментальных данных с детектора Борексино подтвердил предсказание Гидридной модели Земли о существовании большого количества калия в Земле, по данным детекторов LVD и АСД получены ограничения на частоту взрывов сверхновых, разработан новый метод оценки коэффициента связи амплитуды аномальных возмущений интенсивности мюонов с разностью потенциалов в тропосфере между средним уровнем генерации мюонов и уровнем наблюдения.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	7
1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершённых НИОКР (Задача № 1).....	21
2. Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» (Задача № 2)	25
3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD (Задача № 3)..	27
4. Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий (Задача № 4).....	28
5. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача № 5).....	30
6. Эксперименты с источниками нейтрино и антинейтрино на галлиевой мишени УНУ ГГНТ (Задача № 6).....	31
6.1. Эксперимент BEST2 с источником ^{65}Zn на трехзонной галлиевой мишени	31
6.1.1. Активность источника	34
6.1.2. Области чувствительности к параметру Δm^2	36
6.2. Галлиевый эксперимент с антинейтринным источником ^{170}Tm	38
6.2.1. Измерения.....	39
6.2.2. Источник.....	40
6.2.3. Нарботка ^{170}Tm в ядерном реакторе	41
6.2.4. Облучение галлиевой мишени.....	42
6.2.5. Возможные результаты по измерениям сечений	45
6.2.6. Плотности туллия.....	46
7. Проведение физических измерений на полутонном прототипе ББНТ (Задача № 7)....	48
7.1. Энергетический отклик детектора.....	49
7.2. Измерение потока мюонов.....	51
8. Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле (Задача № 8).....	54
9. Запуск оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10-19 Гц/2	

к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно-нейтринных корреляций (Задача № 9)	57
9.1. Модернизация систем активной тепловой стабилизации ОГАН с целью удержания его температурных вариаций в пределах, не превышающих 0.01К, что необходимо для его долговременно работы в режиме максимальной чувствительности	57
9.2. Разработка и тестирование оптимальных алгоритмов совместной обработки выходных данных ОГАН и БПСТ для повышения эффективности регистрации коллапсирующих звезд в Галактике	60
10. Непрерывный мониторинг вспышек Сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино (Задача № 10)	63
10.1. Метод регистрации нейтринных вспышек с помощью сцинтилляционных детекторов	63
10.1.1. Детектор большого Объема - LVD	64
10.1.2. Артемовский Сцинтилляционный детектор - АСД	64
10.2. Модели взрыва для Сверхновой SN1987A	65
10.2.1. Моделирование отклика для детектора LSD на Geant4, доработка пакета ...	66
10.2.2. Моделирование для модели стандартного коллапса	67
10.2.3. Моделирование для модели вращающегося коллапсара	67
10.2.4. Сравнение результатов для разных моделей	68
10.3. Мониторинг вспышек сверхновых на детекторе БПСТ	70
11. Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов на данных детекторов АСД, БПСТ и LVD, связанных с событиями астрофизических источников (Задача №11)	72
11.1. Методы и подходы для решения задачи	72
11.2. Поиск совпадений во время сигнала GW170817	77
12. Разработка детектора HALO+1kt на основе свинцовой мишени с регистрацией нейтронов, с возможностью определения типов нейтрино для уточнения моделей сверхновых (Задача № 12)	80
12.1. Варианты разрабатываемого детектора	80
12.2. Моделирование захватов нейтронов, рожденных в свинце, в LVD	82
13. Поиск космических гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ по данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. (Задача № 13)	84
13.1. Результаты эксперимента TAIGA	84
13.2. Результаты эксперимента LHAASO	84
14. Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO (Задача № 14)	86

14.1.	Результаты эксперимента TAIGA	86
14.2.	Результаты эксперимента LHAASO	87
15.	Поиск солнечных адронных аксионов (Задача № 15).....	89
16.	Развертывание и эксплуатация установки Ковер-3 (Задача № 16).....	90
17.	Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок Ковер-3, TAIGA, LHAASO, и Telescope Array (Задача № 17).....	92
17.1.	Исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей на установке TAIGA.....	92
17.2.	Создание российско-китайской установки ENDA-LHAASO.	93
18.	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 исследования фрагментационной области генерации частиц; и моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях (Задача № 18)	95
18.1.	Необходимость разработки новых моделей	95
18.2.	Программный пакет FANSY 2.0	95
19.	Исследование возможной связи между коллайдерным «ridge» эффектом и компланарной генерацией частиц в космических лучах на основе анализа экспериментальных и расчетных данных по азимутальным эффектам (Задача № 19)	97
19.1.	Необходимость изучения фрагментационной области	97
19.2.	Экспериментальные данные и сигнатура пространства	98
20.	Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов (Задача № 20)	100
21.	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 (Задача № 21).....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		118
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....		127

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершенных НИОКР»

В 2022 году были продолжены работы по развитию научного экспериментального комплекса и инфраструктуры Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) с целью создания на его базе нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба (проект 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 2022 году в озере Байкал был установлен два кластера: девятый и десятый. С их вводом в режим регистрации данных рабочий объем телескопа достиг значения $0,4 \text{ км}^3$ в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы.

2. Задача «Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория»

Работа телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного, долговременного набора данных обеспечивается надежностью аппаратуры и программных средств управления телескопом. Качество экспериментальных данных обеспечивается непрерывным мониторингом состояния всех систем телескопа, а также периодическими калибровками регистрирующей аппаратуры. Большинство параметров работы телескопа выводится на мониторы Берегового центра для отслеживания и принятия решений дежурным оператором. Но эти же параметры доступны и специалистам в удаленных научных центрах, которые осуществляют непрерывное отслеживание изменений параметров и консультируют операторов в случае отклонений от штатных режимов работы телескопа.

В течение 2022 года были продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Байкальский нейтринный телескоп является в настоящее время одним из трех действующих и самым крупным в Северном полушарии нейтринным телескопом по своей эффективной площади и эффективному объему по отношению к регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий. Получаемые с помощью телескопа Baikal-GVD результаты стимулируют интерес и международное сотрудничество в обработке и анализе

экспериментальных данных. Продолжено эффективное сотрудничество в рамках международного научного консорциума (IceCube, ANTARES, KM3NeT, Baikal-GVD) «Глобальной нейтринной сети» (GNN) как первого этапа по созданию «Глобальной нейтринной обсерватории» (GNO). Привлечены к совместным работам специалисты из российских и зарубежных институтов.

Существенный вклад в кооперацию вносит ежемесячный электронный бюллетень, издаваемый Кристианом Шпирингом (DESY Цойтен, Германия).

3. 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.

Благодаря использованию этой методики, в 2010-2011 годах была рассчитана оптимальная кластерная конструкция проектируемого телескопа Baikal-GVD. В 2022 году были продолжены работы по оптимизации конструкции телескопа, а также проведены работы по моделированию влияния расстояний между кластерами на чувствительность телескопа и влияния установки гирлянды оптических модулей между кластерами. В экспедиции 2022 года 9 и 10 кластеры были установлены на расстоянии 230 м от центров ранее установленных кластеров и установлена гирлянда оптических модулей между кластерами. Результаты исследований будут известны в 2023 году.

Такая же методика сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами используется и в off line анализе и обработке данных с постепенным приближением к минимуму в их различии.

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.

4. Задача «Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий»

Параллельно с расширением телескопа разрабатывалась адекватная система управления телескопом, сбора и обработки данных. Количество поступающих с телескопа данных достигло сотен терабайт в год, что, естественно, потребовало использования самых современных методов обработки больших массивов данных. На основе уже используемых пакетов программ в мировой практике была разработана собственная, адекватная телескопу система BARS (BARS - Baikal Analysis and Reconstruction Software) для работы с данными участников коллаборации «Байкал». С помощью системы производится первичная обработка, включающая восстановление событий и моделирование работы телескопа методами Монте-Карло. Многие процессы обработки данных уже автоматизированы и ведется работа по автоматизации всех процессов первичной обработки, включая процессы калибровки и представления результатов экспериментов. Для выполнения больших объемов вычислительных операций были использованы вычислительная система ИЯИ РАН (сервер и накопитель данных на 50 терабайт), созданные за счет обновления приборной базы, а также мощности вычислительных систем, предоставленные ОИЯИ (Дубна). В 2022 году были расширены вычислительные мощности в ИЯИ РАН, используемые для моделирования и анализа данных Baikal-GVD. По программе обновления приборной по национальному проекту «Наука», благодаря закупке серверного оборудования в 2022 году, удалось многократно (с 50 до 400 ТБ) увеличить возможности по локальному хранению данных в ИЯИ РАН, а также существенно (на 30%) увеличить вычислительные мощности.

5. Задача «Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц»

Существует множество гипотез о формах существования темной материи и местах ее скоплений во Вселенной. Экспериментальную проверку этих гипотез предполагается осуществить регистрацией потоков нейтрино определенного спектра энергий, возникающих в результате распада или аннигиляции частиц темной материи в местах их скоплений. Кандидатами в частицы темной материи рассматриваются как сами нейтрино, так и частицы, физическая природа которых выходит за рамки Стандартной модели (WIMP, стерильные нейтрино, аксионы и др.).

Раскрытие тайны темной материи уже на протяжении десятилетий остается одним из актуальных предметов и направлений теоретических и экспериментальных исследований. Создается целый ряд детекторов для регистрации и идентификации частиц темной материи по предполагаемым признакам. Каждый из нейтринных телескопов с момента их создания включал в программу исследований поиск частиц темной материи так же, как и первый в мире Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ-200. Исследования в этом направлении с расширенными возможностями продолжаются с

момента установки в 2016 году первого полноценного кластера телескопа Baikal-GVD и по настоящее время.

6. 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 результате исследования выработаны 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 проверена возможность решения галлиевой аномалии через осцилляционные переходы антинейтрино в нейтрино. Результат может быть применен для поиска физических явлений за пределами Стандартной модели физики частиц, в том числе кандидатов на роль темной материи.

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

В процессе работы проводились измерения потока мюонов на детекторе прототипа с жидким сцинтиллятором 0,5 т, энергетический отклик сцинтилляционного детектора прототипа. Результаты необходимы для разрабатываемого 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.

8. 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) [27], [28] предсказывает большое содержание калия (до несколько 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 Борексино [29]. Основной целью данной работы

является независимый анализ последних данных Борексино с включением в анализ нового источника событий - рассеяния $^{40}\text{K-geo-v}$ на электронах сцинтиллятора.

В случае наличия в Земле большого количества калия ожидается, что включение этого нового источника событий от $^{40}\text{K-geo-v}$ в анализ позволит улучшить согласие экспериментального энергетического спектра событий с полученным теоретически в результате минимизации функции χ^2 .

Анализ ИЯИ РАН предпоследнего экземпляра данных Борексино [30], [31] показал, что данные допускают большое количество калия в Земле.

Проведенный в ИЯИ РАН анализ в 2022 году последних данных эксперимента Борексино подтвердил наличие калия в Земле в количестве нескольких процентов от массы Земли. Этот результат был доложен на Всероссийской конференции по физике космических лучей в 2022 году. (Л.Безруков, И.Карпиков, А.Межох, Я.Никитенко, С.Силаева, В.Синёв. Какую долю калия в Земле допускает эксперимент Борексино? Доклад на 37 Всероссийской конференции по космическим лучам. 27 июня – 2 июля 2022. <https://events.sinp.msu.ru/event/10/attachments/631/909/>). Доклад оформлен в виде статьи, послан в печать и будет опубликован в 2023 году в Известиях РАН, серия физическая.

При распаде изотопа ^{40}K в Земле выделяется известная порция тепла. Оказалось, что количество калия, полученного из анализа данных Борексино достаточно для того, чтобы объяснить наблюдаемую сейчас скорость нагрева мирового океана.

9. Задача «Запуск оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывного мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10-19Гц1/2 к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно-нейтринных корреляций»

После первой регистрации в 2015 году всплеска гравитационно-волнового излучения от слияния релятивистской двойной с компонентами из черных дыр (ВН) удалось обнаружить и другие подобные события. Детектирование этих сигналов было выполнено с помощью установок ЛИГО – больше-базовых (4 км) лазерных интерферометров на подвесных зеркалах, которые работают как измерители гравитационного градиента, переносимого ГВ волной. Важной ступенью явилась регистрация уже тремя детекторами (включая аналогичный интерферометр ВИРГО в Европе) всплеска GW170814 от слияния ВН-двойной ($M=30 M_0$) с расстояния 540 Мпс, что позволило на порядок уменьшить зону локализации источника на небесной сфере, до ~ 60 кв.град. Наконец, был зарегистрирован ГВ-сигнал от слияния нейтронных звезд (NS), совпавший по времени с гамма импульсом GRB170817A (с задержкой 1,7 сек), подтвердив гипотезу рождения коротких гамма всплесков в результате слияния NS-двойной.

Все эти факты позволяют уверенно говорить о фактическом возникновении нового гравитационно-волнового канала получения астрофизической информации. Они также прогнозируют эффективность многоканальной астрономии, т.е. стратегии параллельного наблюдения за транзиентами на детекторах разной физической природы. В России единственным гравитационно-волновым детектором в килогерцовом диапазоне частот является комбинированная оптоакустическая антенна ОГАН, 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 средней скоростью 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 ОГАН в режиме мониторинга потребовала заметных усилий. Детальное описание представлено в отчете ниже. Кроме этого, подробно изложена методика совместной обработки данных ОГАН и БПСТ, развитая на основе опыта приобретенного в процессе исследования события вспышки Сверхновой SN1987A.

10. 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. Уникальный российско-итальянский детектор LVD, способный регистрировать все типы нейтрино, благодаря мишени из железа и сцинтиллятора, копил данные с 1992 года. Уникальность Российского детектора БПСТ обусловлена доступностью данных и свободой любых научных действий и идей. Уникальный Российский детектор АСД, находился в самом чистом, с точки зрения фоновых условий месте, соляной шахте Донецкой области. Его накопленные данные с 1977 по 2020 позволяют сравнивать результаты наблюдений со многими детекторами, работавшими в разное время.

Цель исследований, проводимых на нейтринных детекторах АСД, БПСТ и LVD – регистрация нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в нашей Галактике

и установление параметров моделей коллапсов звезд, а также изучение фоновых эффектов влияющих на сигналы подземных детекторов.

11. Задача «Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов на данных детекторов АСД, БПСТ и LVD, связанных с событиями 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 девять детекторов — LVD (Италия), SK, KamLAND (Япония), АСД (Артемовск, Донецкая обл.), HALO (Канада), IceCube, DayaBay (Китай), Borexino (Италия) и БПСТ (Россия), способных 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, возможно, направление для астрономических наблюдений. Информация о характеристиках детектируемых нейтрино необходима для понимания ядерных процессов в звезде на последней стадии эволюции. На сегодня единственным наблюдаемым нейтринным сигналом от гравитационного коллапса является регистрация вспышки SN 1987A 23 февраля 1987 г. Четыре нейтринных детектора: сцинтилляционные (LSD [60] и БПСТ [61]) и черенковские (КП [62] и ИМБ [63]) впервые в истории зарегистрировали нейтринные сигналы от гравитационного коллапса звезды, но не в одно и то же время. Первая регистрация нейтринного сигнала детектором LSD в онлайн режиме была осуществлена в 2ч 52 мин всемирного времени. Было измерено пять импульсов в течение 7 секунд. За время работы LSD с января 1985 г подобного события зафиксировано не было. Вероятность имитации такого события фоном составляет 0,001. Только через 5 часов нейтринные сигналы были зарегистрированы детекторами БПСТ (5 событий), КП (12 событий) и ИМБ (8 событий). Проблема регистрации нейтрино от SN1987A описана в работе [64]. Кроме этого, во время вспышки SN1987A были обнаружены совпадения импульсов в течение 1с, зарегистрированных в детекторах LSD и БПСТ, а также в LSD и КП. Число таких совпадений в течение двух часов для LSD-КП около времени 2:52 UT оказалось равным 8, а для LSD-БПСТ — 13, из которых 2 и 3 совпадения, соответственно, могут быть случайными. Зарегистрированное число двойных импульсов превысило число фоновых пар в 7.3 раза. Случайно такое событие могло совпасть с днем вспышки Сверхновой один раз за 3000 лет.

С 2004 года работает мировая система SNEWS (SuperNova Early Warning System — Система раннего оповещения о вспышках сверхновых). Цель SNEWS—предоставить

астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке сверхновой в нашей Галактике. В эту систему входят Super-K, LVD, IceCube, Borexino, KamLAND, HALO и Daya Bay. Daya Bay [65] – последний детектор, вошедший в систему SNEWS. Данные со всех детекторов направляются в Брукхэвенскую национальную лабораторию [<https://snews.bnl.gov/>].

Наблюдение гравитационных волн экспериментами LIGO и VIRGO [66, 67, 68] вызвало интенсивный поиск событий в нейтринных детекторах [69, 70, 71, 72]. Гравитационный сигнал от GW170817 вероятнее всего, вызван слиянием двух нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры с массами 1,17 – 1,60 Мс. При таком слиянии должен генерироваться мощный нейтринный сигнал. Черенковские нейтринные телескопы (ANTARES, IceCube) и Обсерватория Pierre Auger искали высокоэнергетические нейтрино выше 100 ГэВ и 100 PeV, соответственно. В детекторе KamLAND исследовали антинейтринные события обратного бета-распада (IBD) с энергией от 1,8 до 111 МэВ, и Коллаборация Super-Kamiokande сообщила о результатах для сигналов нейтрино в диапазоне энергий нейтрино от 3,5 МэВ до 100 PeV. Коллаборация детектора BOREXINO [73] провела анализ своих событий в диапазоне энергий от 0,25 до 15 МэВ. Сообщалось о поиске нейтрино и антинейтрино в интервале времени ± 500 секунд вокруг времени обнаружения гравитационных волн в упомянутых выше детекторах, но превышения совпадающих нейтринных событий над фоном обнаружено не было. Электромагнитные детекторы [74, 75, 76, 77], также не обнаружили аналогов для различных длин волн электромагнитного излучения, за исключением слабого совпадающего избытка выше 50 кэВ и 0,4 от GW159014.

Сочетание данных гравитационных, электромагнитных и нейтринных детекторов формируют многоплановый подход, ведущий к более полному пониманию астрофизических и космологических процессов.

В 2022 году разобрана установка Borexino. К 2024 будет разобрана установка LVD. Детектор БПСТ в БНО ИЯИ РАН останется одной из немногих, которая способна регистрировать вспышки сверхновых, а с использованием жидкого сцинтиллятора – единственной в мире.

12. Задача «Разработка детектора HALO+1t на основе свинцовой мишени с регистрацией нейтронов, с возможностью определения типов нейтрино для уточнения моделей взрыва Сверхновых»

Цель работы – разработка нового типа детектора с мишенью из свинца для регистрации нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в нашей Галактике.

В работе использованы методы Монте-Карло моделирования для определения характеристик защиты детектора и эффективности регистрации.

Область применения результатов: фундаментальные исследования и получение новых знаний.

13. 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 2021г. 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 эта установка 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 и на гамма-лучи от возможного распада тяжелых частиц темной материи. В отчетном году были опубликованы 2 главы “LHAASO Science Book” где подробно описаны все установки LHAASO и решаемые задачи. Также были опубликованы две обзорные статьи, описывающие выдающиеся результаты, полученные LHAASO.

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.

14. 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, для чего используются 3 установки LHAASO: сцинтилляционные детекторы Km2A, водные черенковские детекторы WCDA и имиджевые черенковские телескопы WFCDA. Эти установки имеют

рекордные светосилу и угловое разрешение, превышающие мировой уровень, что позволяет получать выдающиеся результаты.

Планируется создание сети из 10-12 узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT. Первые два телескопа из этой сети построены и успешно работают уже нескольких лет. Осенью 2022 года успешно произведен физический пуск третьего телескопа. С помощью этих телескопов ведутся исследования гамма-квантов высоких энергий от локальных источников как галактических, так и внегалактических.

15. Задача «Разработка нового детектора адронных аксионов на основе изотопа ^{57}Fe . Предполагается использовать железосодержащий полупроводниковый материал – пирит. На основе этого материала (в первые) изготовить полупроводниковый детектор с массой активного материала $\sim 100\text{г}$. Ожидается, что новый детектор позволит как минимум на порядок улучшить результаты, полученные на ^{83}Kr »

Наиболее естественное решение CP-проблемы сильных взаимодействий было получено путем введения новой киральной симметрии, спонтанное нарушение которой при энергии f_A полностью компенсирует CP-неинвариантный член в лагранжиане квантовой хромодинамики (КХД) и приводит к появлению аксиона. В моделях адронного (или KSVZ)-аксиона, и GUT (или DFSZ)-аксиона его масса может быть выражена через свойства π^0 - мезона:

$$m_A = \frac{m_\pi f_\pi}{f_A} \left[\frac{z}{(1+z)(1+z+w)} \right]^{1/2}$$

где m_π и f_π – масса и константа распада пиона, $z = m_u/m_d = 0,56$ и $w = m_u/m_s = 0,029$ – отношения масс кварков. Значения $z = 0,56$ и $w = 0,029$ являются общепринятыми в аксионной литературе, хотя существующие экспериментальные данные разрешают достаточно широкий интервал для возможных значений z и w . Ограничения на массу аксиона возникают как следствие экспериментальных ограничений на константы связи аксиона с фотонами ($g_{A\gamma}$), электронами (g_{Ae}) и нуклонами (g_{AN}), которые, в свою очередь, являются модельно зависимыми величинами. Если аксион существует, Солнце должно быть одним из наиболее мощных его источников. Целью данной работы является поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ излучаемых в недрах Солнце. На Земле аксионы могут быть обнаружены в реакции их резонансного поглощения ядром ^{83}Kr путем регистрации частиц (γ - и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня.

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

Современные представления о происхождении космических лучей базируются на различных типах взаимодополняющих друг друга экспериментальных данных. Непосредственно спектр и массовый состав космических лучей измеряется в широком диапазоне первичных энергий в локальной области космического пространства. В отличие от космических лучей (протонов и ядер более тяжелых элементов), которые являются заряженными частицами и отклоняются в межзвёздных магнитных полях, первичные гамма-кванты дают информацию о пространственном распределении и характеристиках мест ускорения космических лучей и о плотности космических лучей в межзвёздном пространстве. Создаваемая в БНО ИЯИ РАН современная многоцелевая установка по регистрации широких атмосферных ливней “Ковер-3” позволит получать такие взаимодополняющие друг друга экспериментальные данные о происхождении и ускорении космических лучей. По измеренным характеристикам ШАЛ будет изучен спектр и состав первичных космических лучей в области энергий, охватывающей область излома в спектре ПКЛ. Исследования гамма-излучения с энергией более 100 ТэВ позволят получить уникальную информацию об объектах нашей Галактики, ускоряющих заряженные частицы до таких высоких энергий.

В процесс создания установки “Ковер-3” было проведено существенное увеличение площади наземной части установки, путем создания новых выносных пунктов регистрации (ВПП). Также была значительно увеличена площадь подземного мюонного детектора МД до 410 м², с первоначальных 175 м². Была разработана и активно развивается новая система сбора и хранения экспериментальных данных установки “Ковер-3”.

17. Задача «Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок Ковер-3, TAIGA, LHAASO, и Telescope Array»

На установках экспериментального комплекса TAIGA получены результаты по энергетическому спектру и массовому составу космических лучей в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 100 ПэВ. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других экспериментов: HAWC, ICE-TOF, Pierre Auger Observatory и Telescope Array.

В рамках проекта LHAASO для решения этой задачи уже используется установка Km²A, площадью более 1 кв. км. Кроме того, было создано 3 прототипа установки ENDA (Electron-Neutron Detector Array), по 1 кластеру из 16 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторы), разработанных в ИЯИ РАН и способных регистрировать две главные компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Один из прототипов (ENDA-INR) работает в Москве на территории ИЯИ РАН, а два других работают в условиях высокогорья: в месте проведения эксперимента LHAASO и в Тибетском университете.

Проводится сравнение данных, получаемых на прототипах при существенно различной высоте наблюдения, а также проводятся работы по изучению метеопараметров на показания детекторов.

18. 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»

Основные эксперименты на БАК получают данные, в основном, по характеристикам центральной кинематической области взаимодействий адронов, которая играет второстепенную роль в развитии широких атмосферных ливней (ШАЛ) от частиц первичного космического излучения (ПКИ) (хотя является весьма важной для генерации мюонной компоненты ШАЛ. 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. С другой стороны, эти модели воспроизводят генерацию только основных типов адронов, преимущественно, стабильных, тем самым упрощая себе задачу. В частности, только в SIBYLL моделируется рождение чармированных адронов, а 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, а именно, для изучения развития ШАЛ с учетом 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).

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

19. 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 [89, 90, 91, 92] тенденция к компланарности подстволов с энергией $E \gtrsim p \cdot 10$ ТэВ в центральных стволах ШАЛ, интерпретированная как результат компланарной генерации частиц (КГЧ) именно во фрагментационной области.

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

Идеи, объясняющие это явление, разделяются на две принципиально разные группы: 1) традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий; 2) гипотеза, постулирующая переход размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях от трех к двум измерениям ($3D \leftrightarrow 2D$) [93]. 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

20. Задача «Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»

В рамках эксперимента по исследованию вариаций космических лучей во время гроз теоретически рассмотрен механизм формирования возмущений интенсивности потока мюонов в электрическом поле атмосферы и возможности восстановления характеристик поля по данным о вариациях мюонов. Комплексное исследование вариаций и их применения в геофизических исследованиях проводится с привлечением данных об электрических и магнитных полях, сейсмических данных и данных наблюдений удаленными видеокамерами высотного свечения области над грозовым облаком. В 2022 году получена экспериментальная оценка коэффициента регрессии задержки радиосигналов со спутников GPS, регистрируемой стандартными часами точного времени (GPS170PCI) (L), относительно вариаций интенсивности жёсткой компоненты (N_{μ}).

21. 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»

Нейтрино, благодаря своей проникающей способности, несут уникальную информацию об астрофизических объектах, в которых они генерируются. При пересечении нейтрино космического пространства траектория нейтрино не отклоняется от прямой, и координаты, полученные в нейтринном эксперименте, будут соответствовать истинному положению астрофизических объектов. В рамках существующих моделей генерации космических лучей предполагается, что большие потоки нейтрино высоких энергий могут генерироваться астрофизическими объектами. В качестве потенциальных источников нейтрино рассматриваются известные астрофизические объекты: активные ядра галактик, остатки сверхновых, источники гамма-всплесков, а также, так называемые "скрытые источники" нейтрино [104] – [107]. Существующие модели генерации космических лучей содержат множество неопределенных параметров, поэтому экспериментальные результаты по потокам нейтрино высоких энергий представляют большой интерес для астрофизики.

На БПСТ эксперимент по регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино ведется с 1978 года. В течение 2022 года проводились работы по поддержанию установки в работоспособном состоянии и обеспечению режима непрерывного набора информации. Создан архив экспериментальных данных БПСТ за 2022 год. Проведено изучение нейтринного события из области блазара PKS 0735+17.

1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершенных НИОКР (Задача № 1)

В 2022 году были 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.

С вводом в апреле 2022 года двух новых кластеров рабочий объем Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD достиг значения $\approx 0,4 \text{ км}^3$ в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ). Детектор содержит в своем составе 10 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (2916 оптических модулей) и является крупнейшим нейтринным телескопом Северного полушария. При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018 – 2021 годов, были выделены 11 каскадных событий с энергией свыше 15 ТэВ из-под горизонта, инициированных нейтрино астрофизической природы, что на уровне достоверности 3σ подтверждает результаты первого наблюдения потока астрофизических нейтрино высоких энергий на антарктическом детекторе IceCube (рисунок 1.1).

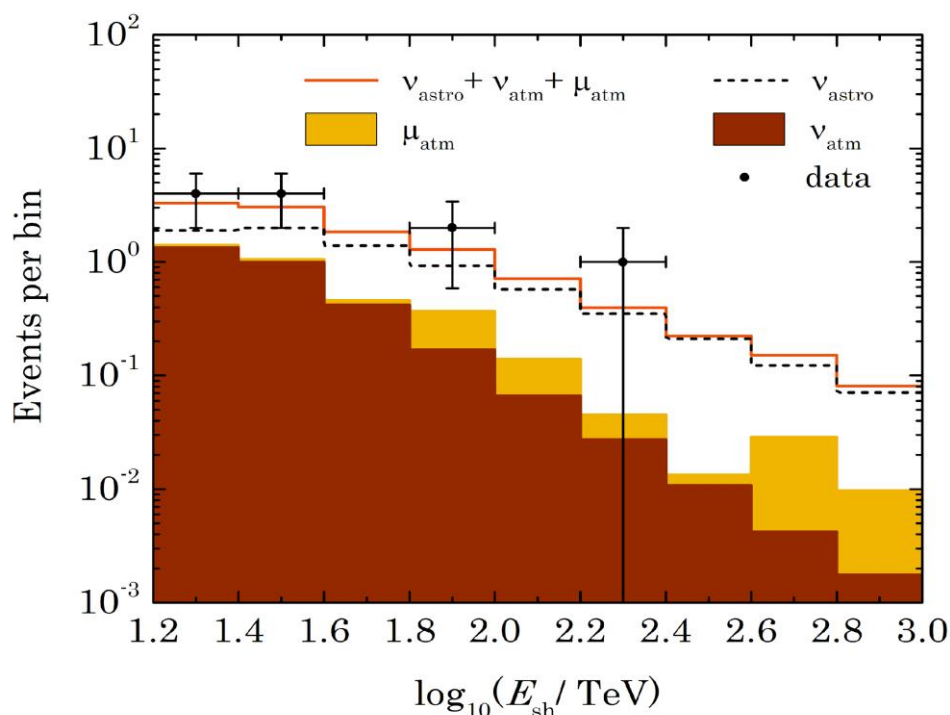


Рисунок 1.1 - Распределения по энергии экспериментальных и теоретически ожидаемых событий в рамках анализа каскадных событий из-под горизонта: экспериментальные события - черные точки; распределение событий ожидаемое от диффузного потока нейтрино астрофизической природы с параметрами, полученными из данных Baikal-GVD за 2018-2021 г.г. - пунктирная гистограмма; фоновые события от атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино - состыкованные желтая и коричневая закрашенные области; суммарное число ожидаемых сигнальных и фоновых событий - оранжевая гистограмма

В 2022 году были получены следующие основные результаты в развертывании и эксплуатации телескопа Baikal-GVD:

- Осуществлен ремонт глубоководной аппаратуры и системы кабельных коммуникаций, установленных ранее кластеров телескопа BAIKAL-GVD. В результате доля работающих каналов телескопа составила 97%, что превышает показатель 2021 года на 1%.
- Произведен монтаж и развертывание 9 и 10 кластеров телескопа.
- Установлена в оз. Байкал и введена в эксплуатацию дополнительная технологическая гирлянда, оснащенная двумя калибровочными лазерными источниками света.
- Выполнена прокладка двух линий гибридного опто-электрического кабеля для связи кластеров с береговым центром управления.
- Проведена модернизация берегового центра управления телескопом. Установлены дополнительные серверы для on-line анализа данных в целях формирования оперативных оповещений о потенциально интересных событиях («алертов»).

Телескоп из 10 кластеров Baikal-GVD (рисунок 1.2) состоит из 80 гирлянд, на каждой из которых размещено 36 оптических модулей (ОМ) на расстоянии 15 м друг от друга по вертикали на глубине от 1275 до 750 м в 4 км от берега озера Байкал.

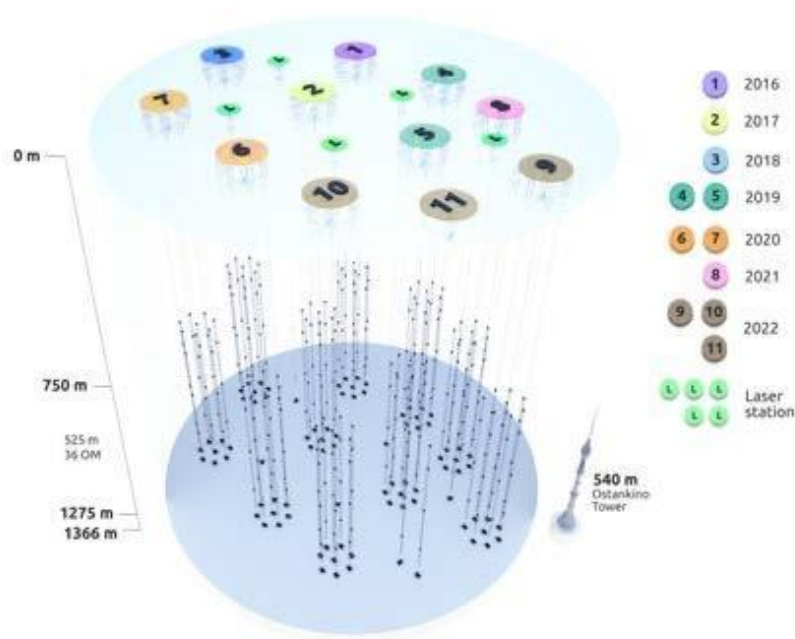


Рисунок 1.2 - Схема действующего в 2022 году Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD с указанием дат установки каждого кластера телескопа и глубин размещения гирлянд оптических модулей

Для обеспечения работ по разворачиванию новых кластеров в 2023 и последующие годы в 2022 году были проведены следующие работы:

- комплектация, производство и испытания 636 оптических модулей;
- комплектация, сборка и испытания электронных модулей для двух кластеров;
- размещение заказов, производство и складирование всей номенклатуры кабельной продукции;
- ремонт и подготовка к экспедиции 2023 года автотранспортной техники и подъемных механизмов;
- строительство наземной трассы для подвода донных кабелей к Береговому центру управления телескопом;
- ремонт и оборудование помещений Байкальского технического стационара в г. Байкальске. В здании №1 оборудована мастерская по производству крупных металлических изделий для телескопа. В помещениях гаража оборудована мастерская по ремонту автотранспортной техники.

В результате выполненных в 2022 году работ рабочий объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино вырос до $\sim 0,4$ 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 2022 года можно будет ожидать регистрации не менее 3-4 нейтрино астрофизической природы в год с точностью определения направления прихода нейтрино при детектировании вторичных ливней 3-4 градуса, в сравнении с 10-15 градусами в IceCube. Байкальский телескоп стал одним из двух мощнейших в мире инструментов исследования астрофизических нейтрино.

2. Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» (Задача № 2)

В течение 2022 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 (с периодом в 3 минуты) 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.

Была разработана программа *in situ* автоматического подбора высоких напряжений фотоумножителей по данным измерений шумов от люминисценции водной среды. Программа была успешно использована определения значений высоких напряжений на кластерах 9, 10 и 11, установленных в зимнюю экспедицию 2022 г.

Система мониторинга характеристик установки, берегового оборудования и качества данных была унифицирована, приведена к международным стандартам и опирается на проверенные промышленные системы Grafana, Prometheus и InfluxDB для хранения, визуализации и сбора информации. Разработана и функционирует система оповещений дежурных и ответственных лиц в случаях аппаратных сбоев.

В таблице 1 приведены данные за 2022 год по работе восьми кластеров телескопа с апреля по декабрь 2022 года. Эффективность рассчитывалась как отношение живого времени экспозиции кластера к полному времени его работы. Периоды отключения режима экспозиции кластеров связаны с профилактическими работами, сбоями работы аппаратуры и программного обеспечения, неблагоприятной атмосферной обстановкой (грозами в акватории установки) Эффективность в 2022 году составила величину более 90%, что превышает показатели 2021 года, благодаря проведенному ремонту и профилактике вышедших из строя оптических и электронных модулей.

Таблица 2.1 – Результаты и эффективность работы кластеров телескопа в 2022 году

Номер кластера	Дата включения	Время работы (дни)	Эффективность (%)	Скорость счета (Гц)	Количество событий
Кластер 1	06.04.22	218	95	66	$1,24 \times 10^9$

Кластер 2	10.04.21	216	95	46	$0,86 \times 10^9$
Кластер 3	03.04.22	228	98	47	$0,91 \times 10^9$
Кластер 4	03.04.22	230	98	46	$0,91 \times 10^9$
Кластер 5	02.04.22	225	96	33	$0,65 \times 10^9$
Кластер 6	06.04.22	225	98	48	$0,93 \times 10^9$
Кластер 7	02.04.22	222	96	51	$0,97 \times 10^9$
Кластер 8	02.04.22	228	97	61	$1,21 \times 10^9$
Кластер 9	07.04.22	222	97	30	$0,58 \times 10^9$
Кластер 10	08.04.22	219	96	31	$0,59 \times 10^9$

В части разработки программного обеспечения введены в эксплуатацию работающие «on line» программы мониторинга состояния систем телескопа, программы автоматического определения координат оптических модулей по данным гидроакустической системы позиционирования, автоматической калибровки по величине регистрируемых сигналов. Продолжены работы по расширению возможностей «off line» обработки данных пакета программ BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software). Проводится регулярный обмен результатами и данными в рамках научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» и международной научной по программе «multi-messenger». Существенный вклад в кооперацию вносит ежемесячный электронный бюллетень, издаваемый Кристианом Шпирингом.

В результате анализа экспериментальных данных 2018, 2019, 2020 и 2021 года с применением дополнительных условий по подавлению фона от атмосферных мюонов выделено в общей сложности 16 ливневых событий с энергией выше 70 ТэВ. Ожидается, что половина этих событий являются кандидатами на события от астрофизических нейтрино. Количество выделенных событий не противоречит ожидаемому числу событий от диффузного потока нейтрино астрофизической природы, зарегистрированного в эксперименте IceCube.

Телескоп из 10 кластеров к настоящему времени второй по объему нейтринный телескоп после IceCube, но обладает существенно лучшим угловым разрешением, чем IceCube ($3-4^\circ$ по сравнению с $13-14^\circ$ 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.

3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD (Задача № 3)

В 2022 году были продолжены работы и получены положительные результаты по компьютерному моделированию регистрации частиц нейтринным телескопом Baikal-GVD методом Монте Карло (МК) в двух основных направлениях:

1) существенно улучшено моделирование атмосферных мюонов (мюонных групп), что было достигнуто путем перехода на обновленную версию программного пакета CORSIKA, устранения некоторых программных ограничений (в частности, на число мюонов в мюонных группах), а также многократного увеличения статистики (числа событий), позволив таким образом значительно улучшить согласие между результатами моделирования и реальными данными;

2) продолжены исследования и насчитаны модельные ситуации с целью наилучшего согласования модельных и экспериментальных данных для случаев однокластерной и многокластерной регистрации нейтрино в режимах каскадов и треков частиц высоких энергий, включая детальное моделирование условий работы установки, реально наблюдавшихся в 2019, 2020 и 2021 гг. В целом результаты моделирования удовлетворяют требованиям для восстановления событий и физических исследований, что открывает путь для углубленного физического анализа данных. Также были проведены предварительные модельные исследования возможностей дальнейшей оптимизации телескопа Baikal-GVD путем изменения межкластерных расстояний и добавления дополнительных (межкластерных) гирлянд.

Физическое моделирование проводилось с использованием обновленного в 2022 году стенда в новом специализированном помещении. 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.

Установленные в состав телескопа в 2022 году девятый и десятый кластеры Baikal-GVD прошли предварительные исследования и долговременные испытания на стенде.

4. Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий (Задача № 4)

За несколько лет развития система обработки данных Байкальского нейтринного телескопа BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software) подверглась значительным усовершенствованиям, диктуемым актуальными задачами астрофизики. Система в 2022 году стала работать в полностью автоматическом режиме. Требуется лишь отслеживать статус обработки сеансов набора данных в специально созданном для этого Телеграмм-канале.

Для скорейшего реагирования на возможные события на других астрофизических установках в рамках многоканальной астрономии и для скорейшего обнаружения ярких интересных событий на собственной установке была разработана подсистема быстрой обработки, которая не дожидается завершения сеанса набора данных, а работает с каждым файлом данных сеанса отдельно. Это позволило сократить задержку между обнаружением астрофизического события и реальным временем его возникновения до нескольких минут, что крайне важно для исследования переменных астрофизических источников. Кроме того, в систему внедрен фильтр самых выдающихся событий, имеющих заметную долю вероятности иметь астрофизическое происхождение. В случае обнаружения таких событий система вырабатывает оповещение со стандартным набором параметров события, таких как энергия, тип, направление прихода события в локальных и галактических координатах, число сработавших каналов, и рассылает его по электронной почте всем заинтересованным участникам эксперимента, а также заносит его в специальную базу данных для последующего автоматического анализа. В автоматическую систему обработки данных внедрена техническая реализация расчета вероятности астрофизического происхождения, среднем темпе счета фоновых событий в год (False Alarm Rate) для каждого оповещения.

Подсистема быстрой обработки также производит мониторинг работы телескопа в режиме близком к реальному времени. Мониторинг телескопа осуществляется как на низком уровне, в котором детектируются изменения в темпах счета шумов и статус триггерной системы, так и на высоком уровне, в котором отслеживаются изменения в регистрации зенитного распределения событий от фонового потока атмосферных мюонов, что позволяет в кратчайшие сроки отреагировать на нештатное поведение модулей телескопа.

В систему обработки внедрен модернизированный алгоритм восстановления треков мюонов, способный примерно в 2 раза больше выделять нейтринных событий и позволяющий работать с мульти-кластерными событиями. Кроме того, были выполнены

оптимизации процедур подавления фоновых событий от атмосферных мюонных групп и светового шума от люминисценции воды оз. Байкал, которые позволяют ускорить восстановление событий от мюонных треков в 10-20 раз.

На данный момент система развернута и тестируется на одном из десяти серверов в ОИЯИ, а во время следующей зимней экспедиции будет перенесена на Береговой центр, чтобы сократить задержку в автоматической обработке данных.

В результате исследований подготовлены экспериментальные наборы событий, содержащие калиброванные сигналы с ФЭУ, необходимые для возможной переобработки событий. А для тех событий, в которых обнаружены сигналы от прохождения частиц текущими версиями методов восстановления событий, определены направление движения частиц и их энергия. Получены первые физические результаты и показано их согласие с результатами моделирования.

С использованием разработанных алгоритмов и программ и разработанными методами выделения нейтринных событий были получены первые наборы событий - кандидатов, имеющих происхождение от атмосферного потока нейтрино.

Для выделения событий от мюонных нейтрино из-под горизонта был использован улучшенный предварительный метод восстановления трековых событий в телескопе, а также разработаны параметрический и непараметрический наборы критериев отделения качественно восстановленных сигнальных событий от фоновых.

Разработанные программы существенно упростили анализ данных для широкого круга участников коллаборации. Кроме того, позволили оперативно отслеживать состояние установки и реагировать на оповещения об интересных событиях других экспериментов (см. раздел 5).

5. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача № 5)

В 2022 г. были продолжены накопление и анализ данных в рамках поиска проявлений темной материи в потоках нейтрино высоких энергий, регистрируемых кластерами телескопа Baikal-GVD. Вероятными источниками потока нейтрино от аннигиляции или распада частиц темной материи типа WIMP рассматриваются центр Галактики, темные сфероидальные карликовые галактики, Солнце или ядро Земли. Методика поиска сигнала по данным ранее действовавшего байкальского нейтринного телескопа NT-200 и полученные ограничения на параметры моделей темной материи взяты за основу анализа данных кластеров телескопа Baikal-GVD. Улучшить методику поиска сигнала от WIMP позволяет измерение энергии ливня при восстановлении физического события на отдельном кластере и наращивание эффективного объема установки в целом.

В течение 2022 г. уточнялись данные по числу фоновых событий в энергетических бинах от 10 ТэВ до 10 ПэВ в зависимости от склонения источника на небесной сфере по сформированной базе данных выделенных ливней. Получено, что для источников Северного полушария уровень фона от атмосферных мюонов превышает ожидаемый нейтринный сигнал. В настоящее время ведется работа по оптимизации сигнал-шум путем моделирования процессов компьютерными средствами. Для источников Южного неба требуется накопление большей статистики данных, и так же более подробная симуляция отклика кластера GVD.

Первые оценки по сформированной базе данных выделенных ливней к нейтринным событиям от аннигиляции/распада частиц темной материи в направлении таких источников, как карликовые сфероидальные галактики (dSphs), слабоизлучающие астрофизические объекты с большой долей темного вещества.

6. Эксперименты с источниками нейтрино и антинейтрино на галлиевой мишени УНУ ГГНТ (Задача № 6)

В рамках работ по повышению чувствительности галлиевого эксперимента к определению параметров рассматривался эксперимент BEST2, аналогичный эксперименту BEST, по облучению интенсивным компактным нейтринным источником на основе изотопа ^{65}Zn модернизированной галлиевой мишени, состоящей из трех зон. Для проверки возможности решения галлиевой аномалии через осцилляционные переходы антинейтрино в нейтрино рассмотрен эксперимент с антинейтринным источником ^{170}Tm .

6.1. Эксперимент BEST2 с источником ^{65}Zn на трехзонной галлиевой мишени

Для повышения чувствительности галлиевого эксперимента к определению параметров рассматривался эксперимент BEST2 с 0,5 МКи нейтринным источником ^{65}Zn на трехзонной галлиевой мишени на базе двухзонной установки эксперимента BEST. Чувствительность к параметру Δm^2 достигается двумя изменениями по сравнению с экспериментом BEST: делением галлиевой мишени число зон на больше двух и использованием источника нейтрино ^{65}Zn вместо ^{51}Cr . В эксперименте BEST2 предполагается увеличение зон до трёх, что оставляет статистику сравнимой с BEST. Замена источника связана с использованием нейтрино больших энергий. Длина осцилляций, т.е. расстояние, определяющее период синусоиды, определяется как

$$L_0 = \frac{\pi}{1.27} \cdot \frac{E}{\Delta m^2} \quad (1)$$

где E - энергия нейтрино,

Δm^2 – осцилляционный параметр - разность квадратов масс.

Максимальные значения Δm^2 , которые могут быть определены в эксперименте, можно оценить из соотношения

$$\Delta m_{\max}^2 \sim \frac{L_0 \cdot \Delta m^2}{\Delta L} \quad (2)$$

где L_0 - длина осцилляций из формулы (1)

ΔL – толщина 1 зоны мишени,

Δm^2 – осцилляционный параметр - разность квадратов масс.

В эксперименте BEST $\Delta L \sim 0,5$ м, поэтому для источника ^{51}Cr ($E = 0,75$ МэВ) $\Delta m_{\text{max}}^2 \sim 4$ эВ², а для источника ^{65}Zn ($E = 1,35$ МэВ) $\Delta m_{\text{max}}^2 \sim 6,5$ эВ², в 1,8 раза больше. Т.е. замена источника расширяет в данном случае диапазон чувствительности эксперимента к параметру Δm^2 .

Полученные в эксперименте BEST ограничения на параметр Δm^2 указывают на то, что длина осцилляций меньше размеров мишеней двухзонной установки. Особенностью эксперимента BEST2, которая позволит определить параметр осцилляций Δm^2 , является увеличение количества зон мишени, находящихся на разных расстояниях от источника, дающих меньшую длину осцилляций нейтрино. Самый простой вариант такого увеличения – это разделить в существующей двухзонной мишени, которая использовалась в BEST, внешнюю цилиндрическую зону на 2 части, имеющие примерно равную толщину Ga. Статистика первой зоны, таким образом останется на уровне BEST, и уменьшится вдвое во второй и в третьей зонах, см. рисунок 6.1.

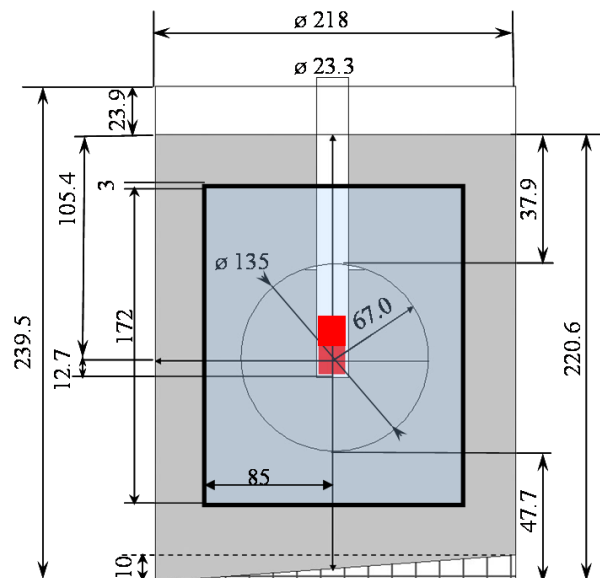


Рисунок 6.1 - Эскиз 3-х зонного эксперимента BEST2 с 0.5 МКи ^{65}Zn источником

На рисунке 6.1 показано: 1 зона - существующая сфера радиусом 67 см, толщина стенки 0,5 см, 2 зона - цилиндр с плоским дном, высота 172 см, радиус 85 см, толщина стенок 3 см, 3 зона - существующий цилиндр с косым дном, высота 215,6 см, радиус 109 см, источник высотой 22 см и радиусом 4,8 см. Длины пробегов в каждой из трёх зон Ga мишени будут составлять примерно 52, 29 и 23 см. Распределение взаимодействий в зонах мишеней без осцилляций в зависимости от расстояния до источника показаны на рисунке 6.2.

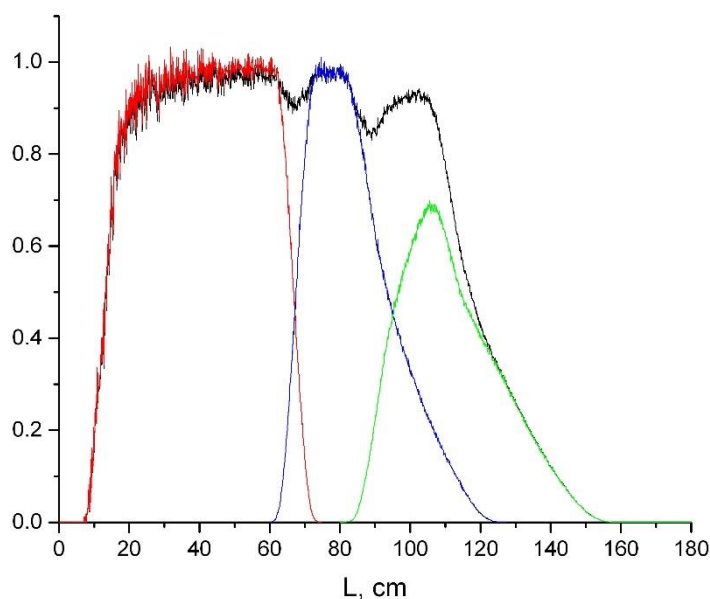


Рисунок 6.2- Распределение взаимодействий в мишенях без осцилляций в зависимости от расстояния до источника. Площадь под кривыми соответствует числу событий в зонах. Красная кривая - в 1 зоне, синяя – во 2 зоне, зеленая – в 3 зоне, черная – во всей мишени

Ожидаемые скорости захвата в каждой зоне в первый день облучения источником нейтрино ^{65}Zn активностью 0,5 МКи составят 15,45 ат/д, 8,46 ат/д и 6,6 ат/д. Если осцилляции в стерильные нейтрино происходят с разницей квадратов масс Δm^2 и параметром смешивания $\sin^2 2\theta$, то ожидаемые скорости в зонах галлиевой мишени будут изменяться, так как показано на рисунке 3 для конкретного случая $\sin^2 2\theta = 0,42$.

Можно заметить, что на участке до $\Delta m^2 \sim 6,5 \text{ эВ}^2$ наблюдается заметная разница в скоростях захвата. Поэтому можно ожидать, что чувствительность эксперимента BEST-2 к параметру Δm^2 будет примерно в этом диапазоне значений. Отношение измеренных скоростей захвата к ожидаемым показано на рисунке 6.3.

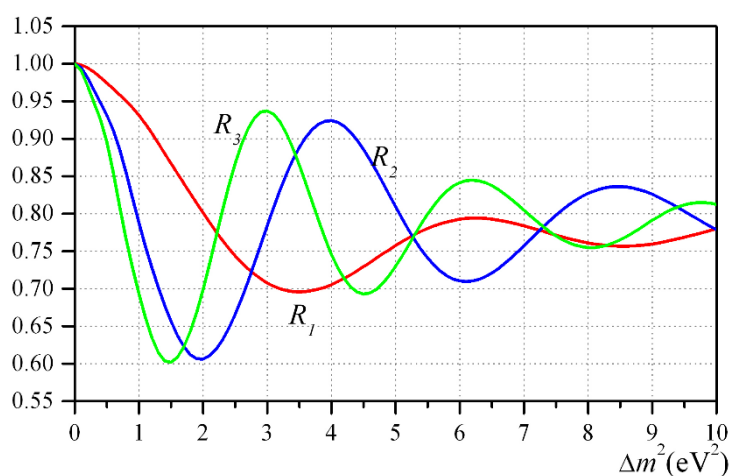


Рисунок 6.3 - Отношение измеренных скоростей захвата к ожидаемым скоростям в зонах мишени R1, R2 и R3 в зависимости от Δm^2 для случая $\sin^2 2\theta = 0,42$

Общее количество образующихся в галлиевых мишенях атомов ^{71}Ge в 10 облучениях источником ^{65}Zn активностью 0,5 МКи при длительности каждого облучения 28 дней в отсутствии осцилляция составит около 2700 захватов, т.е. статистика в эксперименте BEST2 сопоставима со статистикой событий, полученной в эксперименте BEST. Скорость образования ^{71}Ge от Солнца для мишени 1 – 0,16 ат/день, 2- 0,32 ат/день, 3 – 0,44 ат/д. Для оценок принималась скорость захвата солнечных нейтрино 1 захват в сутки в 50 т Ga (66,1 SNU).

Для 10 облучений трех зон мишени источником ^{65}Zn активностью 0,5 МКи с длительностью 28 дней каждое с 1 днем для извлечений между облучениями, при длительности счета каждого извлечения 140 дней ожидаемые статистические неопределенности скоростей захвата составят 4% для мишени 1, 5,5% для мишени 2 и 6,4% для мишени 3. Т.е. ожидаемые статистические неопределенности в измерениях скоростей захвата на уровне статистических неопределенностей полученных в BEST.

6.1.1. Активность источника

Рассматривался источник на основе изотопа ^{65}Zn с минимально возможной активностью 0,5 МКи, обеспечивающей статистику, сравнимую со статистикой эксперимента BEST. ^{65}Zn имеет период полураспада $T_{1/2}=244,1$ сут, излучает нейтрино с энергиями: $E_\nu=1,35$ МэВ (49,3%) и 236 кэВ (50,7%). Для расчетов использовалось сечение захвата нейтрино галлием $\sigma(^{65}\text{Zn}) = 8,776 \cdot 10^{-45} \pm 0,23$ см², сечение захвата для нейтрино с энергией 1,35 МэВ составляет $181,5 \cdot 10^{-46}$ см² и $6 \cdot 10^{-46}$ см² для нейтрино с энергией 236 кэВ [6].

По оценкам работы [7] можно ожидать, что источник ^{65}Zn массой 15-20 кг, который может быть наработан облучением тепловыми нейтронами в ядерном реакторе, будет иметь активность до 0,5 МКи.

Рассмотрим, достаточно ли для эксперимента BEST-2 активности источника 0,5 МКи.

Наши оценки относительно возможностей определения параметров осцилляций, которые производились для 3-х зонной мишени, мы делали, ориентируясь на статистику BEST. Т.е. суммарно из всех зон мишени должно быть извлечено около 2800 атомов ^{71}Ge .

Количество извлекаемого ^{71}Ge определяем по формуле (3) [3]:

$$N(m) = \frac{n_0}{\lambda_1 - \lambda_0} \cdot (e^{-\lambda_0 t_1} - e^{-\lambda_1 t_1}) \cdot \frac{1 - e^{-mB}}{1 - e^{-B}} \quad (3)$$

где n_0 – начальная скорость захвата нейтрино,

$\lambda_1 = \ln 2 / 244,1 \text{ сут}^{-1}$ постоянная распада ^{65}Zn ,

$\lambda_0 = \ln 2 / 11,43 \text{ сут}^{-1}$ – постоянная распада ^{71}Ge ,

t_1 – время одной экспозиции,

t_2 – время между соседними экспозициями,

$B = \lambda_1 \cdot (t_1 + t_2)$,

m – количество экспозиций.

На рисунке 6.4 приведена зависимость числа извлекаемых атомов ^{71}Ge $N(m)$ от числа экспозиций m . Время одной экспозиции принято равным $t_1 = 28 \text{ сут}$; $t_2 = 1 \text{ сут}$. Красная кривая нарисована для значения $n_0 = 31,2$ захвата нейтрино в сутки во всей мишени, что соответствует активности ^{65}Zn 0,5 МКи без учёта осцилляций. После $m=10$ облучений число извлечённых атомов составит 2834, т.е. статистика вполне соответствует статистике BEST. Синяя кривая приведена с учётом осцилляций. Она уменьшена в 0,79 раз, что примерно соответствует результату BEST. Необходимая статистика набирается в этом случае за $m=14$ облучений. При том, что одно облучение длится в течение примерно 1 месяца, эксперимент в целом будет длиться 14 месяцев. С учётом нейтринной линии 237 кэВ набрать нужную статистику можно за $m=13$ облучений.

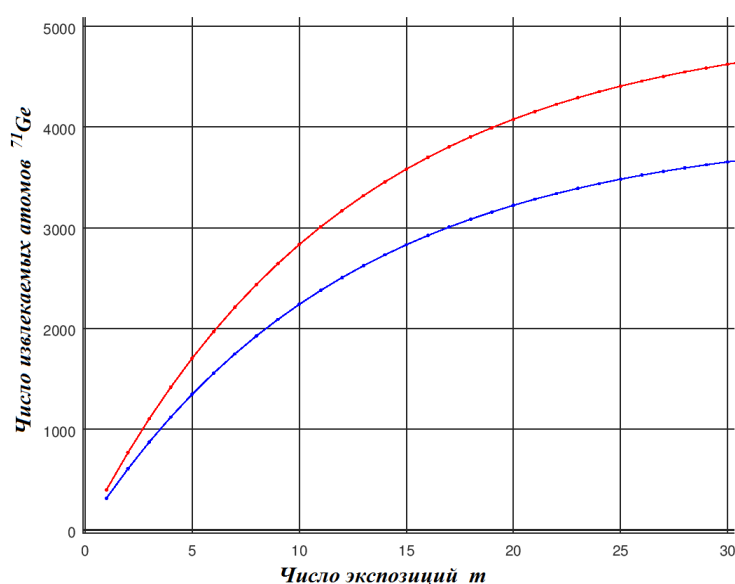


Рисунок 6.4 - Зависимость числа извлекаемых атомов ^{71}Ge от числа экспозиций

Заметим, что после 10 облучений, т.е. через 290 сут, активность источника упадёт до 0,44 от начальной, до 0,22 МКи. По сравнению с хромовым источником, который после 10 облучений в BEST распался до 0,08 от начальной, до 0,27 МКи, т.е. относительный остаток активности цинкового источника будет в 5,5 раза выше. Поэтому дополнительные

облучения цинковым источником дадут статистику чуть меньше половины от первых облучений.

6.1.2. Области чувствительности к параметру Δm^2

Области допустимых значений параметров осцилляций (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) определяются в анализе из неравенства (4)

$$\Delta\chi^2 \geq \chi^2(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) - \chi_0^2 \quad (4)$$

$$\text{где } \chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(R_i^{изм} - R_i^{теор})^2}{\sigma_i^2}$$

$R_i^{теор} = \frac{r_i(\Delta m^2, \sin^2 2\theta)}{r_i^0}$ - отношение ожидаемой скорости захвата нейтрино r_i в зоне мишени i при осцилляциях с параметрами (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) к ожидаемой скорости захвата в отсутствие осцилляций ($\sin^2 2\theta = 0$) r_i^0 ;

$$R_i^{изм} = \frac{r_i^{изм}}{r_i^0}$$

где $r_i^{изм}$ - измеренная скорость захвата в зоне i ;

где r_i^0 - ожидаемая скорость захвата в зоне i ;

σ_i – ошибка (стандартное отклонение) i измерений.

χ_0^2 - минимальное значение функции χ^2 в пределах исследуемой области параметров.

Величина $\Delta\chi^2$, определяющая границы области допустимых значений, задаётся для двух степеней свободы равной 4,61, 5,99 и 9,21 для уровней значимости 90, 95 и 99%.

На рисунке 6.5 приводятся области чувствительности для трёх зонной Ga мишени в эксперименте с источником ^{65}Zn активностью 0,5 МКи.

Границы области чувствительности определяются таким образом, чтобы для каждого значения Δm^2 для больших значений амплитуды $\sin^2 2\theta$ значения Δm^2 могут быть определены с удовлетворительной точностью. Т.е. когда значения Δm^2 не превышают некоторого предельного значения. В нашем случае граничное значение принималось равным 20 эВ². При этом области допустимых значений параметров осцилляций для получаемых скоростей захвата нейтрино либо локализуются в некоторой компактной области в плоскости (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$), либо разделяются на отдельные компактные области с примерно равными амплитудами, но с разными средними значениями $\Delta m^2 \sim \frac{\pi}{1.27} \cdot \frac{E}{L} \cdot k$ с $k=1,2,\dots$

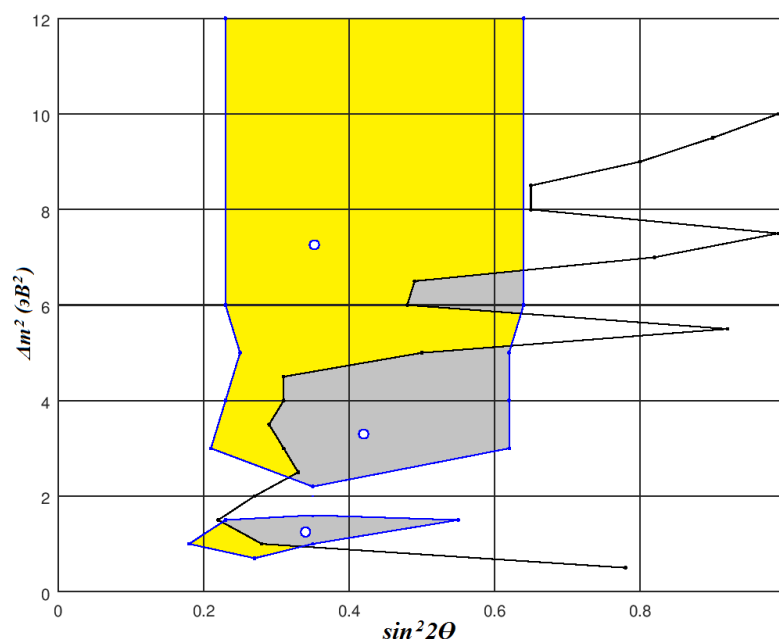


Рисунок 6.5 - Области чувствительности к определению параметра Δm^2 на 3 зонной мишени- серый цвет, область допустимых параметров (90% CL), полученной в эксперименте BEST – желтый цвет

На рисунке 6.5 сравниваются области чувствительности к определению параметра Δm^2 с областью допустимых параметров (90% CL), полученной в эксперименте BEST.

Деление мишени на большее количество зон оказывается чувствительным к наиболее вероятным значениям параметров осцилляций, полученным по результатам эксперимента BEST, которые обозначены белыми точками при значениях $\Delta m^2 = 1,25$ и $3,3 \text{ эВ}^2$ и нечувствительны к значению параметров, полученным по результатам эксперимента Нейтрино-4, $\Delta m^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$.

Рассматриваемый эксперимент BEST2 с искусственным источником нейтрино ^{65}Zn активностью 0,5 МКи будет эффективным инструментом для проверки гипотезы осцилляций в стерильные состояния в области Δm^2 до $\sim 10 \text{ эВ}^2$ с определением параметра Δm^2 в диапазоне $0,5 - 5-6 \text{ эВ}^2$ при амплитудах $\sin^2 2\theta > 0,30$. Чувствительность эксперимента к определению параметров осцилляций возрастает по сравнению с экспериментом BEST использованием источника нейтрино с большей энергией и делением мишени на большее число зон (3 или 4) на разных расстояниях от источника.

В настоящее время эксперимент BEST2 представляется самым чувствительным экспериментом в мире для определения параметра Δm^2 в области диапазона чувствительности. Во многом это связано с отсутствием необходимости определения энергии нейтрино.

6.2. Галлиевый эксперимент с антинейтринным источником ^{170}Tm

Для проверки возможности решения галлиевой аномалии через осцилляционные переходы антинейтрино в нейтрино рассматривался эксперимент по исследованию различия в сечениях взаимодействия нейтрино и антинейтрино на ядрах с использованием искусственного источника антинейтрино большой интенсивности.

Глобальный анализ нейтринных экспериментов в гипотезе 3+1 (нейтрино трёх активных типов и одного стерильного) показывает, что вероятность такой гипотезы оказывается ничтожно малой [5]. Поэтому нельзя исключать, что кроме стерильных нейтрино на результаты экспериментов влияют также другие факторы, связанные с природой нейтрино.

Одним из таких факторов может быть переход нейтрино в свою античастицу, антинейтрино. Такие переходы, которые обусловлены кинематикой майорановских частиц, исследованы в 2β (0ν) экспериментах, имеют исчезающе малую вероятность и не могут влиять на результаты галлиевых экспериментов. Однако если переходы $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ имеют осцилляционную природу, то такие переходы могут вносить свой вклад в галлиевую аномалию.

Эксперименты типа



проводились в 1955-59 гг. группой Р. Девиса на хлорных мишенях ($^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow ^{37}_{18}\text{Ar}$), которые облучались антинейтрино от ядерных реакторов в Брукхейвене и Саванна-Ривер [9-12]. Вероятности переходов $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$ получались как отношение измеренного в эксперименте сечения реакции (5) $\sigma_{\text{эксп}}$ и теоретического сечения $\sigma_{\text{теор}}$ такого процесса при условии тождественного равенства нейтрино и антинейтрино ($\nu_e \equiv \bar{\nu}_e$):

$$\alpha^2 = \frac{\sigma_{\text{эксп}}}{\sigma_{\text{теор}}} \quad (6)$$

где α - отношение сечений взаимодействия с веществом антинейтрино и нейтрино.

$\sigma_{\text{эксп}}$ - сечения реакции измеренное в эксперименте,

$\sigma_{\text{теор}}$ - теоретическое сечение.

Величина α характеризует перекрытие состояний нейтрино и антинейтрино [13]. Полученное в экспериментах Девиса ограничение на вероятность перехода $\bar{\nu}_e$ в ν_e равно $\alpha^2 < 0,06$ на уровне значимости 68%: при теоретическом значении $\sigma_{\text{теор}} = 4,1 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$ [14] полученное ограничение на сечение $\sigma_{\text{эксп}} < 0,25 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$ [12,13].

Эксперименты по поиску нейтрино-антинейтринных переходов производились также на ускорителях, когда в пучках нейтрино и антинейтрино после взаимодействия с мишенью рождались электроны или позитроны. В таких экспериментах ограничение на вероятности переходов составило $\alpha^2 < 0,03$ [15].

Предположение о переходах нейтрино-антинейтрино, вообще говоря, вступает в противоречие с результатами экспериментов Bogexino [16] и KamLand [17], которые не обнаружили электронных антинейтрино в потоке борных нейтрино от Солнца. Возможно, это связано с тем, что солнечные нейтрино доходят до Земли расцепившимися, когда когерентное взаимодействие между отдельными массовыми состояниями прекращается [18], в отличие от нейтрино от искусственных источников.

Вероятности переходов нейтрино в антинейтрино от распадов ^8B в Солнце, энергия которых выше порога регистрации антинейтрино от реакции $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$ (1.8 МэВ), по данным Bogexino, не превышает $1,3 \cdot 10^{-4}$, а по данным KamLand $5,3 \cdot 10^{-5}$ на 90% уровне значимости.

Рассмотрена возможность проведения эксперимента на 50 тонной галлиевой мишени ГГНТ с искусственным источником антинейтрино ^{170}Tm . В эксперименте с источником минимально возможной для изготовления активностью ~ 1 МКи 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, во-первых, как указывалось выше, на расстояниях между источником и детектором $L \sim 1\text{м}$ можно ожидать, что декогеренции нейтрино не происходит, и, во-вторых, результаты галлиевых измерений являются модельно независимыми в отличие от экспериментов Bogexino и KamLand, в которых спектры фонов определяются косвенными методами. Предлагаемый эксперимент направлен, в том числе, на выявление дираковской природы нейтрино.

6.2.1. Измерения

Эксперимент будет проводиться на ГГНТ. Мишень в новом эксперименте состоит из 50 т жидкого металлического галлия, размещённого в цилиндрическом объёме, по центру которого проходит труба, в которую помещается источник антинейтрино. Цилиндрический объём и труба для источника использовались в эксперименте BEST, их

изменений и модернизации для нового эксперимента не требуется. Так же, как и системы перемещения источника между защитами калориметра и измерения фотонного спектра от источника и галлиевой мишенью.

Галлиевые измерения проводятся по радиохимической схеме с измерением количества захватов нейтрино на ядрах: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$. Образующиеся атомы ${}^{71}\text{Ge}$ извлекаются из галлиевой мишени, помещаются в пропорциональный счётчик, в котором их количество определяется по количеству их распадов. Для уменьшения систематических ошибок будут производиться несколько облучений галлия антинейтринным источником. Для счёта извлекаемого после каждого облучения ${}^{71}\text{Ge}$ будет использоваться отдельный пропорциональный счётчик.

Поскольку антинейтрино не взаимодействуют с галлием, то, в отличие от предыдущих галлиевых экспериментов с источниками, эксперимент с антинейтринным источником будет экспериментом типа на появление нейтрино в потоке антинейтрино от источника. Т.е. скорость счёта будет сравниваться со скоростью счёта фона. Фоновые события определяются взаимодействием на галлии солнечных нейтрино и нейтрино от небольшой фракции распадов ${}^{170}\text{Tm}$ по ЕС каналу. Скорость захвата солнечных нейтрино на галлии измерялась в эксперименте SAGE с 1990 по 2018 год и известна с точностью около 5% ($66,1 \pm 3,1$ SNU) [19].

6.2.2. Источник

Для того, чтобы источник антинейтрино можно было использовать в эксперименте, он должен обладать рядом определённых характеристик: возможность его изготовления в условиях современных технологий, возможность безопасной работы с ним, образующиеся антинейтрино должны иметь энергию выше порога реакции захвата на галлии. Удобным источником, удовлетворяющим данным требованиям, является ${}^{170}\text{Tm}$. Его схема распада приведена на рисунке 6.6.

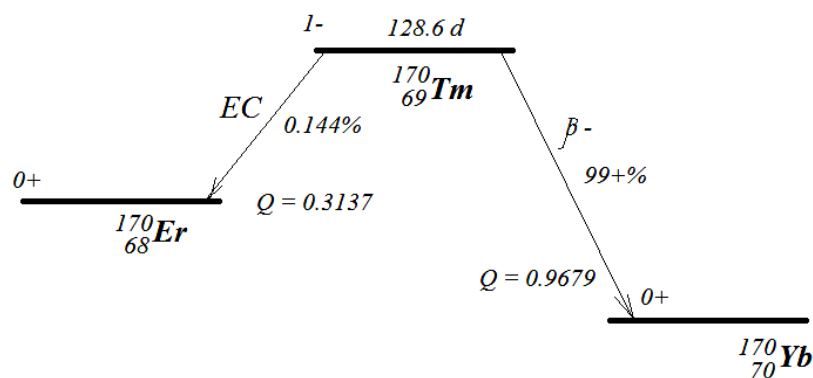


Рисунок 6.6 - Схема распада ${}^{170}\text{Tm}$

Изотоп ^{170}Tm имеет 2 моды распада (период полураспада $T_{1/2}=128,6$ сут):

- $^{170}_{69}\text{Tm}$ (β^- , $\bar{\nu}_e$) $^{170}_{70}\text{Yb}$ (стаб.), в 99,9% распадов, $Q=0,968$ МэВ
- $^{170}_{69}\text{Tm}$ (ЕС, ν_e) $^{170}_{68}\text{Er}$ (стаб.), в 0,144% распадов, $Q=0,314$ МэВ

Средняя по спектру энергия антинейтрино примерно равна энергии нейтрино от хромового источника (750 кэВ) [20]. Энергия нейтрино в ЕС моде примерно равна средней энергии от pp нейтрино от Солнца.

Фотоны образуются с энергией 84 кэВ в 3,3% распадов, т.е. энергия фотонов мала и мал также их выход. Поэтому специальной защиты персонала от фотонного излучения не требуется.

Источник выделяет большое количество тепла, в основном, через испускание электронов со средней энергией 333 кэВ. Тепловыделение составляет около 2 кВт/МКи. Поэтому для источника активностью 1 МКи потребуется отвод тепла около 2 кВт, в три раза больше, чем для хромового источника в эксперименте BEST.

6.2.3. Нарботка ^{170}Tm в ядерном реакторе

Источник ^{170}Tm может быть создан облучением ^{169}Tm тепловыми нейтронами в ядерном реакторе: $^{169}\text{Tm} (n, \gamma) ^{170}\text{Tm}$. Содержание ^{169}Tm в природном тулии 100 %, т.е. обогащение материала перед облучением в реакторе не потребуется.

Сечение захвата тепловых нейтронов тулием равно $\sigma(^{169}\text{Tm}) = \sigma_0 = 105 \text{ б}$ [21]. Образующийся ^{170}Tm также захватывает тепловые нейтроны: $^{170}\text{Tm} (n, \gamma) ^{171}\text{Tm}$ с сечением $\sigma(^{170}\text{Tm}) = \sigma_1 = 92 \text{ б}$, и при длительном облучении количество образующегося ^{171}Tm может быть заметным. Изотоп ^{171}Tm распадается только одним способом: $^{171}_{69}\text{Tm} (\beta^-, \bar{\nu}_e) ^{171}_{70}\text{Yb}$ (стаб.), $Q=96$ кэВ, $T_{1/2}=1,92$ г. В его распадах образуются фотоны с энергией 67 кэВ в 0,14% распадов. Т.о. проблемы с облучением персонала могут быть не от тулия, а только от примесей.

Выгорание ^{170}Tm уменьшает его количество в реакторе примерно на 20% (в максимуме, при облучениях больше 200-250 сут). На рисунке 6.7 приведена кривая наработки ^{170}Tm с учётом выгорания для 1 кг ^{169}Tm в потоке тепловых нейтронов $\Phi=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, который использовался для наработки хромового источника в эксперименте BEST. Кривая описывается формулой (7)

$$n(t) = \frac{\Phi \cdot \sigma_0 \cdot N_0}{\lambda_1 + \Phi \cdot (\sigma_1 - \sigma_0)} \cdot (e^{-\Phi \sigma_0 t} - e^{-(\lambda_1 + \Phi \cdot \sigma_1)t}) \quad (7)$$

где N_0 – начальное количество ^{169}Tm в реакторе;

λ_1 – постоянная распада ^{170}Tm .

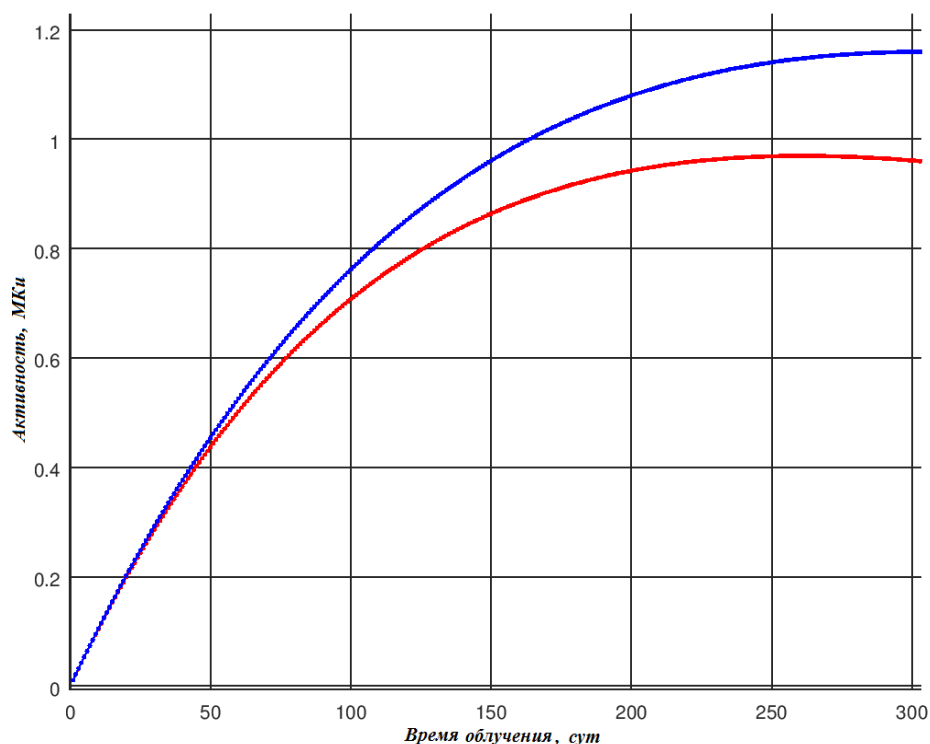


Рисунок 6.7 - Нарботка ^{170}Tm в ядерном реакторе с потоком нейтронов $\Phi=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ из 1 кг ^{169}Tm . Верхняя (синяя) кривая дана без учёта выгорания ^{170}Tm , красная – с учетом выгорания

За время облучения в реакторе в течение 100 сут. может быть наработана активность ^{170}Tm 0,7 МКи (без учёта выгорания ^{170}Tm на 7% больше). Т.о. источник активностью 1 МКи можно получить облучением 1,2 кг ^{169}Tm в потоке тепловых нейтронов в ядерном реакторе $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в течение 100 суток

6.2.4. Облучение галлиевой мишени

Средняя энергия по спектру антинейтрино от источника ^{170}Tm с учётом квадратичного по энергии изменения сечения захвата нейтрино ядрами ^{71}Ga равна примерно 750 кэВ, т.е. энергии нейтрино от источника ^{51}Cr , который использовался в эксперименте BEST. Поскольку в новом эксперименте геометрия измерений, т.е. относительное расположение источника и галлиевой мишени, будет такой же, как в эксперименте BEST, то эффективности нового эксперимента будут примерно равны эффективностям BEST. Будем считать, что число облучений равно $m = 10$. Каждое облучение будет длиться время t_1 . После каждого облучения в течение времени $t_2 = 1$ сут будет проводиться извлечение атомов образующегося ^{71}Ge , а также будет измеряться активность источника. Поскольку новый эксперимент будет экспериментом «на появление», то оптимальное время облучения будем оценивать по тому, при каком

значении t_1 мы будем иметь максимальное отличие числа зарегистрированных событий от источника от числа фоновых событий, т.е. числа событий от солнечных нейтрино.

Используя данные по времени жизни ^{170}Tm , оцениваем оптимальное время облучения галлиевой мишени t_1 .

На рисунке 6.8 приводится зависимость суммарного количества образуемых атомов ^{71}Ge (N) от числа облучений (ранов) m . Каждое облучение длится $t_1=29$ сут с перерывом на извлечение длительностью $t_2=1$ сут. Для удобства считаем, что в начале первого облучения в мишени образуется $\nu_0=1$ атом ^{71}Ge . Кривая построена по формуле (8) [22]

$$N(m) = \frac{\nu_0}{\lambda_1 - \lambda_0} \cdot e^{\lambda_1(t_1+t_2)} \cdot (e^{-\lambda_0 t_1} - e^{-\lambda_1 t_1}) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_1(t_1+t_2) \cdot m}}{1 - e^{-\lambda_1(t_1+t_2)}} \quad (8)$$

где $\lambda_0 = \frac{\ln 2}{11.43 \text{ сут}}$ – постоянная распада ^{71}Ge ,

$\lambda_1 = \frac{\ln 2}{128.6 \text{ сут}}$ – постоянная распада ^{170}Tm

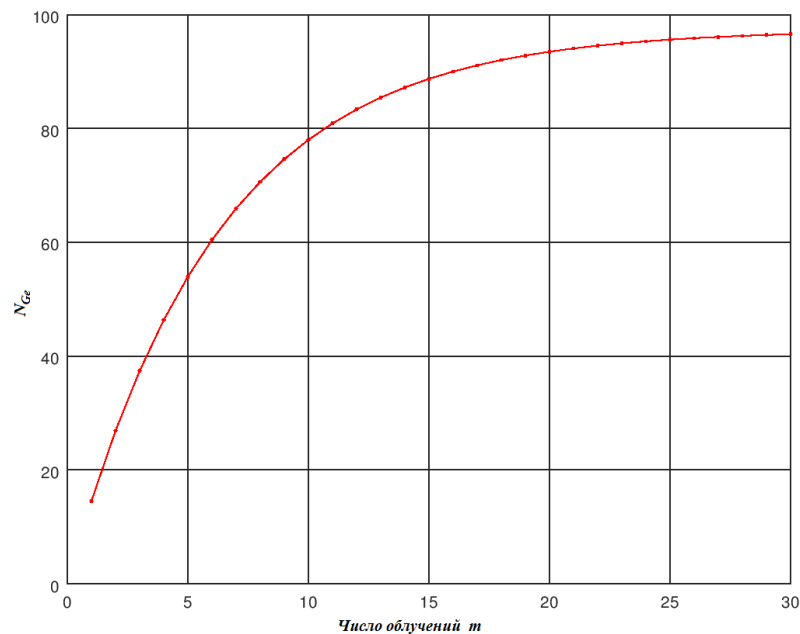


Рисунок 6.8 - Число захватов антинейтрино в Ga мишени в зависимости от числа облучений

Из представленного рисунка видно, что уже через $m=10$ облучений образуется 80% атомов ^{71}Ge .

Теперь определимся с оптимальным временем облучения t_1 . На рисунке 6.9 приведена кривая зависимости суммарного по всем облучениям числа захватов от времени одного облучения t_1 . Считаем, что количество облучений $m=10$.

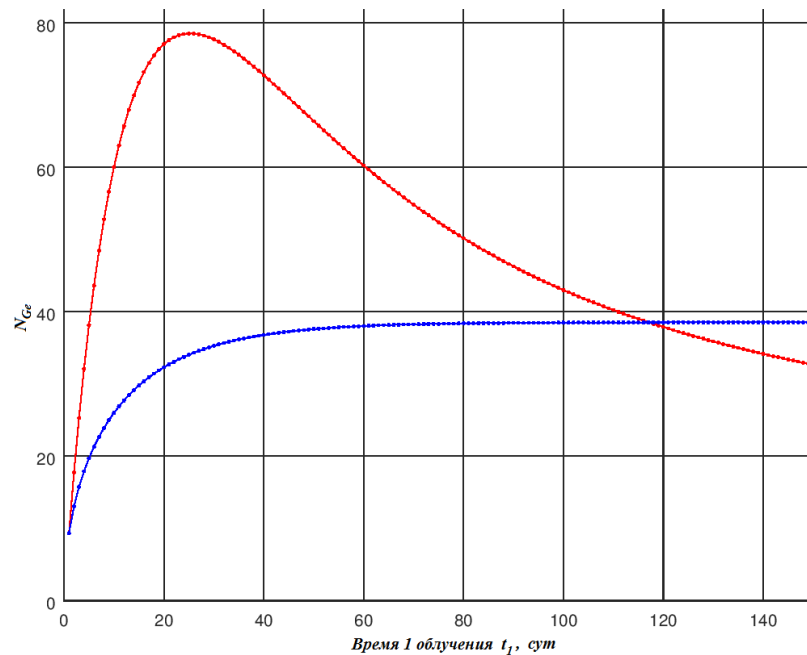


Рисунок 6.9 - Зависимость числа атомов ^{71}Ge от захватов антинейтрино в Ga мишени от времени одного облучения (красная кривая). Синяя кривая – ошибка измерения захватов солнечных нейтрино (3σ)

Кривая построена по формуле (8), в которой фиксируем значение $m=10$ и делаем переменным значение t_1 . На этом же рисунке приведена зависимость ошибки числа атомов ^{71}Ge от захватов нейтрино от Солнца от времени одного облучения:

$$N_C(t_1) = 3 \cdot \sigma_C = 3 \cdot \sqrt{\frac{r_C}{\lambda_0} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 t_1}) \cdot m}.$$

Максимальное число атомов ^{71}Ge от захватов от антинейтрино от ^{170}Tm можно ожидать при времени одного облучения $t_1=25$ сут ($N=78,5$).

Из зависимости отношения числа атомов ^{71}Ge от захватов антинейтрино к ошибке измерений захватов солнечных нейтрино от времени облучения t_1 (т.е. отношение значений красной и синей кривых на рисунке 6.9) получаем, что максимальное отношение 2,41 приходится на значение $t_1=16$ сут. Отметим, что измеренная скорость захватов от солнечных нейтрино для 50 т Ga равна 1 сут^{-1} ; и ровно такую же скорость захватов мы допускаем для антинейтрино в начале первого облучения. Заметим, что другие значения скоростей захватов не изменят формы кривых на рисунке 6.9, а лишь приведут к изменению вертикального масштаба.

6.2.5. Возможные результаты по измерениям сечений

В стандартной модели нейтринных взаимодействий электронные антинейтрино не взаимодействуют с ^{71}Ga , превращая его в ^{71}Ge . Поэтому, если в эксперименте с облучением туллийевым источником галлиевой мишени будут обнаружены атомы ^{71}Ge , это будет указывать на существование «новой физики».

В измерениях может быть определено (или получено ограничение) сечение захвата антинейтрино ядрами ^{71}Ga с их переходом в ^{71}Ge или, по-другому, вероятность перехода электронного антинейтрино в нейтрино в заданных условиях.

В работе [23] скорость образования атомов ^{71}Ge в галлиевой мишени (production rate) связана с активностью источника следующим образом

$$p = A \cdot D \cdot \langle L \rangle \cdot \sigma \quad (9)$$

где A – активность источника,

D – плотность атомов в мишени,

$\langle L \rangle$ – средний пробег нейтрино в мишени,

σ – сечение захвата нейтрино на галлии.

Зная активность источника A и измеряя скорость образования ^{71}Ge в мишени p , измеряем сечение захвата антинейтрино $\sigma = \frac{p}{A \cdot D \cdot \langle L \rangle}$. Или, записывая по-другому

скорость захвата: $p = p_0 \cdot \alpha$, где p_0 – скорость захвата нейтрино с известным сечением из стандартной модели, определяем вероятность перехода антинейтрино в нейтрино

$$\alpha = \frac{p}{A \cdot D \cdot \langle L \rangle \cdot \sigma}.$$

Оценим, какие значения сечений можно увидеть в эксперименте.

Оптимальное значение длительности одного облучения галлиевой мишени источником ^{170}Tm , приходится на значение $t_1=16$ сут. Для начальной скорости захвата антинейтрино $v_0=1$ сут $^{-1}$ суммарное число событий в 10 облучениях будет равно 73,2. Неопределённость захватов от солнечных нейтрино при этом будет равна 30. Считая, что сигнал от источника будет виден в случае, если его интенсивность превысит неопределённость от Солнца, получаем минимальную начальную скорость захватов от источника $v=v_0 \cdot 30/73,2 = 0,41$ сут $^{-1}$.

Для источника активностью 1 МКи в 50 т галлиевой мишени образование 0,41 атома ^{71}Ge в сутки будет в 100 раз ($130/3/0,41$) меньше, чем от источника ^{51}Cr . Здесь учтено, что активность туллиевого источника в 3 раза ниже, чем хромового источника в эксперименте

BEST. Т.е. для источника активностью 1 МКи может быть измерено сечение захвата антинейтрино, если оно будет больше, чем $\sigma \approx \sigma_0 \times 1/100 = 5,4 \cdot 10^{-47} \text{ см}^2$. Здесь $\sigma_0 = 5,81 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$ – сечение захвата нейтрино от ^{51}Cr [24].

Соответственно, величина α может быть измерена с точностью 3σ в случае, если она превышает $1/100$.

В предлагаемых измерениях предельное значение величины α обратно пропорционально активности источника.

6.2.6. Плотности туллия

Плотности туллия в металлической форме и в форме оксида различаются всего на 13%, поэтому форму облучения в реакторе можно выбирать по механическим свойствам материалов. Например, температура плавления оксида туллия на 800° выше, чем металлического туллия. Поэтому, возможно, использование в реакторе оксида является более предпочтительным.

В трубу для источника туллиевый источник может быть помещён без толстой вольфрамовой защиты. Вместо 3 см вольфрама можно без ущерба для дозиметрии использовать 1 см. Тогда активная часть источника может быть цилиндрической с размерами: $R=6 \text{ см}$ и $h=12 \text{ см}$. Её объём составит 1,36 л, куда поместится туллий в форме оксида массой 11 кг. И максимальная активность туллия в источнике при его облучении в реакторе в течение 100 сут может быть до 7,7 МКи.

Для такой максимальной активности может быть измерено значение величины α до значения $(1/100) \times (1 \text{ МКи}/7,7 \text{ МКи}) = 1,3 \cdot 10^{-3}$.

В эксперименте по облучению 50 т галлиевой мишени ГГНТ источником ^{170}Tm может быть проверена возможность решения галлиевой аномалии через осцилляционные переходы антинейтрино в нейтрино на базе $\sim 1 \text{ м}$. Положительный результат эксперимента будет свидетельствовать о дираковской природе нейтрино. В отличие от экспериментов на больших сцинтилляционных детекторах по поиску антинейтрино от Солнца, в которых фоновые спектры определяются косвенными методами, в эксперименте на галлиевой мишени все процедуры проверены прямыми экспериментальными методами.

Вероятность перехода электронных антинейтрино в нейтрино обратно пропорциональна активности и для источника активностью 1 МКи будет проверена на уровне $\alpha \sim 10^{-2}$.

Для измерений будут использоваться существующие системы облучения галлия, извлечения образующегося ^{71}Ge и счёта его распадов, которые использовались в экспериментах SAGE и BEST.

Предполагаемое количество облучений галлия будет $m = 10$; время каждого облучения $t_1 = 16$ суток с перерывом на технические операции извлечения и измерения активности $t_2 = 1$ сут. Количество необходимых пропорциональных счётчиков равно числу облучений m . Каждый счётчик будет измеряться в своём канале счёта в течение 5 месяцев, как принято для солнечных нейтринных измерений. Т.о. облучения галлиевой мишени завершатся через 170 сут, когда активность источника упадёт на 74 %, до 0,3 МКи при начальной активности 1 МКи.

7. Проведение физических измерений на полутонном прототипе ББНТ (Задача № 7)

В отчетном периоде на полутонном прототипе сцинтилляционного детектора были выполнены измерения энергетического отклика детектора и потока мюонов в месте его расположения.

Полутонный прототип Баксанского большого нейтринного телескопа располагается в лаборатории галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) на глубине 4550 м.в.э. Конструкция прототипа включает в себя две зоны. Центральная зона, служащая мишенью для нейтрино, представляет собой акриловую сферу с внутренним радиусом 48 см, заполненную сверхчистым жидким сцинтиллятором. Окружающая сцинтилляционную мишень внешняя зона заполнена ультрачистой водой, которая служит для защиты от внешней радиоактивности. Модель реального детектора приведена на рисунке 7.1.

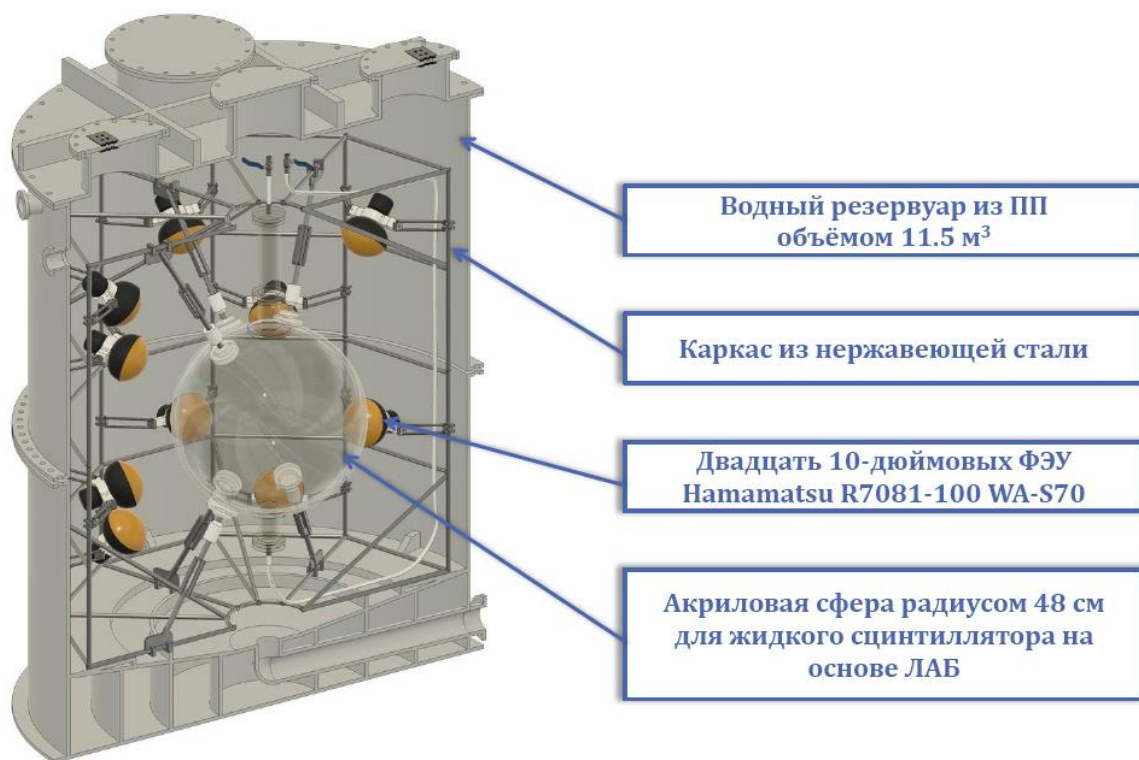


Рисунок 7.1 - Модель реального детектора полутонного прототипа

В качестве растворителя для сцинтиллятора выступает примерно 400 кг линейного алкилбензола (ЛАБ), очищенного от радиоактивных и прочих примесей [25]. В качестве первичной сцинтилляционной добавки используется РРО с концентрацией 2 г/л. Для согласования спектра высвечивания сцинтиллятора и спектра пропускания оргстекла используется спектросмещающая добавка bis-M8B с концентрацией 10 мг/л. Сцинтилляционная мишень просматривается двадцатью 10-дюймовыми

фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) Hamamatsu R7081-100 WA-S70 [26] с высокой квантовой эффективностью около 35% в диапазоне длин волн 360–430 нм. ФЭУ размещены в четыре уровня по пять штук в шахматном порядке в вершинах правильного пятиугольника. Расстояние от сферы до экватора ФЭУ составляет около 25 см. Акриловая сфера и ФЭУ смонтированы на раме из нержавеющей стали, которая находится в заполненном водой цилиндрическом полипропиленовом баке объёмом 11,5 м³. При этом все материалы детектора подбирались с учётом их радиоактивного фона, который измерялся в низкофоновой лаборатории глубокого заложения БНО ИЯИ РАН с помощью германиевого полупроводникового детектора. Толщина водного слоя в районе экватора акриловой сферы составляет не менее 70 см. Вода подается через систему очистки и хранения воды в лаборатории, включающую освещение, обезжелезивание, дехлорирование, умягчение, обеззараживание и аэрацию.

7.1. Энергетический отклик детектора

Для определения энергии регистрируемых детектором частиц была произведена калибровка энергетического отклика детектора. Калибровка детектора производилась путём набора зарядовых спектров импульсов при облучении сцинтилляционной мишени радиоактивными источниками ¹⁰⁹Cd, ²²Na, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co. Данные радиоактивные источники, выполненные в виде таблеток диаметром 25 мм и толщиной 3 мм, с помощью контейнера цилиндрической формы из оргстекла помещались в центр сцинтилляционной мишени. Контейнер с помощью циркониевой трубки крепился к заглушке верхнего патрубка. Толщина стенок акрилового контейнера составляет от 11 до 24 мм. Таким образом, β-частицы с энергией менее 2,6 МэВ, рождаемые в результате радиоактивных распадов, не вылетают за пределы контейнера.

Единственным каналом распада радиоизотопа ¹⁰⁹Cd является электронный захват, в результате которого образуется изомер серебра-109 ¹⁰⁹Ag^m, а затем при переходе ¹⁰⁹Ag^m в основное состояние испускается γ-квант с энергией 88,04 кэВ.

В 94,4% случаев β-распад радиоизотопа ¹³⁷Cs происходит с промежуточным образованием ядерного изомера бария-137 ¹³⁷Ba^m, который в свою очередь в 84,99% переходит в основное состояние с испусканием γ-кванта с энергией 661,7 кэВ.

Радиоизотоп ²²Na имеет два основных канала распада, β⁺-распад (90,3%) и электронный захват (9,64%). В обоих случаях образуется ²²Ne в возбуждённом состоянии, при переходе которого в основное состояние излучается γ-квант с энергией 1274,5 кэВ. При этом образованный при β⁺-распаде позитрон мгновенно аннигилирует в толще акрилового контейнера и образует два разнонаправленных γ-кванта с энергией 511 кэВ. Таким образом, ²²Na, помимо γ-линии 1274,5 кэВ, может иметь линии 511, 1022, 1784,5 и 2296,5 кэВ.

При β -распаде радиоизотопа ^{60}Co образуется ^{60}Ni в одном из трёх возбуждённых состояний. Однако почти в 100% случаев происходит цепочка переходов с образованием γ -квантов с энергиями 1173,2 и 1332,5 кэВ, задержка между которыми составляет менее 1 пс.

Наконец, ^{133}Ba почти всегда претерпевает электронный захват с образованием ^{133}Cs в одном из четырёх возбуждённых состояний. Таким образом, ^{133}Ba имеет 9 гамма-линий, однако наиболее значимыми из них являются линии 356,01 (62,05%), 81 (33,3%) и 302,85 (18,3%) кэВ. Помимо этого, в 20,5% случаев возможна одновременная регистрация двух γ -квантов, задержка между которыми составляет 6,283 нс, с суммарной энергией 437,01 кэВ.

Активность имеющихся радиоактивных источников на момент измерений значительно превышала темп счёта фоновых событий и составляла не менее 20 кБк (для ^{22}Na). На рисунке 7.2 изображены зарядовые спектры суммарного сигнала детектора при облучении мишени ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{60}Co .

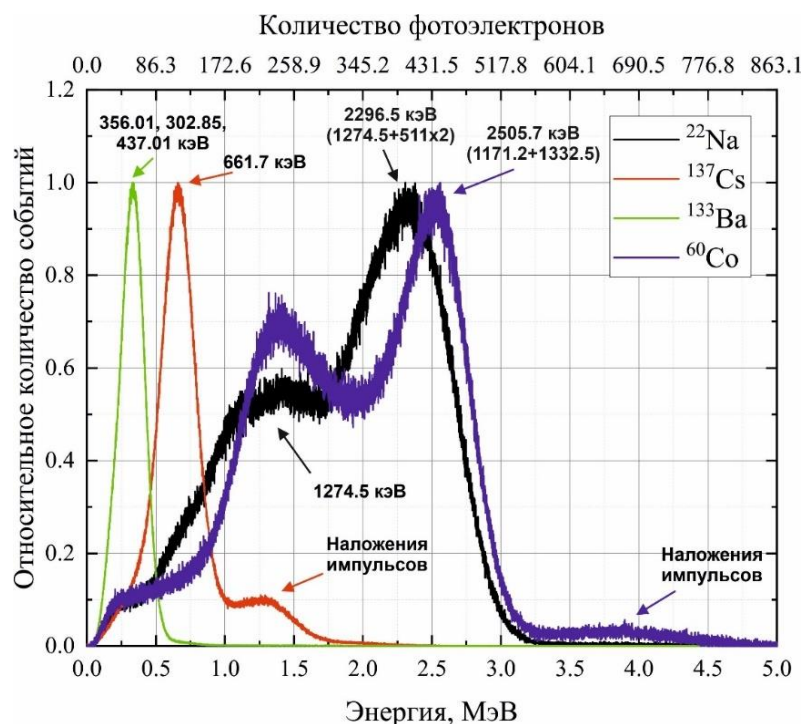


Рисунок 7.2 - Зарядовые спектры суммарного сигнала детектора при облучении

Согласно полученным результатам, для ^{137}Cs и ^{60}Co наблюдаются явные пики от наложенных событий, что связано с относительно высокой активностью данных радиоактивных источников, 805 и 319 кБк соответственно.

Отклик детектора на облучение сцинтилляционной мишени радиоизотопом ^{109}Cd не наблюдался. Таким образом, γ -квант от распада ^{133}Ba с энергией 81 кэВ так же не регистрируется детектором, а из-за недостаточного разрешения детектора γ -линии 356,01, 302,85 и 437,01 кэВ от ^{133}Ba сливаются в одну.

Ввиду геометрии мишени и расположения радиоактивного источника для ^{22}Na оба γ -кванта от e^+ всегда поглощаются сцинтилляционной мишенью, таким образом, наблюдаются только γ -линии 1274,5 и 2296,5 кэВ. По этой же причине, отклик детектора на ^{60}Co является суммарным откликом на γ -кванты с энергиями 1173,2 и 1332,5 кэВ.

Также для относительно высокоэнергичных γ -квантов с энергиями 1173,2, 1274,5 и 1332,5 кэВ от ^{60}Co и ^{22}Na наблюдаются эффект комптоновского рассеяния с максимальными энергиями потерь 963,4, 1061,7 и 1118,1 кэВ соответственно. Наличие данного эффекта и испускание радиоисточником ^{60}Co практически одновременно сразу двух высокоэнергичных γ -квантов негативно сказывается на прогнозируемости формы спектра при облучении сцинтилляционной мишени из её центра.

Исходя из полученных результатов измерений энергетический отклик детектора составляет 172,6 фотоэлектронов на МэВ.

7.2. Измерение потока мюонов

Одним из источников фона для сцинтилляционных детекторов являются мюоны, рождаемые в атмосфере под воздействием космических лучей. Ионизационные потери мюона при его прохождении через органический сцинтиллятор составляют 2 МэВ/г/см². Таким образом, учитывая размеры детектора, при прохождении мюона через мишень детектора выделяется энергия значительно превосходящая ту, на которую нацелен детектор. Более того, при уровне засветки, рождаемой сцинтиллятором при прохождении мюона, на ФЭУ образуются большое количество послеимпульсов, которые даже при наличии системы совпадения могут вызывать ложное срабатывание триггера.

Для регистрации мюонных событий с помощью полутонного прототипа ББНТ порог всех дискриминаторов системы регистрации был установлен на максимально возможный уровень. Схема совпадения была настроена таким образом, чтобы триггер в пределах временных ворот, которые составили 40 нс, вырабатывался только при преодолении сигналом установленного порога по всем каналам. Время экспозиции составило 2 724,25 ч, всего было зафиксировано и записано более 35 000 событий. На рисунке 7.3 изображён энергетический спектр зарегистрированных событий.

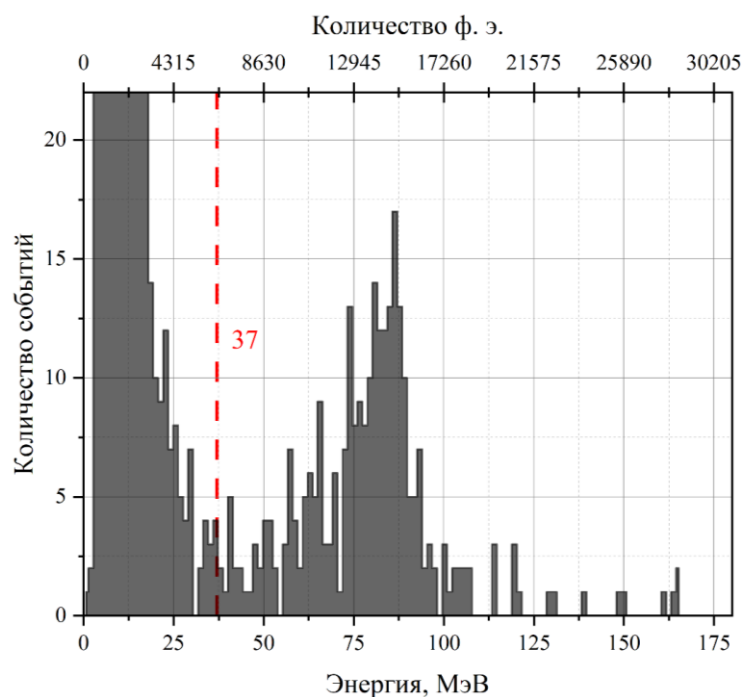


Рисунок 7.3 - Энергетический спектр зарегистрированных событий

На полученном спектре наблюдается явный мюонный пик. Форма распределения ионизационных потерь мюонов, прошедших через сферическую сцинтилляционную мишень, в данном случае обусловлена динамическим диапазоном оцифровщика и нелинейностью ФЭУ, и отличается от предполагаемой прямоугольной формы.

Очевидно, что вероятность прохождения мюона через некоторую точку на плоскости перпендикулярную траектории его полёта равномерно распределена по всей площади плоскости. Учитывая внутренний радиус акриловой сферы 48 см, хорда с высотой образованного ею сегмента в 1,21 см составляет 21,42 см. Таким образом, 95% мюонов, прошедших через сцинтилляционную мишень, имеют ионизационные потери не менее 37 МэВ. При этом учитывая энергетический отклик детектора сигнал по всем 20-ти ФЭУ составит более 7380 фотоэлектронов. Пример такого события показан на рисунке 7.4. Таким образом, из 35 000 событий было отобрано 271 событие, для которых отклик детектора 110 составил более 7380 ф.э. Исходя из этого, учитывая размер сцинтилляционной мишени, измеренный поток мюонов в ГГНТ составил $(4,02 \pm 0,24) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (время экспозиции составило 2724 часа) в пределах 1σ , что согласуется с результатами измерений для эксперимента SAGE.

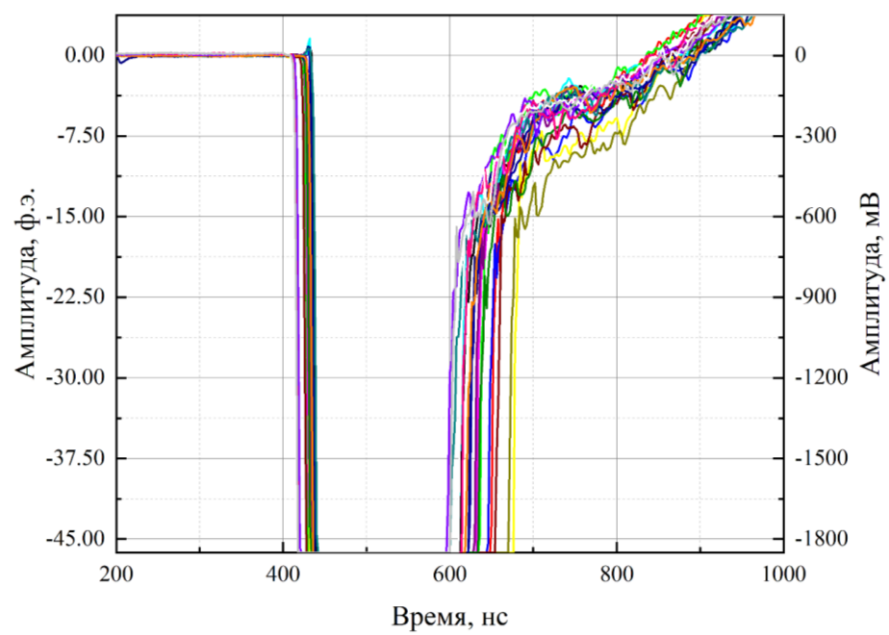


Рисунок 7.4 - Пример мюонного события детектора

8. Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле (Задача № 8)

На рисунке 8.1 приведен результат подгонки энергетического спектра одиночных событий III фазы эксперимента Борексино суммой событий от различных источников с учетом вклада от ^{40}K -geo-v. Под результатом подгонки мы будем понимать сумму различных источников событий, вклады которых получены в результате минимизации функции χ^2 в многомерном пространстве переменных [39]. Переменными являлись полные скорости счёта событий от различных источников в детекторе Борексино. Экспериментальные данные с ошибками взяты из работы [40]. Горизонтальная шкала дана в единицах: число зарегистрированных фотоэлектронов (ф.э.). Зависимость числа зарегистрированных фотоэлектронов от энерговыделения в сцинтилляторе взята из работы [29]: при энерговыделении в 0,5 МэВ регистрируется 220 ф.э., при 1,0 МэВ – 410 ф.э., при 1,5 МэВ – 590 ф.э.

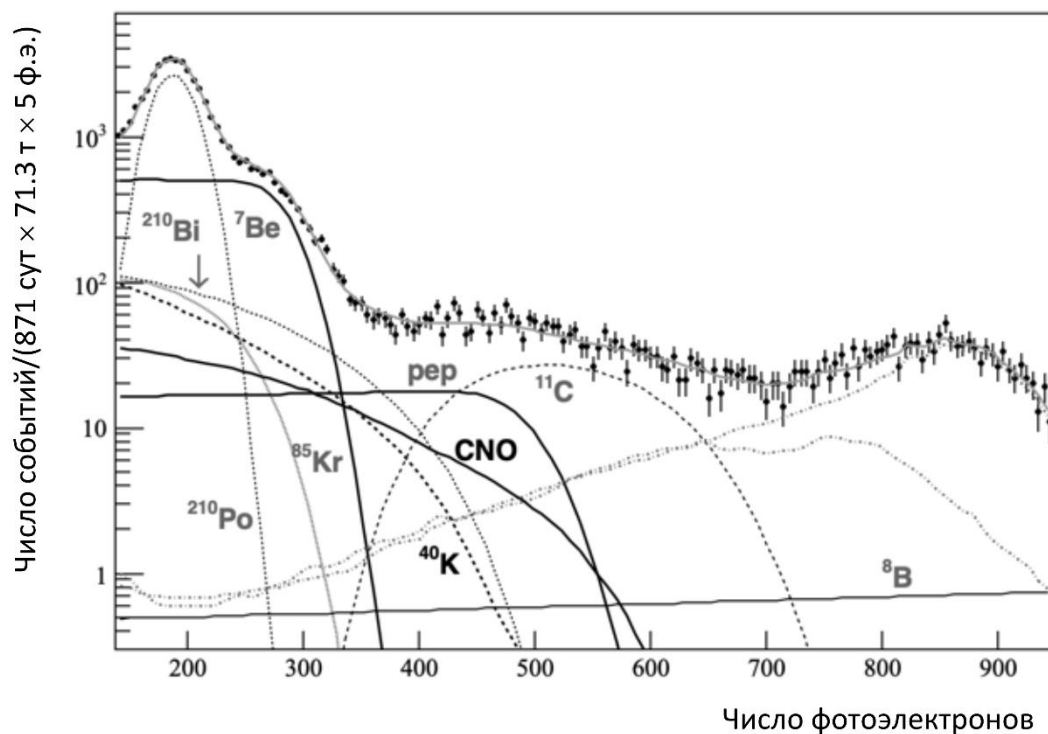


Рисунок 8.1 – Энергетический спектр одиночных событий детектора Борексино (точки с ошибками из [30]). Кривые – вклады различных источников событий и их сумма, полученные в результате подгонки к экспериментальным данным для $\chi^2 = 175,8$. Чёрная пунктирная кривая – вклад от ^{40}K -geo-v событий

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 , p-p , 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. В дальнейшем на этот источник мы будем указывать значками ^{208}Tl , ^{214}Bi . Переменными параметрами при подгонке являлись площади под кривыми, которые пропорциональны полным скоростям счёта событий от конкретных источников событий. Спектры от вкладов различных источников были нами рассчитаны самостоятельно, следуя рецепту из [29]. В [39] было показано совпадение нашего расчета со спектрами, используемыми коллаборацией Борексино.

Рассмотрим таблицу 8.1, 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 [40]. В первой строке показан результат подгонки стандартным набором источников событий, использованным коллаборацией Борексино. Результат согласуется с анализом, сделанным этой коллаборацией [40].

Таблица 8.1 – Полные скорости счёта одиночных событий от различных источников, полученные в результате подгонки к экспериментальному спектру [40] даны в строках 1 и 2. В строках 1a и 2a – пределы возможного изменения полных скоростей счёта соответствующего источника, использованные при вычислении значений в строках 1 и 2 соответственно. Величины даны в единицах $\text{cpd}/100\text{t}$

	^7Be	p-p	^{11}C	^{210}Po	^{210}Bi	^{85}Kr	CNO	$^{208}\text{Tl},$ ^{214}Bi	$^{40}\text{K-geo-v}$	χ^2
1	$48,4 \pm 0,9$	2,7	$1,7 \pm 0,1$	$41,5 \pm 0,4$	11,8	8,5	$6,5 \pm 0,7$	$4,76 \pm 0,2$ $1,8 \pm 0,3$	0,0	199,5
1a	$46 \div 49$	2,7	$1,35 \div 2$	$40 \div 46$	$9,8 \div 11,8$	$3,5 \div 8,5$	$4,5 \div 8$	$4,3 \div 5$ $1,7 \div 2,0$	0,0	
2	$47 \pm 0,2$	$2,72 \pm 0,04$	$1,75 \pm 0,01$	$41 \pm 0,5$	$10,7 \pm 0,3$	$8,5 \pm 0,4$	$3,9 \pm 0,4$	$4,75 \pm 0,2$ $1,8 \pm 0,2$	$11 \pm 1,2$	175,8
2a	$47 \div 49$	$2,7 \div 2,78$	$1,4 \div 2$	$41 \div 46$	$10,7 \div 11$	$3,5 \div 8,5$	$3,9 \div 10$	$4 \div 5$ $1,5 \div 2,0$	$0 \div 20$	

На следующем этапе мы добавили в стандартный набор источников событий дополнительно $^{40}\text{K-geo-v}$ события и произвели подгонку, позволяя параметрам меняться в определённых пределах. Пределы изменения параметров показаны в строке 2a таблицы. Удалось значительно улучшить согласие с экспериментальными данными. Получена

значительная скорость счёта $^{40}\text{K-geo-v}$ событий за счёт уменьшения скоростей счёта от солнечных CNO и ^7Be нейтрино. При этом скорость счёта событий от солнечных CNO и ^7Be нейтрино, а также от распадов ^{210}Bi и ^{85}Kr заняли граничные значения из строки 2а таблицы.

Каких значений $R(^{40}\text{K-geo-v})$ можно ожидать в рамках HE-модели? Может ли появится столь большое значение $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd/100t}$, если BSE модель справедлива (Bulk Silicate Earth – модель с силикатной мантией)? Для ответа на эти вопросы мы провели виртуальный эксперимент – разыгрывали Монте-Карло квази-экспериментальные спектры одиночных событий за время набора статистики в III фазе эксперимента при условии отсутствия $^{40}\text{K-geo-v}$. Затем каждый квази-экспериментальный спектр приближался набором стандартных источников плюс $^{40}\text{K-geo-v}$. Получено, что при заложенном в Монте-Карло $R_{\text{МК}}(^{40}\text{K-geo-v}) = 0$ события с $R(^{40}\text{K-geo-v}) > 7 \text{ cpd/100t}$ маловероятно и реализуются с вероятностью $p = 10^{-4}$. Также изучалось распределение $W(R(^{40}\text{K-geo-v}))$ при заложенном в Монте-Карло $R_{\text{МК}}(^{40}\text{K-geo-v}) \neq 0$. В частности, при $R_{\text{МК}}(^{40}\text{K-geo-v}) = 7 \text{ cpd/100t}$ распределение $W(R(^{40}\text{K-geo-v}))$ имеет максимум при $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd/100t}$. Таким образом мы наблюдаем, что восстановленные значения $R(^{40}\text{K-geo-v})$ имеют смещённые средние значения в сторону больших величин и достаточно широкое распределение. Расчёт показывает, что без учёта этого смещения скорость счета $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 7 \text{ cpd/100t}$ должна соответствовать массе калия в 3,2% от массы Земли. А с учётом этого смещения при существовании калия в количестве 3,2% от массы Земли мы должны наиболее вероятно зарегистрировать $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd/100t}$.

Именно такой случай мы и наблюдаем в строке 2 таблицы 8.1. Следуя принципу, что наименьшее значение χ^2 указывает на реально существующее в природе, мы приходим к утверждению, что получили экспериментальное подтверждение существования значительного количества калия в Земле.

9. 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 (Задача № 9)

9.1. Модернизация систем активной тепловой стабилизации ОГРАН с целью удержания его температурных вариаций в пределах, не превышающих 0.01К, что необходимо для его долговременной работы в режиме максимальной чувствительности

Методика и техника удержания ОГРАН в режиме мониторинга подробно описана в публикациях [32], [33]. На предыдущем этапе 2021 г были получены следующие результаты.

1. Проведена модернизация подземной установки ОГРАН: выполнен переход к резонаторам Фабри-Перо большой резкости (увеличение на полтора порядка); перестроены цепи фото детектирования для адаптации к возросшей величине гравитационного - оптического преобразования; успешно выполнено подавление сетевых электрических наводок (сложная техническая задача в условиях БНО); см публикацию [34].

2. Разработана цифровая система автоматического управления (включая удаленный контроль) установкой ОГРАН с авто захватом рабочей точки после случайных срывов; организован и функционирует отдельный интернет-канал связи в подземных условиях [35].

3. Измерение акустических, оптических и электронных шумов ОГРАН показало существенную зависимость их относительной роли от качества юстировки ФП резонаторов в обоих плечах установки (детектора и дискриминатора). При оптимальной настройке спектральная амплитуда акустического пика превышает уровень оптоэлектронного шумового фона почти на два порядка. Шумы окружения в отсутствие явных механических и электрических помех не создают деформационного фона на резонансной акустической частоте 1,3 кГц заметно превосходящего 10-18 Гц⁻¹.

4. За 10 месяцев непрерывной работы установки ОГРАН исследованы особенности её тепловой релаксации, показавшие необходимость активной термостабилизации камеры ВК-10 акустического детектора. ФП резонаторы акустического детектора и дискриминатора имеют сильно различные времена релаксации. Алюминиевый оптоакустический резонатор релаксирует по температуре гораздо быстрее ситалового дискриминатора. Даже слабые вариации температуры акустического детектора влияют на положение центральной частоты броуновского пика и стабильность захвата рабочей точки. В результате требуется прецизионный температурный контроль теплового режима камеры

ВК-10 с помощью активного термо чехла, подобного используемому для камеры дискриминатора [35].

5. Функционирование детектора ОГРАН предполагает контроль сейсмического фона по длине 4х километрового туннеля БНО. Эти данные используются при фильтрации аномальных выбросов установки. Более важно, что они позволяют выполнить расчет (в рамках модели Саулсона) 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 выполнен 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 микросейсмическим данным, полученным в главной штольне БНО, показывают, что этот предел значительно ниже требований, предъявляемых к такому известному 3G-детектору как «Телескоп Эйнштейна». Детали анализа опубликованы в [36]. В целом подтверждается высокое качество площадки БНО как сайта для размещения будущих поколений гравитационных детекторов [36].

6. Среди дополнительных усовершенствований оптоэлектроники установки ОГРАН уже в отчетном году нужно отметить следующие.

а) Были установлены новые фотоприемники. Они выполнены на более современной элементной базе вследствие чего стали более широкополосными. Это обуславливает большую устойчивость к самовозбуждению. Для уменьшения наводок цепи питания в них были дистанционно разнесены в монтажном блоке. Кроме того, непосредственно в корпусе фотоприемника установлены дополнительные стабилизаторы питающих напряжений.

б) Модернизации подверглась система синхронного детектирования в обоих плечах ОГРАН. Были приобретены компактные микросхемы внешних синхронных детекторов, которые устанавливаются прямо на кабель в непосредственной близости от фотоприемника.

в) Сигналы опорных частот 10,7 МГц (для питания электрооптического модулятора, а также синхронного детектирования в обоих каналах по методу Паунда-Дривера-Холла) в новом варианте подаются от внешних высокостабильных генераторов RIGOL DG822. Эти генераторы имеют внешний вход синхронизации для согласования сигналов. Один из генераторов - ведущий (питающий электрооптический модулятор) установлен в режим внутренней синхронизации. Его фаза принята за нуль отсчет. Два других генератора (для синхронного детектирования в обоих каналах) являются ведомыми, включены в режим

внешней синхронизации от первого генератора. Их фазы устанавливаются экспериментально по максимуму сигналов Паунда-Драйвера на выходах синхронных детекторов. Все генераторы предполагают возможность дистанционного управления, поэтому контроль фаз может осуществляется удаленно, что облегчает настройку системы регистрации без появления оператора на ПК-14, неизбежно влекущего за собой некоторое изменение температурного фона в районе установки.

По результатам этих исследований была сформулирована экспериментальная задача текущего (отчетного) года: Модернизация систем активной тепловой стабилизации оптоакустического гравитационного детектора с целью удержания его температурных вариаций в пределах, не превышающих $0,01\text{K}$, что необходимо для его долговременного функционирования в рабочем режиме.

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

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 $0,002\text{ Гц}$. 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 (детали см. в [35]).

На предыдущих этапах доводки (или развития) установки ОГРАН во всех боксах пикета ПК-14 была смонтирована система стабилизации температуры с точностью $0,1$ градуса. При этом выход системы слежения (по рабочим точкам) за границы контрольного диапазона был довольно частым явлением. Проблема заключалась в том, что основной акустический детектор выполнен из алюминиевого сплава – материала с высоким коэффициентом температурного расширения. 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 был изготовлен по индивидуальному проекту. Он представляет собой многослойную конструкцию. Наружный и внутренний слой (ближний стенкам камеры) выполнены из ткани OXFORD – синтетического безворсового материала, устойчивого к перепадам температур. Между этими слоями установлено 4 слоя синтепона с плотностью 100 г/м^2 и два слоя майларовой пленки с металлизированным покрытием для уменьшения потока теплового излучения от внешней среды к стенкам камеры. На внешней поверхности камеры под термо-чехлом были установлены ленточные нагреватели суммарной мощностью 50 Вт. Питание нагревателей осуществлялось от внешнего управляемого источника постоянного тока. Входным управляющим сигналом для этого источника является сигнал ошибки слежения за напряжением на пьезо-керамике, подстраивающей частоту лазера. Для того, чтобы предотвратить нежелательную конвекцию воздуха под чехлом, пространство между ребрами жесткости на вакуумной камере было разделено горизонтальными перегородками из пенополистирола.

После установки термочехла 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 в обновленной установке происходят крайне редко, и в основном из-за внешних сейсмических воздействий или электрических наводок

9.2. Разработка и тестирование оптимальных алгоритмов совместной обработки выходных данных ОГРАН и БПСТ для повышения эффективности регистрации коллапсирующих звезд в Галактике

В отчетном году было запланировано также теоретико-прикладное исследование: Разработка и тестирование оптимальных алгоритмов совместного анализа выходных данных ОГРАН и БПСТ для повышения эффективности регистрации коллапсирующих звезд в Галактике.

Задачей является уточнение стратегии параллельных наблюдений на ОГРАН и БПСТ для фильтрации сигналов коллапсаров. Требуется 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 период (2022г) был предложен следующий алгоритм поиска нейтрино-гравитационной корреляции.

Вид нейтринного сигнала, сопровождающего процесс коллапса массивной звезды обсуждался неоднократно.

Наиболее активная фаза процесса развивается за короткое время порядка единиц секунд. На кривой светимости нейтрино имеется большой начальный пик и следующие за ним более слабые пики, соответствующие излучению при отскоках в процессе монотонного сжатия. Существуют также сценарии многоступенчатого коллапса с присутствием нейтринных импульсов на более длинных временах около 20 с. В связи с этим разумно исследовать алгоритмы совместной регистрации событий, в которых пачки нейтринных импульсов, значимо коррелируют во времени с выбросами гравитационного детектора. Фактически подобный алгоритм был использован при обработке нейтрино-гравитационных данных полученных от сверхновой SN 1987A [37].

При таком подходе реперными точками считаются моменты t_k появления «нейтринных сигналов» БПСТ на «подозрительных наблюдательных интервалах» 20 с, фиксирующих аномально повышенную скорость счета «нейтринного фона». Далее, на тех же временных интервалах исследуются сигналы (выбросы) гравитационного детектора ОГРАН. Предполагается, что гравитационные выбросы могут опережать (или преследовать) нейтринные сигналы (метки).

Для модели ГВ излучения в виде цуга конечной длительности момент появления гравитационного всплеска будет оцениваться как t_k с некоторым сдвигом между нейтринными и гравитационными событиями.

Задача заключается в обнаружении корреляции между регистрируемыми пачками нейтрино – гравитационных сигналов. На выходе детектора ОГРАН они представляются суммой k импульсов, возникших на интервале наблюдения на фоне гауссова шума $n(t)$. Упрощенный вариант модели содержит также предположение о равенстве длительностей отдельных импульсов и универсальности сдвигов запаздывания между гравитационными и нейтринными сигналами. Кроме того, рассматриваемые нейтрино-гравитационные события считаются независимыми. Тогда логарифмы отношений правдоподобия отдельных событий складываются. Критерий максимума отношения правдоподобия удобно применить в нашем случае, поскольку его математический аппарат хорошо разработан для задач обнаружения на фоне гауссового шума. В частности, известно, что для узкополосного нормального шума логарифм отношения правдоподобия пропорционален квадрату огибающей выходного сигнала ОГРАН - $R(t)$ для одного импульса и сумме квадратов огибающих пачки импульсов. Процедура получения решения, т.е. «регистрация наличия корреляции», соответствует отысканию максимума интегрального отношения правдоподобия или «достаточной статистики» D при вариации временного сдвига между нейтрино – гравитационными событиями. Для расчета требуется знание функции распределения достаточной статистики D . Принимая во внимание, что при гауссовом

шумовом фоне достаточная статистика подчиняется "хи квадрат" распределению, для которого интегральная плотность вероятности хорошо известна, статистические ошибки обнаружения могут быть рассчитаны.

Представленный алгоритм, кроме расчета вероятности наличия корреляции дает также оценку запаздывания нейтринного сигнала относительно гравитационного (сдвиг потоков, соответствующий максимуму) и, тем самым, оценку массы покоя нейтрино (при световой скорости ГВ). (Полное описание алгоритма опубликовано в работе [38]).

Следует заметить, что предлагаемый алгоритм является, конечно, упрощенной схемой первого приближения. В частности, он ограничен предположениями, что рассматриваемые пуассоновские потоки однородны (с постоянной средней частотой следования импульсов) как однородно и запаздывание между нейтринными и гравитационными сигналами.

Модель, в которой поток нейтринных сигналов имеет переменную во времени среднюю частоту следования импульсов, по-видимому, будет более адекватной физике работы БПСТ в моде «поиск коллапсаров». Однако это заметно усложнит расчеты статистических характеристик обнаружения такой схемы. Тем не менее развитие этих идей планируется в дальнейшей работе по данному проекту.

10. Непрерывный мониторинг вспышек Сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино (Задача № 10)

10.1. Метод регистрации нейтринных вспышек с помощью сцинтилляционных детекторов

Основная задача нейтринных детекторов LVD [41] и АСД [42] – 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 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 [43]).

Для процесса обратного бета-распада при взрыве сверхновой в центре Галактики (8,5 кпк) ожидается от 300 до 600 событий. Другие реакции дадут гораздо меньше событий. Например, в отсутствие осцилляций будут регистрироваться всего шесть событий от взаимодействий электронных нейтрино с углеродом сцинтиллятора. Выход мал в основном из-за того, что слишком малы энергии электронных нейтрино. Но осцилляции преобразуют мюонные и тау-нейтрино, которые генерируются с более высокими энергиями (примерно в 2 раза выше), в электронные нейтрино. Выход увеличится до нескольких десятков событий. Еще больше событий в детекторе и большая энергия нейтрино будет, если реализуется другой механизм взрыва сверхновой, например, [44]. Таким образом, регистрация нейтрино от сверхновых может дать полезную информацию о физике нейтрино, в основном о смешивании, и, кроме того, об астрофизике коллапса.

10.1.1. Детектор большого Объема - LVD

По программе поиска нейтрино от сверхновых LVD работает с 1992 года [45]. Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине $\langle H \rangle = 3650$ м в.э, состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами $100 \times 100 \times 150$ см³, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Они размещены по 8 штук в стальных несущих модулях, которые сгруппированы в 7 горизонтальных слоёв и образуют вертикальные колонны. Детектор LVD состоит из 3 башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по 5 колонн в каждой. Масса железа и в установке по 1 кт. В детекторе имеется два энергетических порога: «триггерный» – 4 МэВ и 0,5 МэВ – для регистрации нейтронов.

Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий с низкой вероятностью имитации событий за счет флуктуации фона.

В эксперименте LVD проводится анализ данных в режимах on-line и off-line [46]. 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. LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме on-line с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось.

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.

За период с 1992 по 2022 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее $1/100$ г⁻¹. Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии до 25 кпк в период наблюдения.

10.1.2. Артемовский Сцинтилляционный детектор - АСД

В 2020 году закончился физический этап набора данных Артемовского Сцинтилляционного Детектора (АСД), который расположен в шахте Донецкого соляного месторождения на глубине 570 м в.э.

Детектор представляет собой цилиндр с равновеликими диаметром и высотой 550 см, установленный вертикально на одно из оснований. Цилиндрический контейнер выполнен из нержавеющей стали и заполнен жидким сцинтиллятором (105 т) на основе уайт-спирита C_nH_{2n} ($n \sim 10$), имеющим высокую прозрачность ~ 25 м. На боковой поверхности контейнера равномерно установлены 160 фотоумножителей.

Низкая радиоактивность соли обуславливает хорошие фоновые условия для регистрации нейтронов по захватным гамма-квантам с энергией 2,2 МэВ. По своим размерам, 9 т-едини по вертикали, установка является калориметрической (регистрируется около 70% энергии каскада) и оптимальной для изучения и нейтрино и спектра мюонов по спектру энерговыделений, форма которого при $\gamma_\mu = 2,75$ в энергетической области больше 1 ТэВ практически повторяет спектр мюонов. Электромагнитные и ядерные ливни генерируются главным образом во взаимодействиях мюонов с атомами соли, а направление их развития заключено в интервале зенитных углов $0 - 60^\circ$.

За период наблюдения за Галактикой по данным установки АСД с 1977 г по октябрь 2020 г кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. Экспериментально получено, что фоновые события распределены по закону Пуассона. Предел на частоту коллапсов на 90% уровне достоверности определяется по формуле: $1/f_{col} = \Delta T / \ln(0,1)$, где ΔT – время наблюдения.

10.2. Модели взрыва для Сверхновая SN1987A

Сверхновая SN1987A, вспыхнувшая 23 февраля 1987 года, инициировала бурное развитие теории взрывов сверхновых и экспериментальных методов детектирования нейтрино. Нейтрино от этой сверхновой были зарегистрированы четырьмя нейтринными детекторами: сцинтилляционными – LSD [47], БПСТ [48] и черенковскими – IMB [49], KamiokandeII [50]. Детектор LSD был прототипом детектора LVD и работал под Монбланом с 1984 по 1998 г LSD и LVD имеют одинаковые основные элементы мишени – полуторакубовые сцинтилляционные счетчики.

Сигнал LSD от SN1987A, зарегистрированный примерно на 5 часов раньше детекторов IMB, КП и БПСТ, до сих пор вызывает дискуссии о своем происхождении. Помимо общепринятой модели (сферически симметричная, невращающаяся звезда) [51, 52], существуют модели [44, 53, 54, 55] допускающие и двойной нейтринный всплеск от сверхновой. Как было показано в [56] сигнал в 2:52 UT, зарегистрированный только на установке LSD и содержащий 5 событий, может найти объяснение в рамках модели вращающегося коллапсара [44], как результат взаимодействия электронных нейтрино

высоких энергий с элементами конструкции детектора, которые содержали порядка 170 т железа.

Существенная неопределенность в свойствах нейтрино (в особенности энергии), излучаемых в процессе коллапса ядра сверхновой с сильным вращением, при отсутствии убедительных численных расчетов, придает смысл попытке решения обратной задачи: попытаться ответить на вопрос: если все 5 событий LSD обусловлены взаимодействием нейтринного излучения от сверхновой SN1987A, то какими характеристиками оно должно было обладать? Поэтому было проведено моделирование отклика детектора LSD на взаимодействие нейтрино в рамках двойного коллапса звезды SN1987A для случаев: а) двухстадийного коллапса с энергией электронного антинейтрино 15 МэВ на обеих стадиях; б) вращающегося коллапсара когда сначала в первом коллапсе вылетают высокоэнергичные электронные нейтрино около 40 МэВ, а второй коллапс проходит по стандартному сценарию с соответствующим набором нейтрино [44].

10.2.1. Моделирование отклика для детектора LSD на Geant4, доработка пакета

Моделирование проводилось с использованием программного комплекса Geant4 версии 10.3 [57]. Данный программный комплекс позволяет проводить детальные расчеты прохождения элементарных частиц через вещество с помощью метода Монте-Карло. Также Geant4 имеет необходимые средства для задания объектов сложной геометрии и включает в себя широкий набор теоретических моделей, описывающих взаимодействие элементарных частиц с веществом.

В пакете библиотек Geant4 отсутствуют модели для описания взаимодействия нейтрино с веществом. Поэтому информация о процессах с участием нейтрино должна быть добавлена в расчёт извне. Мы используем стандартные формулы для описания процессов: i) захвата нейтрино ядром, ii) неупругого рассеяния нейтрино на ядре и iii) рассеяния на электроны. Основной проблемой здесь является расчёт величины и распределения Гамов-Теллеровских и Фермиевских резонансов в дочернем ядре, которые доминируют в указанных процессах на ядрах при рассматриваемых характерных энергиях нейтрино. Для полного расчёта использовалась информация по взаимодействию нейтрино как в сцинтилляторе установки, так и в защитных металлических конструкциях LSD и в окружающем установку грунте [58].

Особое внимание и значительное количество усилий было уделено созданию геометрии детектора LSD. По возможности необходимо было включить в модель все элементы конструкции, которые могли повлиять на результаты численного моделирования.

Также расчетная геометрия содержала гранит, окружавший установку. Гранит массива Монблана в основном состоит из диоксида кремния SiO_2 .

10.2.2. Моделирование для модели стандартного коллапса

Была проведена серия расчетов по изложенной выше методике для различных энергий, сортов и каналов реакций нейтрино. В процессе расчета установка и окружающий ее гранит облучался потоком нейтрино определенного состава (с фиксированной или распределенной по равновесному спектру энергией). Полная энергия, излученная сверхновой в виде нейтрино, во всех расчетах равнялась 10^{53} эрг. Поручены результаты моделирования для потока электронных антинейтрино с энергией, распределенной по равновесному спектру $F_\nu(E_\nu) \propto E_\nu^3 e^{-\frac{3E_\nu}{\langle E_\nu \rangle}}$ со средним значением $\langle E_\nu \rangle = 15$ МэВ, и каналу реакций по заряженным токам. Спектр энерговыделений в счетчиках имеет максимум на энергиях порядка 7 – 8 МэВ и медленно спадающий “хвост”. В расчете было смоделировано 50000 реакций нейтрино с заданными свойствами. Как и ожидалось, большинство реакций, которые привели к регистрации в сцинтилляционных счетчиках сигналов с энергией более 5 МэВ, происходили в самом сцинтилляторе. А основным ядром, вступающим в реакции с нейтрино, был водород.

10.2.3. Моделирование для модели вращающегося коллапсара

Для модели вращающегося коллапсара сделаны расчеты для потока электронных нейтрино. Получены спектры событий для потока ν_e с энергией, распределенной по равновесному спектру с более высоким значением средней энергии 40 МэВ (см. [56]), в реакциях по заряженным токам. Спектр энерговыделений в этом случае получается достаточно протяженным (до ~ 50 МэВ) и монотонно спадающим. Нейтрино в основном реагируют с веществом железных и стальных конструкций установки, однако сравнимое число реакций происходит и в сцинтилляторе. Изотопы железа и углерода – наиболее часто вступающие в реакции с нейтрино ядра.

В дополнение получены результаты расчета для канала реакций по нейтральным токам и рассеянию нейтрино на электронах. Спектр нейтрино – равновесный со средней энергией 40 МэВ. Спектр энерговыделений имеет ярко выраженный максимум в интервале энергией 5 – 10 МэВ, что вполне соответствует энергиям, зафиксированным в эксперименте. Тем не менее, все же стоит отметить наличие в спектре и сигналов с высокими значениями энергии (вплоть до ~ 30 МэВ). Как и в модели стандартного коллапса основную роль играют железо, сталь и сцинтиллятор. Однако, наряду с изотопами железа и углерода заметный вклад в число зарегистрированных событий вносят реакции рассеяния нейтрино на электронах.

10.2.4. Сравнение результатов для разных моделей

В таблице 10.1 суммированы наиболее важные результаты численного моделирования для широкого набора энергий и типов реакций нейтрино. Расстояние до источника нейтринного излучения полагалось равным расстоянию до сверхновой SN1987A. При этом поток нейтрино считался изотропным, а его полная энергия в каждом расчёте равнялась 1053 эрг. В таблице 10.1 приводятся ожидаемое (по результатам моделирования) число событий в детекторе LSD, вероятность того, что данное энерговыделение попало в интервал 5 – 10 МэВ, доля событий от реакций в граните, а также доля событий от реакций, среди продуктов которых были нейтроны.

Как видно из последних двух столбцов таблицы, вклад гранита и нейтронов в число регистрируемых событий от нейтринного излучения ничтожен при всех возможных значениях энергий и каналов реакций. По-видимому, это связано с тем, что гранит, окружающий LSD, сложен в основном из α -частичных ядер (^{16}O , ^{28}Si), имеющих высокие энергии связи и энергии отделения нейтронов. Из всё же образовавшихся нейтронов лишь малая часть сумеет выйти из грунта, и ещё меньшая сумеет пройти защитные конструкции LSD, чтобы дать сигнал в счётчиках.

Как видно из таблицы, основным фактором, приводящим к увеличению полного числа зарегистрированных событий, является высокая энергия. Реакции рассеяния нейтрино вносят незначительный вклад в полное число событий при всех возможных значениях энергии. С другой стороны, спектр энерговыделений, наблюдавшихся в эксперименте, наиболее близко воспроизводится как раз в реакциях рассеяния.

Таблица 10.1 – Сводная таблица результатов расчетов для различных типов реакций и энергий нейтрино от сверхновой SN1987A

Тип реакции	Средняя энергия нейтрино, МэВ	Полное число ожидаемых событий	Вероятность, попадания в интервал 5 – 10 МэВ	Доля реакций в грунте $\times 10^{-2}$	Доля событий с образованием нейтронов $\times 10^{-2}$
$\bar{\nu}_e$	15	1,92	0,379	0,11	0,06
	30	5,6	0,175	0,29	0,92
	40	8,46	0,135	0,54	1,96
ν_e	15	0,08	0,635	0,17	1,10
	30	1,1	0,449	0,45	2,43
	40	2,6	0,371	0,93	2,86
NC+ES	15	0,046	0,69	0,06	0,68
	30	0,22	0,69	0,92	1,64

	40	0,41	0,69	1,93	3,52
--	----	------	------	------	------

Результаты моделирования показаны на рисунке 10.1, где приведены полученные спектры для двух моделей: стандартного коллапса – черная кривая, и для вращающегося коллапсара – красная и зеленая кривые. Точками отмечены экспериментальные результаты детекторов KII, IMB, BUST и LSD.

Во время второго сигнала в 7:35 количество событий в LSD было – 2, что прекрасно согласуется с нашим вычисленным значением для стандартного коллапса (антинейтрино 15 МэВ) – 1,92.

Во время первого сигнала ни один детектор, кроме LSD, не был способен зарегистрировать сигнал от электронных нейтрино [56]. Тот факт, что KII и БПСТ всё же что-то увидели говорит о том, что небольшая примесь электронных антинейтрино низких энергий в первом сигнале была (IMB ничего не увидел в силу своего высокого, порядка 20 МэВ порога). Это значит, что одно из 5-ти событий в LSD мы также можем отнести за счёт регистрации IBD-реакции, именно то, которое (единственное) сопровождалось характерной сигнатурой этого события.

Теперь рассмотрим основной ингредиент ротационной модели – электронные нейтрино высоких (40 МэВ) энергий. Мы видим, что комбинация числа событий по заряженным токам (2,6) и нейтральным (0,41) даёт 3 события, что, с учётом всех имеющихся неопределённостей, замечательно совпадает с числом $5 - 1 = 4$ события от электронных нейтрино. Итак, наиболее вероятная комбинация событий в момент первой вспышки в LSD есть: $5 = 1(15 \text{ МэВ } \bar{\nu}_e) + 1(40 \text{ МэВ } \nu_x) + 3(40 \text{ МэВ } \nu_e)$.

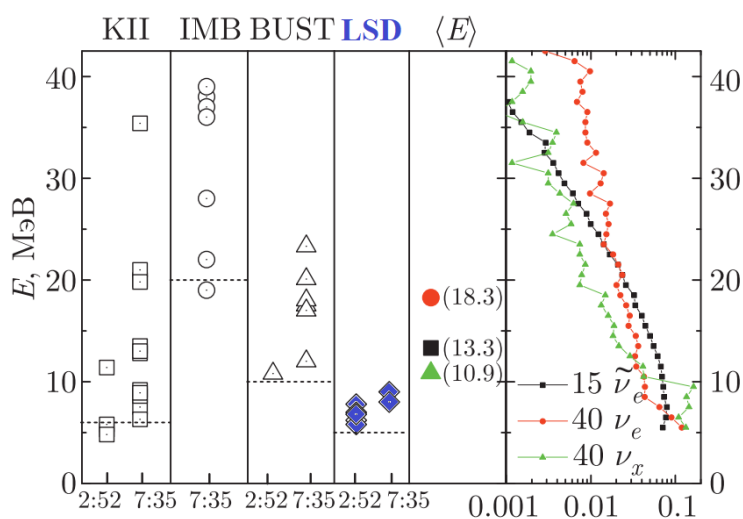


Рисунок 10.1 – Сравнение экспериментальных данных и расчетных спектров моделирования (черная кривая – энергетические спектры для электронных антинейтрино в модели стандартного коллапса, красная и зеленая кривая – для электронного нейтрино и других нейтрино в модели вращающегося коллапсара). Точки — компиляция данных по

четырем установкам: квадраты — КИ, кружки — ИМВ, треугольники — БПСТ, ромбы — LSD. Для всех установок, кроме ИМВ, первый набор данных соответствует времени 2:52 UT, второй — 7:35 UT

Однако, в значениях измеренных энергий событий мы видим главную проблему: все энерговыделения в LSD лежат в узком диапазоне от 5 МэВ (порог) до примерно 9 МэВ. Рассчитаем вероятность, что все пять событий попали в этот диапазон: $P(5) = 0,379 \times 0,69 \times (0,371)^3 \approx 0,013$. Сигналы в LSD действительно выбиваются из общего ряда. Во всех остальных детекторах распределение событий по энергиям – широкое, как и должно быть. Средние ожидаемые энергии событий в LSD по вычисленным распределениям для разных процессов показаны на том же рисунке сплошными ромбами. Сигнал в LSD не согласуется ни с вычисленными спектрами энерговыделений, ни с энергиями сигналов в других детекторах.

Результаты моделирования показали, что требуется как уточнение моделей взрыва сверхновых и параметров нейтринного излучения, так и объяснение других фактов, отмеченных в [59], связанных с регистрацией сигнала от SN1987A.

10.3. Мониторинг вспышек сверхновых на детекторе БПСТ

По информации БПСТ за 2022 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, время набора информации составило 292,64 суток – 92,0 % от календарного времени за период с 01 января 2022 по 15 ноября 2022 года. Чистое время набора по данной задаче составило $292,64 \times 0,9827 = 287,6$ суток.

Проведена обработка всей набранной в 2022 году информации, обработано 417424021 событий. Из этих событий отобраны одиночные события для двух детекторов Д1 и Д2 – 506160 событий для Д1, 2868745 для Д2. 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. На рисунке 10.2 показано полученное за 2001 – 2022 годы экспериментальное распределение фоновых событий по множественности в скользящем временном окне, равном 20 секундам (точки) в сравнении с расчетом. Чистое время набора представленной на рисунке 10.2 информации составляет 19,17 года.

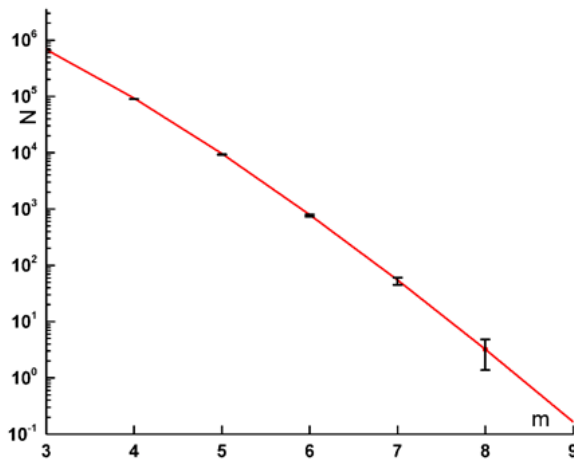


Рисунок 10.2 - Распределение кластеров по множественности m за 2001– 2022 годы, в скользящем интервале $dt=20$ сек. Точки – эксперимент, линия – расчет

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 (хотя бы один логарифм на плоскости 6,7,8) и одиночным событием на 6, 7 или 8 плоскости.

В 2022 году зарегистрировано 487 кластеров в детекторе Д1 множественности $m_1 > 4$. Из них 190 имеет, по крайней мере, одно одиночное событие во временном промежутке после регистрации каскада, и 14 кластеров – 4 события (максимальное число в 2022 году). 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 2022 году одиночные события после каскадов не создали кластеры множественности $m \geq 5$, то есть ложный алерт для регистрации вспышки Сверхновой по этой причине исключен. В целом, 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 2022 года не было обнаружено.

За весь период наблюдения, с 30.07.1980 по 15.11.2022, чистое время набора составило 36,77 года. Из них 19,17 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: $f_{col} < 0,0627 \text{ год}^{-1}$.

11. Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов на данных детекторов АСД, БПСТ и LVD, связанных с событиями астрофизических источников (Задача №11)

11.1. Методы и подходы для решения задачи

Детектор LVD (Large Volume Detector, $\langle \text{HLVD} \rangle = 3300$ м в.э.) 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. Основным элементом детектора – сцинтилляционный счётчик, который представляет собой прямоугольный параллелепипед размерами $1 \times 1 \times 1,5$ м³. Всего – 840 счётчиков. Основная цель эксперимента LVD – поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года. С 2004 года LVD включен в систему раннего оповещения о сверхновых SNEWS. Помимо основной задачи на установке LVD исследуется поток нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей под землей, как источник фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Детектор БПСТ ($\langle \text{НБПСТ} \rangle = 850$ м в.э.) 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 будет использоваться 1200 счётчиков на внутренних плоскостях БПСТ, и 1030 отобранных счётчиков из 1980 на внешних плоскостях с относительно низким темпом счета. Одной из задач детектора БПСТ является поиск нейтрино от гравитационных коллапсов звезд. При поиске нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд будет проводиться отбор событий, которые могут быть вызваны взаимодействием нейтрино в детекторе. Однако помимо регистрации взаимодействия нейтрино в детекторе также измеряются события, имитирующие такие взаимодействия. Эти события регистрируются постоянно, образуя фон, и затрудняя идентификацию нейтринной вспышки. С увеличением длительности непрерывной работы детектора повышается точность определения скорости счета фоновых событий. Скорость счета фоновых событий является основной характеристикой, которая определяет вероятность имитации нейтринной вспышки (кластера импульсов во временном окне малой длительности) в ходе проведения поискового эксперимента.

Детектор АСД ($\langle N_{\text{АСД}} \rangle = 570$ м.в.э.) – стотонный цилиндрический сцинтилляционный детектор с размерами: (556 ± 3) см – диаметр, высота 547 см – высота., расположен в Артемовске (Донецкая обл.). Размещение установки в соляной шахте уменьшило фон естественной радиоактивности примерно в 300 раз по сравнению с помещением в обычном грунте. Темп счета составил $1,1 \cdot 10^3$ имп/сек в диапазоне (1-3) МэВ регистрации энерговыделений от гамма-квантов при захвате. Глубина расположения и большие размеры детектора снизили фон, связанный с мюонами космических лучей, до 0,4 имп/сек в интервале 5-50 МэВ, где регистрируется позитрон из реакции обратного бета распада (IBD). Этот фон создается, в основном, мюонами, пересекающими детектор по коротким путям, и гамма-квантами каскадов, генерированных мюонами в соли. Основная цель эксперимента АСД – поиск антинейтринных потоков от коллапсирующих звезд в Галактике и изучение спектра и взаимодействий мюонов космических лучей с энергиями до 10^{13} эВ. АСД был закрыт в декабре 2020 года, его накопленный материал с 1987 года по 2020 позволяет проводить анализ и сравнение данных с работавшими другими детекторами в режиме офф-лайн.

Все три детектора используют идентичный сцинтиллятор CnH_{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 и АСД от вспышки сверхновых в рамках модели стандартного коллапса;
- б) поиск двойных совпадений импульсов в интервале 1 сек в детекторах БПСТ, LVD и АСД от вспышек сверхновых;
- в) поиск редких событий, коррелированных с известными астрофизическими источниками.

Для всех детекторов используется одинаковая методика отбора событий.

Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий с низкой вероятностью имитации событий флуктуациями фона.

В модели стандартного коллапса (МСК) (сферически-симметричная, не вращающаяся, немагнитная звезда) излучаются все типы нейтрино в равных энергетических долях. В этом случае наиболее естественно попытаться зарегистрировать поток электронных антинейтрино по реакции с водородом, имеющей максимальное сечение. При регистрации антинейтрино в жидком сцинтилляторе основной реакцией взаимодействия является реакция обратного бета распада ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$), $E(e^+) = E(\nu) - 1,3$ МэВ.

В детекторе LVD измеряются обе частицы (позитрон и нейтрон). Нейтрон регистрируется по захвату на водороде $n + p \rightarrow d + \gamma$, энергия гамма-квантов 2,2 МэВ, время захвата – около 170 микросекунд.

В установке БПСТ детектируется только позитроны. К характерным чертам регистрации антинейтрино в реакции обратного бета распада от вспышки сверхновой относится: повышение темпа счета установок, равномерное по объему распределение взаимодействий.

В АСД регистрация антинейтрино от коллапсирующей звезды основывается на реакции Райнеса-Коуэна (IBD) взаимодействия антинейтрино с протоном (ядро водорода), входящим в состав сцинтиллятора: $\bar{\nu}e + p \rightarrow e^+ + n$.

Вклад взаимодействий с протонами ядра ^{12}C мал, т.к. порог взаимодействия ~ 19 МэВ, а энергетический спектр антинейтрино имеет максимум в области ~ 10 МэВ и охватывает интервал от 3 до 30 МэВ. Установкой фиксируется появление обеих частиц – позитрона и нейтрона, при этом определяется энергия позитрона. Импульс от ионизационных потерь позитрона является стартовым для регистрации нейтронов по гамма-квантам захвата на водороде с характерным временем захвата 170 мксек.

Поиск кластеров событий, вызванных взаимодействием антинейтрино с веществом детектора, осуществляется в течение определенного временного окна, длительность которых не превышает 100 с. Каждый кластер характеризуется длительностью Δt и множественностью m . Для каждого кластера вычисляется его частота имитацией фоновыми событиями. Для последующего анализа будут выделяться кластеры с высокой значимостью, т.е. которые имели низкую частоту имитации (менее одного в месяц). Также величина частоты имитации будет являться пороговой при отборе событий-кандидатов в зависимости от поставленной задачи. Например, при достаточно удалённом астрофизическом явлении имеет смысл провести поиск при частоте имитации, не превышающей 1 раз в неделю во временной окрестности наблюдения данного явления. Планируется использовать пороги по частоте имитации 1 раз в месяц и 1 раз в год.

Модульная структура детекторов LVD и БПСТ позволяет отдельно анализировать экспериментальные данные, поступающие из внутреннего и внешнего объёмов детекторов. В состав внутреннего объёма детектора LVD входят счётчики, не имеющие границ с окружающим установку пространством. Таким образом, совокупность внешних счётчиков установки представляет собой прямоугольный параллелепипед, в объёме которого размещены внутренние счётчики. В детекторе БПСТ внутренними являются счётчики трех нижних горизонтальных плоскостей. Разделение счётчиков на внутренние и внешние обусловлено тем, что внешние счётчики чаще взаимодействуют с продуктами естественной

радиоактивности окружающих материалов и горных пород, что в свою очередь увеличивает скорость счёта фоновых событий во внешних счётчиках. При поиске любых редких событий вероятность их появления оценивается, исходя из среднего темпа счёта фоновых событий. Если брать среднее значение скорости счёта фоновых событий, не производя разделение на внутренние и внешние счётчики, то количественное различие в источниках фона учитываться не будет. Это может привести к ошибочной интерпретации полезного события фоновым и наоборот.

Энергетический порог детектора LVD и АСД составляет 5 МэВ, детектора БПСТ – 8 МэВ для счетчиков на горизонтальных плоскостях и 10 МэВ на вертикальных. Экспериментальные данные с установок планируется обрабатывать совместно. В случае обнаружения редкого события в одной установке (например, кластера-кандидата на отклик от нейтринной вспышки сколлапсировавшей звезды), более детально будут проанализированы экспериментальные данные вблизи времени обнаружения, полученные на другой экспериментальной установке. Критерием выбора события-кандидата является его среднее время имитации фоном. Кроме того, разделение объёмов установок на внешний и внутренний позволяет увеличить вероятность обнаружения редких событий. Например, если во внутреннем объёме установки обнаружено редкое событие, то во внешнем объёме схожее событие вследствие большего темпа счёта фоновых событий может быть пропущено. В этом случае его среднее время ожидания окажется ниже порогового. Также будут оцениваться вероятности совпадений редких событий на детекторах LVD, БПСТ и АСД. Планируется получить данные обо всех редких событиях при различных энергетических порогах и при различной частоте имитации событий фоном (раз в месяц, раз в год). Энергетический порог зависит от энергетического спектра событий в кластере. При наличии кластера событий с высокой энергией можно поднять энергетический порог регистрации событий, заново измерить темп счёта фоновых событий и пересчитать среднюю частоту имитации события фоном. Она будет существенно ниже, поскольку скорость счёта событий сильно упадёт, т.к. из анализа будут исключены события с низкой энергией, которых подавляющее большинство.

База данных редких событий впоследствии позволит другим установкам (нейтринным и не только) более внимательно анализировать свои старые данные для того, чтоб поискать совпадения их появления с астрофизическими явлениями. Она будет содержать информацию о дате, времени и амплитуды кластеров LVD, БПСТ и АСД, также информацию о средних скоростях счёта фоновых импульсов детектора и вероятностях регистрации кластеров.

Количество событий с заданным средним временем появления является дополнительным параметром, с помощью которого можно контролировать работу установок.

Для поиска событий в LVD, БПСТ и АСД, от гравитационных волн и других астрофизических источников проводится поиск импульсов выше порога регистрации в детекторах вокруг времени наблюдения сигналов от гравитационных волн. Временное окно будет 500 – 1000 секунд. Проводится оценка количество ожидаемых и фоновых событий в обоих детекторах. Совместный анализ данных увеличивает вероятность поиска редких событий.

Методика поиска совпадений разрабатывается на нескольких астрофизических событиях: GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 и GW170817.

Сначала отбирались кластеры событий отдельно в каждом детекторе (LVD, БПСТ и АСД), затем искали совпадения в 500 секундах и оценивалась частота случайных совпадений. На рисунке 11.1 показаны события в детекторе LVD. «Ноль» на графиках соответствует времени регистрации гравитационно-волнового события записанного Ligo-Virgo.

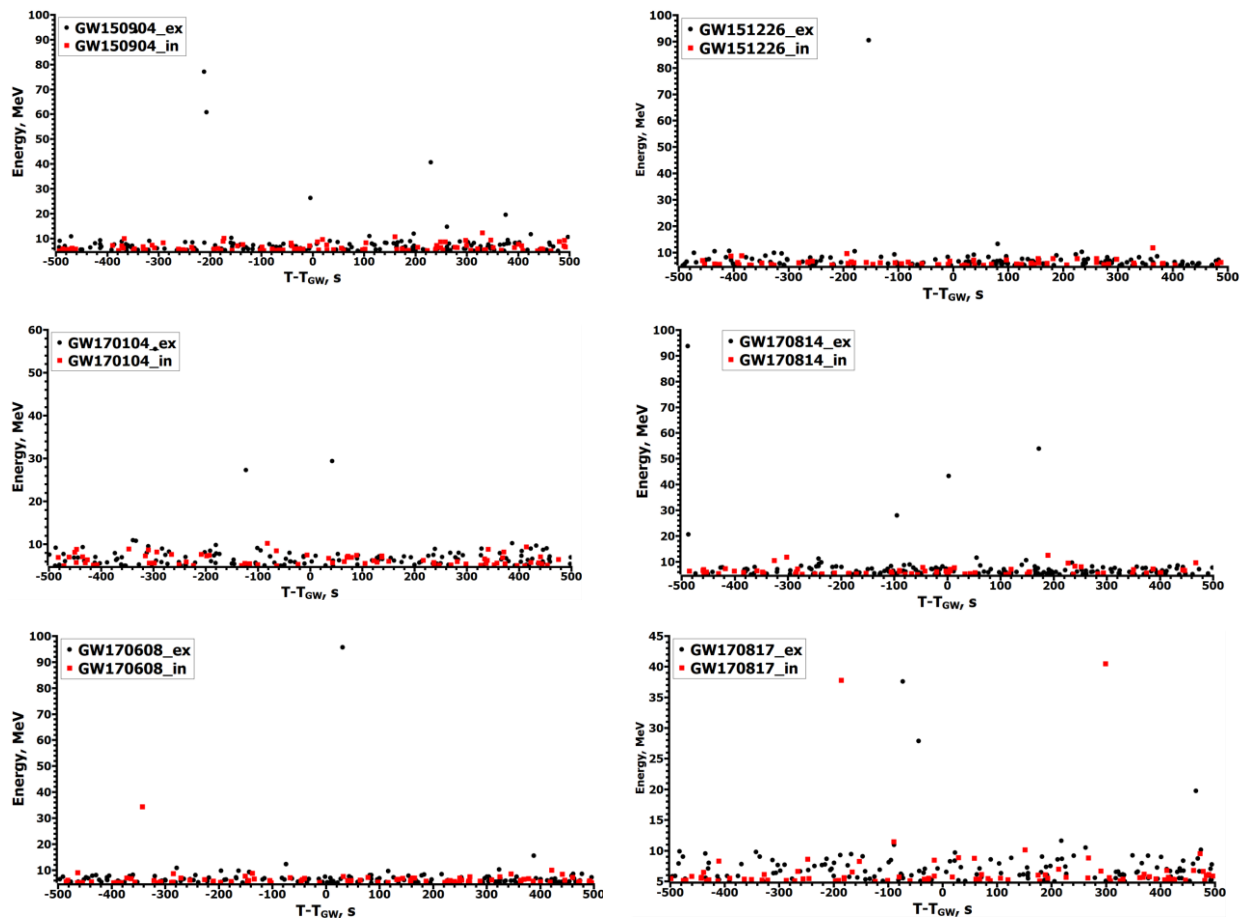


Рисунок 11.1 – Распределение событий в LVD во время 6 зарегистрированных Гравитационно-волновых событий Ligo-Virgo первого цикла наблюдений

11.2. Поиск совпадений во время сигнала GW170817

В течение 10 суток до и после 17 августа 2017 проводился поиск совпадений импульсов одиночных событий детекторов LVD и БПСТ в одной секунде. Измеренная скорость счета совпадений импульсов представлена в таблице 1. Скорость счёта одиночных импульсов во всем детекторе LVD составляет $\lambda_{LVD} = 0,25 \text{ с}^{-1}$. В БПСТ скорость счета одиночных импульсов составляет $\lambda_{БПСТ} = 0,009 \text{ с}^{-1}$.

На рисунке 11.2 представлены значения скорости счёта одиночных импульсов в детекторе LVD, для внутренних (in) и внешних (ex) счётчиков и для каждой башни (T1, T2, T3) отдельно.

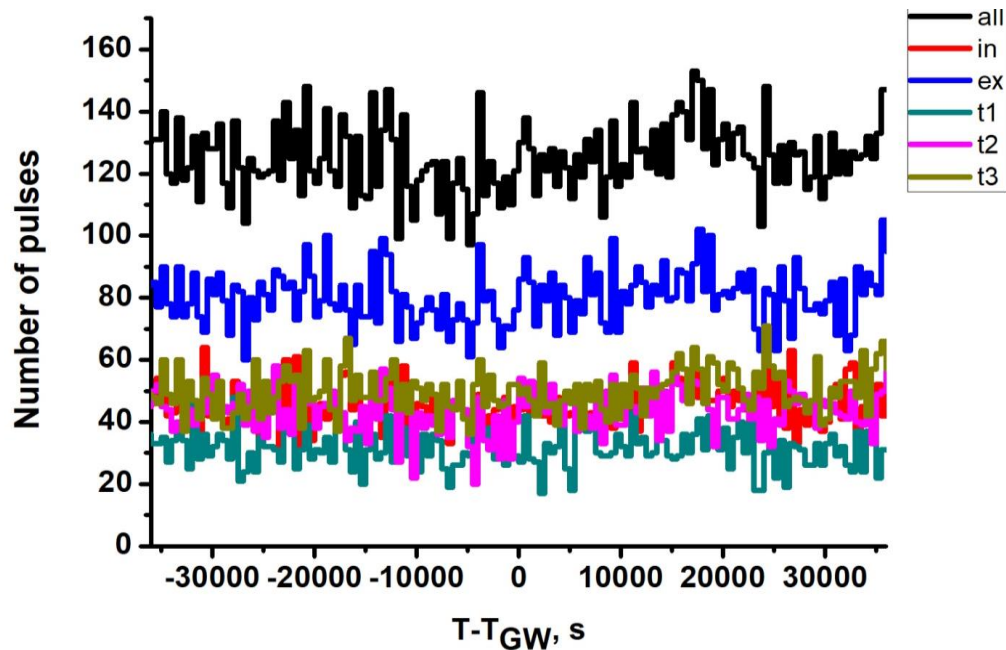


Рисунок 11.2 – Скорости счета одиночных импульсов в детекторе LVD, измеренные во временных интервалах длительностью 500 с

Для детектора БПСТ использовалась идентичная LVD методика поиска событий. На рисунке 11.3 представлена скорость счета событий в детекторе БПСТ во время гравитационного события GW170817. Отличие только в пороге регистрации событий, который составляет 10 МэВ. Для детектора АСД скорости счета показаны на рисунке 11.4.

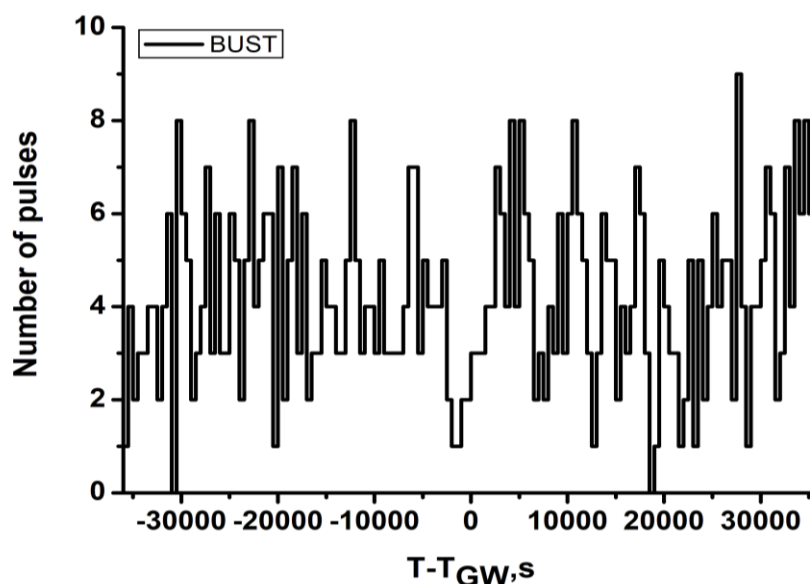


Рисунок 11.3 – Скорость счета одиночных импульсов в детекторе БПСТ, измеренная во временных интервалах длительностью 500 с

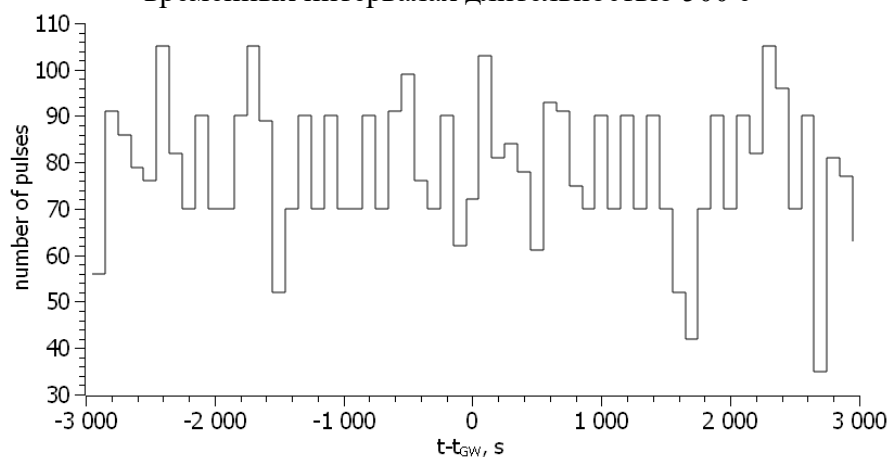


Рисунок 11.4 – Скорость счета импульсов в детекторе АСД, измеренная во временных интервалах длительностью 100 с

На рисунке 11.5 представлены скорости счёта совпадений одиночных импульсов в детекторах LVD (для детектора целиком, его внутренних и внешних счётчиков и для каждой башни отдельно) и БПСТ. Значения скорости счёта совпадений определялись во временных интервалах длительностью 500 с. Из рисунка видно, что значения скорости счёта совпадений одиночных импульсов не имеют значительных отклонений от их средних значений.

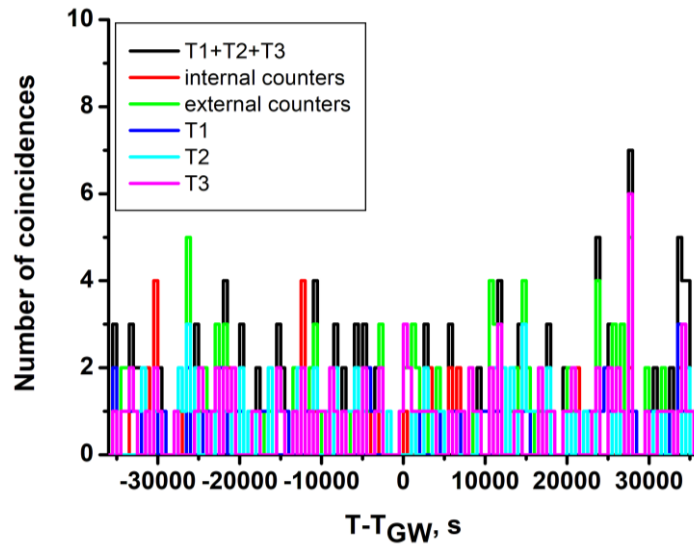


Рисунок 11.5 – Скорости счета совпадений одиночных импульсов в детекторах LVD и БПСТ, измеренные во временных интервалах длительностью 500 с

Большинство совпадений одиночных импульсов наблюдается в третьей башне LVD. В течение 1000 с после регистрации гравитационной волны наблюдается кластер из 5 совпадений одиночных импульсов в БПСТ и T3 LVD. Длительность кластера составляет 477 с, первое совпадение в кластере обнаружено на 266 с позже времени регистрации гравитационной волны GW170817.

12. Разработка детектора HALO+1kt на основе свинцовой мишени с регистрацией нейтронов, с возможностью определения типов нейтрино для уточнения моделей сверхновых (Задача № 12)

12.1. Варианты разрабатываемого детектора

Массивный Pb-He детектор HALO-1kt представляет собой развитие идей 80-тонного свинцово-гелиевого детектора в Лаборатории Садбери. Основная цель эксперимента LVD, находящегося в низкофоновой Лаборатории Гран Сассо, на глубине 3300 м в.э., поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года. Масса мишени детектора – 1 кт железа и 1 кт сцинтиллятора (C_nH_{2n} , $\langle n \rangle = 9,6$). Установка имеет модульную структуру: 840 счетчиков сгруппированы в три башни, в каждой по 5 колонн и 7 уровней.

Рассматривается два варианта конструкции нового Pb-He детектора. Первый – отдельно стоящий детектор HALO-1kt с независимой электроникой и собственным триггером (рисунок 12.1).

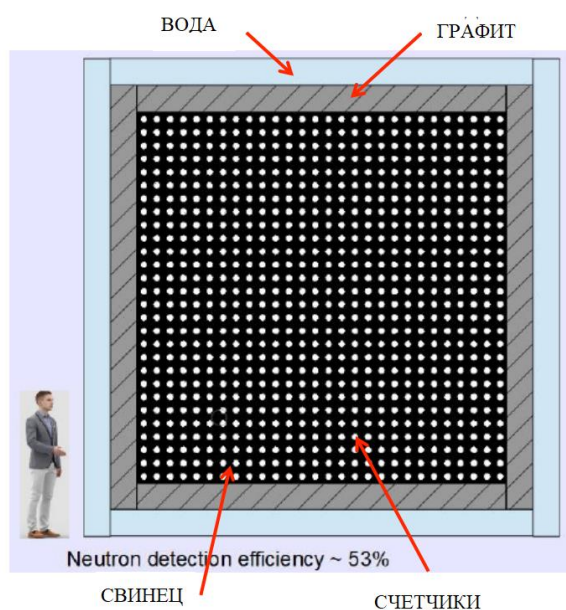


Рисунок 12.1 – Схема установки HALO+1kt (первый вариант)

Детектор будет состоять из свинцового ядра размером $4,33 \times 4,33 \times 5,5 \text{ м}^3$ с массивом гелиевых детекторов $28 \times 28 \times 5,5 \text{ м}$ при давлении 1,16 атм. Графитовый отражатель и 30 см слой воды будет защищать детектор от фона.

Преимуществами разрабатываемого детектора являются значительно большая масса и его работа в параллель (независимо) с детектором LVD. Моделированием будет изучаться отклик детектора на вспышку сверхновой и проводиться исследование фона от

взаимодействия мюонов в грунте, окружающем детектор и фона естественной радиоактивности.

Второй вариант – установка блоков детектора HALO-1kt внутри структуры LVD (рисунок 12.2). Тогда счетчики LVD будут играть роль и пассивной защиты фона естественной (нейтроны из грунта) и, активной защиты, космогенного (мюоны и продукты их взаимодействий) происхождения. Свинцовый блок с размерами $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$ покидают больше 50% нейтронов, образуемых с энергией 1 МэВ в точках, равномерно распределенных по объему свинца. Около половины из них захватываются в окружающих сцинтилляционных счетчиках. Расчетом будет определено местоположение в структуре LVD, конфигурация, размеры свинцовой мишени, а также необходимость включения ее состав замедляющих нейтроны материалов (полиэтилен), при которых будет получена максимальная суммарная (по гелиевым и сцинтилляционным счетчикам) эффективность регистрации нейтронов. Объединение электронных каналов свинцово-гелиевого детектора и LVD позволит получить качественно новую, комплексную установку, одновременно регистрирующую и нейтринную и антинейтринную компоненты излучения, сравнительный анализ которых может дать дополнительную информацию о взрыве сверхновой типа II.

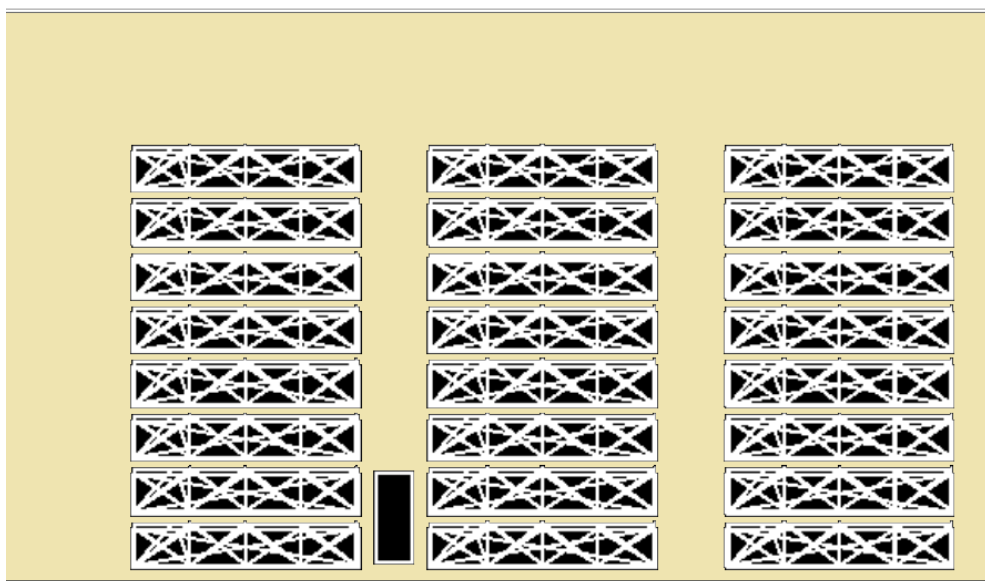


Рисунок 12.2 – Схема расположения детектора внутри LVD

Следует отметить, что коллектив исполнителей располагает необходимым количеством свинца (около 1 кт), освободившегося из эксперимента OPERA; гелиевые счетчики (около 700 метров 2-х и 3-х метровые трубки) может предоставить коллаборация HALO.

Предварительные оценки показывают, что в 1kt-тонной свинцовой мишени Pb-3He детектора произойдет около 1200 взаимодействий нейтрино со свинцом, из числа которых примерно 480 будут зарегистрированы по выходу нейтронов. Таким образом будет получена информация о доле электронных нейтрино в потоке нейтрино и энергетическом спектре электронных нейтрино.

Моделирование взаимодействия нейтрино представляет собой трудную задачу из-за небольшого количества экспериментальных [78] и расчетных данных о сечениях взаимодействия нейтрино с ядрами грунта, окружающего детектор. С хорошей точностью сечения взаимодействия нейтрино с железом были получены в работе [79, 80].

12.2. Моделирование захватов нейтронов, рожденных в свинце, в LVD

На первом этапе моделирования с применением пакета Geant4 исследована способность нейтронов, рожденных в грунте, достичь установки LVD и захватиться ядрами железа детектора. Будет получена максимальная толщина слоя грунта, которую может пройти нейтрон до захвата. При моделировании транспортным кодом Geant4 использована геометрия установки LVD, включала в себя реальные размеры установки, массу материалов (сцинтиллятор, железо, пластик, окружающий грунт).

С помощью Монте-Карло моделирования мы провели расчет с 50000 испарительных нейтронов из свинца (расположенных между первой и второй башней LVD).

Записывались энергия и время вылета нейтрона из свинца, начальные энергия и координаты нейтрона данные о захватах (включая место рождения и начальные свойства захваченного нейтрона), и также энерговыделения в счетчиках.

Из 50000 разыгранных рожденных нейтронов в свинце осталось в нем и, следовательно, захватилось в свинце сразу – 6842. Всего захватов нейтронов во всех материалах 50148. (Т.е. некоторые нейтроны размножились.) Число нейтронов, захваченных в свинце – 7553, в сцинтилляторе – 17533, в железе – $9478 + 5159 = 14637$.

Таким образом, $7553 - 6842 = 711$ нейтронов, это захваты нейтронов, которые отразились от стенок установки и вернулись обратно в свинец. Из «вылетевших» из свинца нейтронов: $50000 - 6842 = 43158$, 1,65 % захватилось из вернувшихся. Их энергетический спектр представлен на рисунке 12.3.

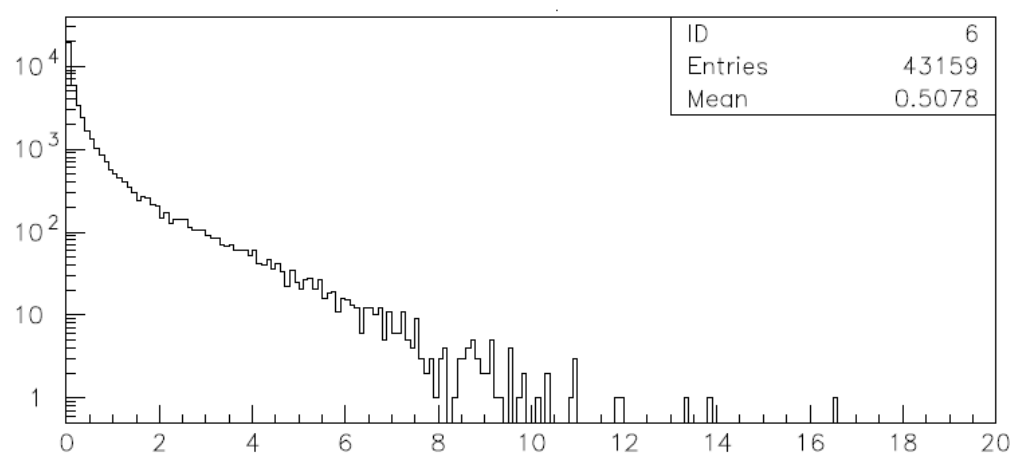


Рисунок 12.3 – Энергетический спектр нейтронов

13. Поиск космических гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ по данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. (Задача № 13)

13.1. Результаты эксперимента TAIGA

На сцинтилляционной установке TAIGA-GRANDE, создающейся для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней, выполнены исследования потоков гамма-квантов высоких энергий. Получены ограничения на диффузный поток гамма-квантов высоких энергий. Продолжены работы по расширению установки TAIGA-GRANDE.

13.2. Результаты эксперимента LHAASO

В 2022 г. были опубликованы две обзорные статьи, посвященные первым результатам эксперимента LHAASO [81 – 82], опубликованным в 2021 г. Благодаря выдающимся параметрам основной установки LHAASO - Km²A, площадью более 1 кв. км, даже при использовании лишь работавшей ее части, уже удалось получить результаты мирового уровня в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Были открыты ПэВатроны в нашей Галактике, определены их координаты и измерены энергетические спектры гамма-квантов. В таблице 13.1, воспроизводимой из работы [82], показаны обнаруженные в эксперименте LHAASO гамма-источники, их значимость, максимальные зарегистрированные энергии и имеющиеся известные астрофизические объекты в их окрестности. Следует обратить внимание на то, что в окрестностях только четырех из 12 найденных источников, обнаружены остатки сверхновых звезд.

Таблица 13.1 – Новые источники астрофизических гамма-квантов, открытых LHAASO

Источник	Достоверность, σ при $E > 100$ ТэВ	Время наблюдения, ч	E_{max} , ПэВ	Объекты в окрестности
LHAASO J0534+2202	17,8	2236,4	0,88	Crab, PSR
LHAASO J1825–1326	16,4	1149,3	0,42	2 PSR
LHAASO J1839–0545	7,7	1614,5	0,21	2 PSR
LHAASO J1843–0338	8,5	1715,4	0,26	SNR
LHAASO J1849–0003	10,4	1865,3	0,35	PSR, YMC
LHAASO J1908+0621	17,2	2058,0	0,44	2 PSR, SNR
LHAASO J1929+1745	7,4	2282,6	0,71	2 PSR, SNR
LHAASO J1956+2845	7,4	2461,5	0,42	PSR
LHAASO J2018+3651	10,4	2610,7	0,27	PSR, YMC
LHAASO J2032+4102	10,5	2648,2	1,42	Cygnus OB2, PSR, YMC
LHAASO J2108+5157	8,3	2525,8	0,43	—
LHAASO J2226+6057	13,6	2401,3	0,57	Boomerang Nebula, PSR, SNR

Измеренный спектр гамма-квантов от Крабовой туманности в широком диапазоне энергий от 0,3 ТэВ до 1,6 ПэВ хорошо аппроксимируется степенным спектром с дифференциальным показателем $3,12 \pm 0,03$. Было показано, что по крайней мере в некоторых источниках, работает адронный механизм ускорения, а это означает, что такие источники являются и источниками космических лучей с энергиями вплоть до 15-20 ПэВ.

14. Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO (Задача № 14)

14.1. Результаты эксперимента TAIGA

В дополнение двум действующим узкоугольным атмосферным черенковским телескопам изображения TAIGA-IACT осенью 2022 года был успешно произведен физический пуск третьего телескопа TAIGA-IACT. На рисунке 14.1 показана фотография третьего телескопа в эксперименте TAIGA. 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 XP1911B с конусом Винстона. Полный угол обзора (FoV) всей камеры составляет $9,6^\circ$, а угол обзора каждого пикселя – $0,36^\circ$. На рисунке 14.2 представлены результаты измерений потоков гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой Крабовидной туманности. Статистическая значимость составляет $\sim 11 \sigma$.



Рисунок 14.1 - Третий телескоп TAIGA-IACT в эксперименте TAIGA

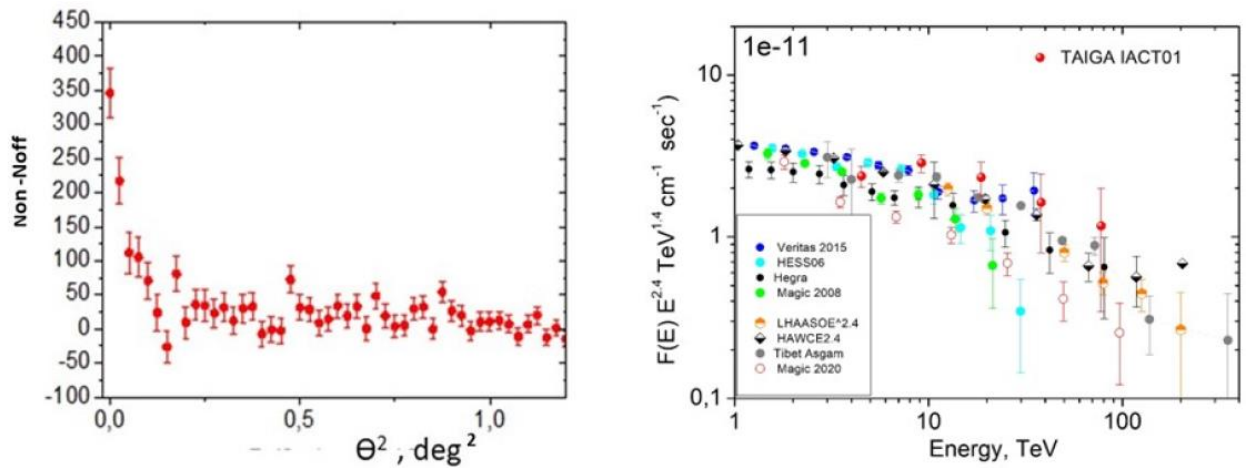


Рисунок 14.2 - Результаты измерения потока гамма-квантов высоких энергий от Крабовидной туманности

Продолжены работы по разработке телескопа TAIGA-IACT с камерой изображения на основе кремниевых фотоумножителей.

14.2. Результаты эксперимента LHAASO

В 2022 г. были опубликованы 2 главы LHAASO Science Book [83, 84], в которых подробно описаны все установки обсерватории, применяемые методы исследований и физика решаемых задач.

По измеренным потокам астрофизических гамма-квантов были получены лучшие в мире верхние пределы на гипотетическое нарушение Лоренц-инвариантности [85] и на гамма-кванты от распада частиц темной материи с массой $10^5 - 10^9$ ГэВ. Результаты этой работы приведены на рисунке 14.3, взятом из работы [86]).

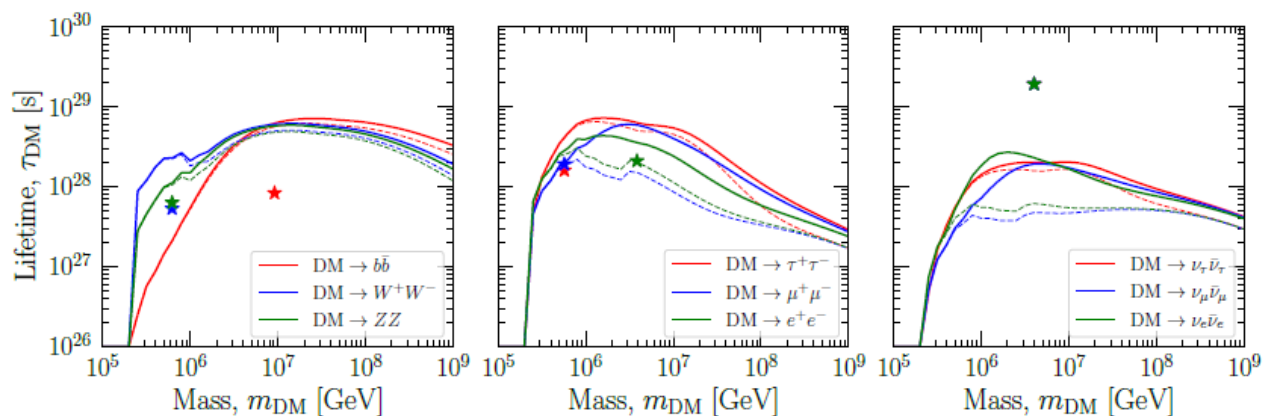


Рисунок 14.3 – Ограничения на время жизни тяжелых частиц темной материи в эксперименте LHAASO.

Кривые – ограничения для различных мод распада, звездочки – ограничения IceCube HESE.

Как видно из рисунков, представленные результаты значительно превосходят полученный ранее результат эксперимента IceCube HESE.

В 2022 г. была подготовлена и опубликована статья по параметрам «имиджа» ливней, измеренных черенковским телескопом установки WFCTA.

15. Поиск солнечных адронных аксионов (Задача № 15)

Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов, возникающих при тормозном излучении, комптоновских и атомных процессах, выраженная в единицах $\text{атом}^{-1}\text{с}^{-1}$ может быть представлена как:

$$R_A = 3.53 \times 10^{-12} g_{Ae}^2 m_A^2 (p_A/p_\gamma)^3$$

Количество зарегистрированных γ -квантов, следующих за поглощением аксиона, определяется массой мишени, временем измерений и эффективностью регистрации детектора, в то время как вероятность наблюдения пика с энергией 9,4 кэВ зависит от уровня фона экспериментальной установки. Для регистрации рентгеновских и γ -квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих в результате разрядки возбужденного уровня с энергией 9,4 кэВ, использовался большой медный пропорциональный счетчик, заполненный криптоном, обогащенным по изотопу ^{83}Kr до 99,9%. Рабочий объем счетчика составляет 8,77 л, давление газа — 1,8 ат. Масса изотопа ^{83}Kr в рабочем объеме 58,5 г. Счетчик окружен пассивной защитой из меди (20 см), свинца (20 см) и полиэтилена (8 см). Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей снижен более чем в 107 раз по сравнению с поверхностью. На данный момент набрана суммарная статистика за 865 сут измерений.

В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с электроном и нуклонами $|g_{Ae}(g_{AN\ 3} - g_{AN\ 0})| \leq 1,50 \times 10^{-17}$ (90 % у.д.), которое соответствует новым ограничениям на массу аксиона $m_A \leq 320$ эВ и $m_A \leq 4,6$ эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

Параллельно идет разработка эксперимента с пропорциональными счетчиками из стального корпуса — в данном случае корпус детектора (содержание F-57 ~2%) является мишенью для аксионов. Гамма-кванты с энергией 14,4 кэВ, излучаемые ядрами Fe-57 после снятия возбуждения, вызванного поглощением аксионов, будут регистрироваться в рабочей области счетчиков.

16. Развертывание и эксплуатация установки Ковер-3 (Задача № 16)

Расширение наземной части установки осуществлялось путем увеличения количества ВПР, которые сосредоточены преимущественно вокруг и над подземным МД. Актуальная схема расположения ВПР установки показана на рисунке 16.1, а их несимметричное расположение связано с особенностями рельефа. Новые ВПР состоят из девяти счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, расположенного в виде квадрата 3×3 с общей эффективной площадью 9 м^2 . Счетчики располагаются в специально построенных помещениях, сделанных из сэндвич-панелей толщиной 5 сантиметров. Для сборки новых счетчиков использовался сцинтиллятор марки СЦ-201, который изготавливался по заказу БНО в Институте физики высоких энергий, Протвино. Питание ФЭУ всех счетчиков осуществляется с помощью общего прецизионного программируемого высоковольтного источника Мантигора НТ-2000N. Делитель напряжения каждого счетчика ФЭУ оборудован потенциометром, установленным между 2 и 3 диодами ФЭУ, с помощью которых была выполнена настройку коэффициентов усиления ФЭУ выносных пунктов регистрации. Анодные сигналы с каждого счетчика по кабелю РК-50 длиной 8 метров поступают на входы активного сумматора, на двух выходах которого разветвляется суммарный импульс, один из которых по кабелю РК-50 длиной 120 метров поступает в аппаратный зал на систему сбора и хранения данных установки «Ковер-3», для оцифровки сигналов.

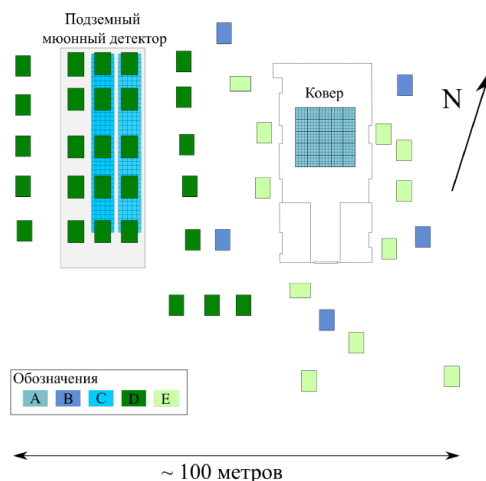


Рисунок 16.1 - Схема установки «Ковер-3».

А – установка «Ковер», 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора; В – старые выносные пункты регистрации со счетчиками на основе жидкого сцинтиллятора; С – подземный мюонный детектор, 410 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора; D и E – новые выносные пункты регистрации со счетчиками на основе пластического сцинтиллятора: D – укомплектованы и готовы к работе, E – в стадии комплектации

В рамках модернизации МД было собрано 235 новых счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, 35 из них были установлены в средний туннель МД, а оставшиеся 205 были установлены в первом туннеле. Таким образом, были полностью укомплектованы два туннеля МД, что соответствует общей площади 410 м². Каждый новый счетчик оборудован фотоэлектронным умножителем ФЭУ-173, делителем напряжения и временным дискриминатором со следящим порогом. Последний используется для точной временной привязки сработавших счетчиков МД, с их помощью можно будет отбирать маломюонные ливни, которые с высокой долей вероятности могут являться фотонными ШАЛ. Также для нового мюонного детектора установки “Ковер-3” была создана система сбора данных, на базе оборудования фирмы CAEN, к которой подключены 235 новых счетчиков МД и 175 счетчиков установки “Ковер-2”. На данный момент со всей площади 410 м² ведется набор данных в тестовом режиме.

Для обработки анодных сигналов с выносных пунктов регистрации (ВПП) установки “Ковер-3” была разработана и создана новая система сбора и хранения данных. Анодные сигналы с сумматоров ВПП предварительно поступают на линейный разветвитель. Разветвитель представляет собой устройство, на вход которого поступают анодные сигналы, а на его выходах дублируются входные сигналы, причем сигналы на выходах имеют такую же амплитуду, что и на входе. Разветвлённые сигналы поступают на систему измерения временных задержек и на систему измерения энерговыделения, которые расположены в общем крейте стандарта VME. Система измерения временных задержек состоит из временного дискриминатора со следящим порогом, который позволяют производить временную привязку с высокой точностью, в широком диапазоне амплитуд. В крейте установлено четыре платы фирм, каждая имеет 16 входных анодных сигналов, а на выходе дискриминатора формируются логические импульсы стандарта ECL, передающиеся на время-цифровой преобразователь (ВЦП) для измерения относительных временных задержек между сработавшими ВПП. Система измерения энерговыделения состоит из аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые оцифровывают анодные сигналы с ВПП, что позволяет вычислять заряд, который эквивалентен энерговыделению в ВПП. Для работы вышеперечисленного оборудования было разработано программное обеспечение на языке Си, которая осуществляла настройку, контроль работы и считывание данных из внутренней памяти ВЦП и АЦП. На данный момент программа работает в режиме, дублирующем работу установки “Ковер-2”. Ведется подключение ВПП к новой системе сбора данных, анализ получек данных и разработка алгоритмов восстановления параметров ливня для новой конфигурации установки.

17. Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок Ковер-3, TAIGA, LHAASO, и Telescope Array (Задача № 17)

17.1. Исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей на установке TAIGA.

Эксперимент TAIGA включает в себя две широкоугольные черенковские установки Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT, а также сцинтилляционную установку TAIGA-GRANDE. На рисунке 17.1 представлена общая схема эксперимента TAIGA.

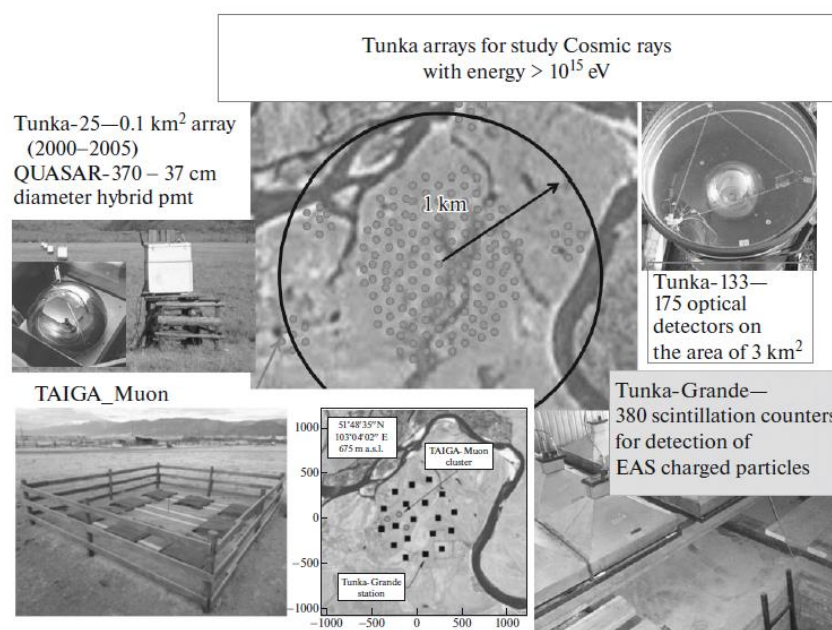


Рисунок 17.1 - Общая схема эксперимента TAIGA

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. Результаты измерений массового состава и энергетического спектра космических лучей в диапазоне энергий $\sim 10^{14} \div \sim 10^{18}$ эВ, выполненных на установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE, показаны на рисунке 17.2. Результаты довольно 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-TOP, PAO (Pierre Auger Observatory) и TA (Telescope Array).

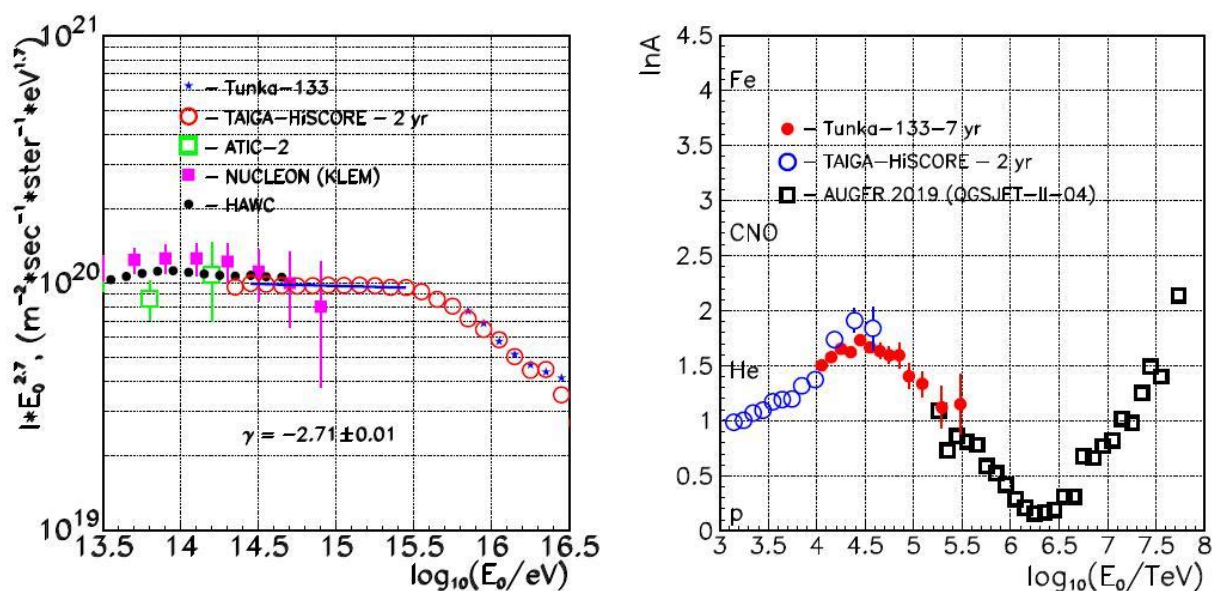


Рисунок 17.2 - Энергетический спектр и массовый состав космических лучей, измеренный на широкоугольной черенковской установке TAIGA-HiSCORE

17.2. Создание российско-китайской установки ENDA-LHAASO.

Три работающих в тестовом режиме прототипа установки ENDA-LHAASO дают непрерывный поток научной информации, которая оперативно анализируется и сравнивается. В текущем году были проведены исследования влияния влажности грунта на выход из него нейтронов. Была опубликована статья [87], с описанием проведенных измерений. Как и ожидалось, снижение выхода нейтронов в сезон дождей не превышает ~10%, что не может существенно повлиять на результаты эксперимента ENDA, тем более что данные будут усредняться за несколько лет наблюдений.

Целью этих работ является проверка параметров установки и отладка системы сбора данных и онлайн программ. Для этих целей было создано 3 прототипа по 1 кластеру из 16 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторы), разработанных в ИЯИ РАН и способных регистрировать две главные компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Один из прототипов (ENDA-INR) работает в Москве на территории ИЯИ РАН, а два других работают в условиях высокогорья: в месте проведения эксперимента LHAASO и в Тибете в Тибетском университете. Проводится сравнение данных, получаемых на прототипах при существенно различной высоте наблюдения, а также проводятся работы по изучению метеопараметров на показания детекторов.

Поскольку прототипы все еще работают в тестовом режиме, на них отлаживается система сбора данных и вносятся коррективы в онлайн программы. Поскольку все импульсы детекторов оцифровываются с помощью многоканальных флэш-АЦП, то при

отборе сигналов онлайн программа должна анализировать форму сигналов, выделять сигналы от захвата нейтронов в сцинтилляторе, а также отбраковывать возможные помехи и наводки. Это процедура совершенствуется.

В 2022 г. была проведена модернизация расчетных программ и программ обработки данных, включающая совершенствование алгоритма поиска оси ШАЛ, использование нейронных сетей для выделения сигналов от захвата нейтронов в детекторе и переход на распределенные многопроцессорные расчеты для ускорения проводимых расчетов. Подготовлена и принята в печать статья [88], в которой с помощью программы машинного обучения был разработан и добавлен в онлайн программу алгоритм отбора нейтронных импульсов, что позволило существенно повысить достоверность получаемой информации.

В 2022 г. была проведена модернизация расчетных программ, включающая совершенствование алгоритма поиска оси ШАЛ, использование нейронных сетей для выделения сигналов от захвата нейтронов в детекторе и переход на распределенные многопроцессорные расчеты для ускорения проводимых расчетов.

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 результате были внесены изменения в онлайн, программу, выполнен анализ полученных данных и предложена дальнейшая корректировка системы сбора данных.

Для сравнения измеренных и ожидаемых параметров установок проводится компьютерное Монте-Карло моделирование с помощью пакетов CORSIKA и GEANT всех рассматриваемых конфигураций эксперимента с учетом геометрии установки, высоты наблюдения и др.

18.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 исследования фрагментационной области генерации частиц; и моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях (Задача № 18)

18.1. 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 развития ШАЛ с учетом 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 рентгеноэмulsionными камерами (РЭК).

18.2. Программный пакет FANSY 2.0

В связи с вышеизложенным 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.

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

$$\sigma_{\varphi}^{CPG}(y) = \sigma_{\varphi 0}^{CPG} \cdot (|y_2/y|)^{\beta},$$

определяющим стандартное отклонение азимутального угла вектора поперечного импульса от плоскости компланарности в зависимости от быстроты (рапидити) 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» [94], и, соответственно). Кроме того, получены соответствующие значения параметров для версии «2D», моделирующей процесс КГЧ в двухмерном пространстве [95]. Значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 18.1 – 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
$\sigma_{\varphi 0}^{CPG}$	0.10	0.09	0.05	0.01
$\beta_{\varphi 0}^{CPG}$	1.0	0.8	0.25	0.05
y_{thr}^{CPG}	3.7	2.9	2.5	2.0

19. Исследование возможной связи между коллайдерным «ridge» эффектом и компланарной генерацией частиц в космических лучах на основе анализа экспериментальных и расчетных данных по азимутальным эффектам (Задача № 19)

19.1. Необходимость изучения фрагментационной области

Основную роль в развитии ШАЛ от частиц ПКИ играют частицы из т.н. фрагментационной области ($x_F \approx p/p_0 \gtrsim 0,01$). Но эксперименты на БАК (ALICE, ATLAS, CMS) получают данные, в основном, по характеристикам центральной кинематической области взаимодействий адронов ($\eta \lesssim 3$). Эксперимент LHCf даёт информацию о характеристиках только нейтральных частиц (n , K , γ) в области больших x_F . Экспериментальные данные по взаимодействиям π и K мезонов, которые также играют существенную роль в развитии ШАЛ, получены при низких энергиях ($\sqrt{s} \lesssim 35$ ГэВ).

В экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК) на уровне гор и в стратосфере была обнаружена [89 - 92] 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: 1) относительно традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий, связывающих эффект с образованием лидирующих систем [96 - 99] или с угловым моментом кварк-глюонной струны [100], подразумевающие большие поперечные моменты в плоскости компланарности; 2) гипотеза, постулирующая переход размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях от трех к двум измерениям ($3D \leftrightarrow 2D$) [93].

Прямые исследования во фрагментационной области при сверхвысоких энергиях в настоящее время возможны только в космических лучах, а на БАК этому мешают конструктивные особенности коллайдеров. Поэтому 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 ($|\eta| < 2,4$) при $|\Delta\phi| \sim 0$ и $|\Delta\eta| < 4$. В рамках FANSY 2.0 near-side «ridge» эффект является побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц.

19.2. Экспериментальные данные и сигнатура пространства

Теоретические модели [96 - 100], объясняющие КГЧ в фрагментационной области в рамках ядерно-физических концепций, почти неизбежно требуют большие значения поперечных импульсов, что противоречит данным LHC. С феноменологической точки зрения наиболее подходящим является предположение об уменьшении размерности пространства [93]. Предположим, что при энергиях взаимодействия адронов $\sqrt{s} \sim 7$ ТэВ очень высокая кратковременная пространственно-временная плотность энергии вызывает флуктуационный переход трёхмерного состояния в двухмерное и обратно ($3D \leftrightarrow 2D$). Время существования τ_{2D} и размеры этой локальной области, $L_{2D} \sim c \cdot \tau_{2D}$ (где c – скорость света), неизвестны. Рассмотрим экспериментальные возможности оценки этих параметров, исходя из того, что при генерации частиц прямо рождаются как стабильные частицы, так и резонансы с малыми временами жизни, которые затем распадаются.

Частицы, родившись в 2D пространстве, разлетаются компланарно, «помня» свою историю. Резонансы могут распадаться (например, $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, $\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$) ещё в 2D пространстве, если их время жизни $\tau = \tau_0 \cdot \gamma L \lesssim \tau_{2D}$ (где γL – Лоренц-фактор адрона), так и в 3D пространстве, если $\tau > \tau_{2D}$. Моделирование показывает, что экспериментальная и расчетная функции двухчастичных корреляций в области «ridge» эффекта близки друг к другу при "копланаризации" в области быстрот $y \gtrsim 3$ [94]. Легко оценить, что при $|y| \sim 3$ и $E=17,5$ ГэВ для ρ , ω , η и π^0 мезонов имеем $\tau \sim 10\text{-}22$, $10\text{-}21$, $10\text{-}17$ и $10\text{-}14$ сек, соответственно, что задаёт масштабы временных интервалов, где возможны изменения в поведении компланарности. Рисунок 19.1 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, $3 \lesssim |\eta, y| \lesssim 10$, $x_F \gtrsim 0,01$ на LHC), для получения информации о каналах рождения, энергии и импульсах и угловых характеристиках резонансов; заряженных частиц; гамма-квантов, а также осуществления полного кинематического анализа каждого взаимодействия и восстановления кинематической истории распадов нестабильных частиц.

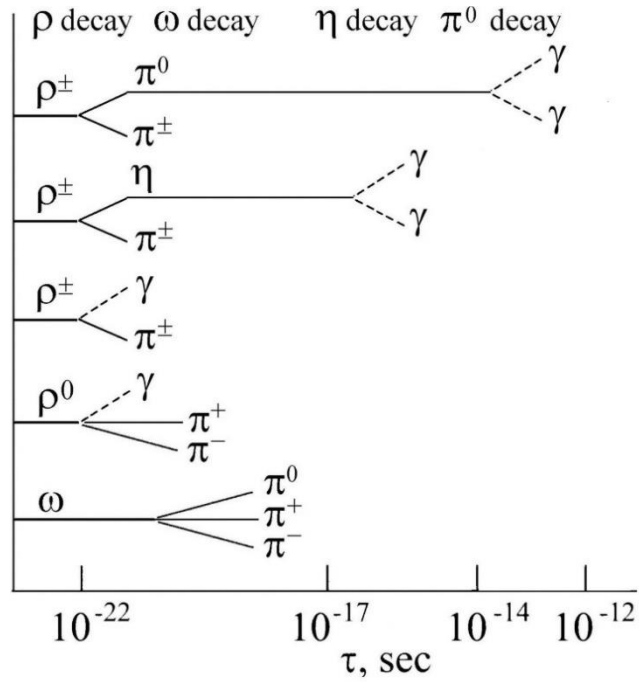


Рисунок 19.1 – Примерные временные масштабы некоторых каналов распадов первичных резонансов ($\rho^{\pm,0}$, ω) и последующих распадов вторичных частиц при $|y| \sim 3$

При различных значениях τ_{2D} высокую компланарность могут иметь 1) ρ и ω резонансы (и другие адроны прямой генерации) при $\tau_{2D} \lesssim 10^{-22}$ сек; 2) η мезоны (дополнительно к ρ и ω) при $\tau_{2D} \lesssim 10^{-16}$ сек; 3) дополнительно π^0 мезоны при $\tau_{2D} \lesssim 10^{-14}$ сек; 4) дополнительно, γ -кванты при $\tau_{2D} \gtrsim 10^{-14}$ сек.

Отметим, что, в рамках концепции изменения размерности пространства, как минимум, первый случай уже имеет место. На возможность четвертого случая намекают характеристики стратосферного события «JF2af2» [97] (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 ($\lesssim 10^{-10}$).

20. Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов (Задача № 20)

В работе [101] был опубликован результат регистрации троекратного возмущения ионосферной задержки, измеряемой путём использования 6 - канальных одночастотных коммерческих спутниковых часов GPS170PCI. А также последующего электрического разряда, интерпретируемого как подземный.

В 2022 году опубликована статья с подробным аналитическим описанием механизма формирования вариаций мюонов, регистрируемых установкой «Ковёр» под разными углами. В ней обосновывается процедура измерения характеристик электрического поля в радиусе до 30 км по регистрируемым вариациям интенсивности частиц. Калибровка метода осуществлялась по темпу счёта интенсивности мюонов с пороговым значением 100 МэВ и известному соотношению положительных и отрицательных мюонов с энергией более 1 ГэВ на уровне земли. Верификация состояла в сравнении восстановленных по вариациям мюонов характеристик приземного поля с известными из прямых измерений значениями. (см. таблицу 20.1 и 20.2).

Таблица 20.1 – Вычисленные коэффициенты регрессии мюонов с регулярными параметрами атмосферного поля для эффективного граничного зенитного угла 65° (экранировка горами)

Порог энергии	$A_{DR} \cdot 10^3$ %/ (кВ/м)	$B_{DR} \cdot 10^6$ %/ (кВ/м) ²	$B_{\sigma DR} \cdot 10^5$ %/ (кВ/м) ²	$A_\Phi \cdot 10^2$ %/ МВ	$B_\Phi \cdot 10^5$ %/ (МВ) ²
100 МэВ	-1,53(1±0,19)	-9,73(1±0,10)	-2,67(1±0,28)	1,73(1±0,19)	3,93(1±0,10)
1100 МэВ	-0,533(1±0,19)	-2,83(1±0,10)	-0,479(1±0,28)	0,91(1±0,10)	2,62(1±0,10)

В таблице 20.1 A_{DR} и B_{DR} – коэффициенты при линейном и квадратичном членах регрессии интенсивности мюонов со средней напряжённостью в области атмосферы ниже локального заряда. $B_{\sigma D}$ - коэффициент регрессии с пространственной дисперсией этого поля. A_Φ - коэффициент линейной регрессии с разностью потенциалов в тропосфере. B_Φ - коэффициент квадратичной регрессии с разностью потенциалов в тропосфере.

Таблица 20.2 – Оценённые параметры потока регистрируемых мюонов и характеристик приземного поля.

η_D 0,1-1 ГэВ	h_{ef}	D_0	k_D	$D_{R\,ev}$ кВ/м	m_σ	$\sigma_{R\,ev}$ кВ/м
1,173(1±0,04)	3,3(1±0,27) км	±3 кВ/м	5,3(1±0,19)	±16	1,7(1±0,13)	±27 кВ/м

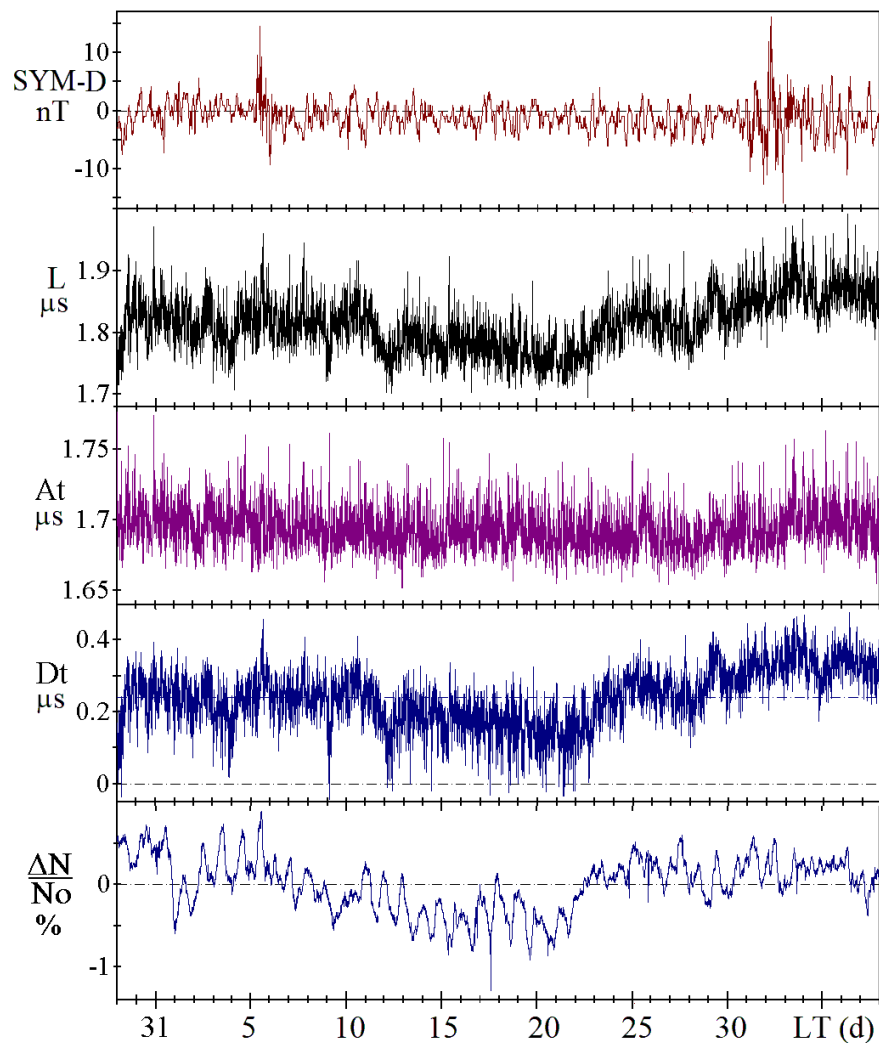
Пояснения к таблице: η_D – отношение интенсивностей мюонов разного знака в области энергий 100-1000 МэВ. h_{ef} – эффективная высота расположения локального заряда в атмосфере в грозовой период (в км от уровня моря), D_0 – Измеренное характерное значение измеряемой приземной напряжённости во время гроз. k_D – эффективное значение коэффициента связи приземной напряжённости и усредненного по высоте значения напряжённости в области ниже уровня локального заряда. D_R - характерное среднее по пространству значение амплитуды напряжённости поля в атмосфере в области под локальным зарядом. m_σ – значение коэффициента связи усредненной по высоте напряжённости и среднего стандартного отклонения для области ниже уровня локального заряда. σ_R - характерное среднее по пространству значение дисперсии поля под локальным зарядом.

На установке «Ковёр» данный метод позволяет измерять усреднённую по азимуту разность потенциалов между границами тропосферы в радиусе до 30 км. Зарегистрированные быстрые (менее минуты) скачки интенсивности мюонов разной величины (в относительных единицах) для разных областей спектра амплитуд их энерговыделений в детекторах, обычно соответствуют молниевым грозовым разрядам. В случаях их регистрации в хорошую погоду интерпретируются как подземные.

В докладе [102], по периоду 40 суток с 29072021 по 06092021, проводился анализ корреляции вариаций задержки с интенсивностью жёсткой компоненты, регистрируемой установкой. Получена экспериментальная оценка коэффициента регрессии задержки радиосигналов со спутников GPS, регистрируемой стандартными часами точного времени (GPS170PCI) (L), относительно вариаций интенсивности жёсткой компоненты (N_μ). Значение: $A_{L/N_\mu} = 119,8 \cdot (1 \pm 0,012)$ нс/%, коэффициент корреляции $0,26 \cdot (1 \pm 0,008)$.

Показана невозможность аппаратного происхождения такой связи, определяемой, например, дрейфом температуры в аппаратном зале. Для выяснения этого обстоятельства был проведён анализ процесса измерения временного интервала (задержка L) затраченного на считывание точного времени системой спутниковых часов GPS170PCI. Были выделены аппаратная и динамическая составляющие этой задержки. Аппаратная (A_t) является случайной величиной с квазистационарными параметрами. Динамическая (D_t) случайная

величина, определяемая разницей между реальной ионосферной задержкой и прогнозируемой по технологии GPS навигации. На рисунке 20.1 демонстрируется график задержки L (2-я панель сверху), её составных частей At (3-я панель сверху) и Dt (4-я панель сверху), в сравнении с вариациями интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ, поправленной на вариации давления и коэффициента усиления электронного сигнала регистрации.

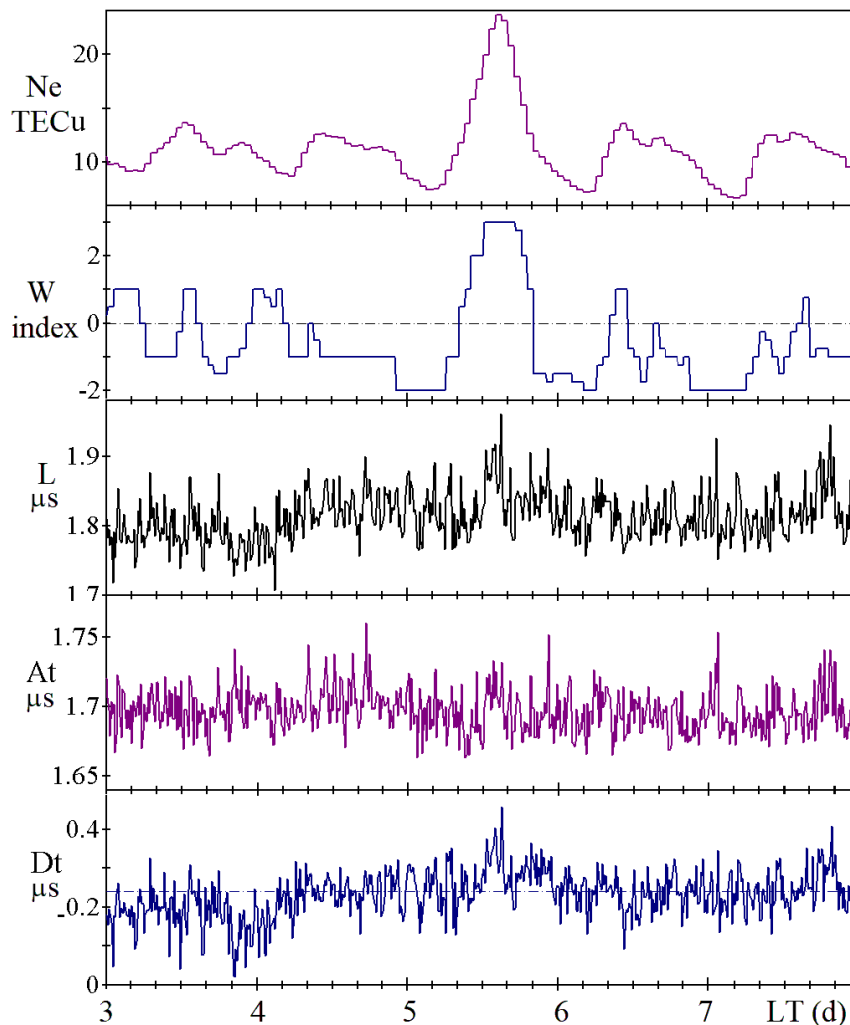


Описание сверху вниз. 1я панель: Y - компонента дипольной части приземного геомагнитного поля, скважность - 1 час. 2я панель: Задержка L - время на получение сигнала точного времени от системы спутников GPS (L). 3я панель: Аппаратная составляющая задержки L. 4я панель: Динамическая составляющая задержки L – разница реальной ионосферной задержки и прогнозируемой по технологии GPS. 5я панель: Вариации измеряемой полной интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ
 Рисунок 20.1 – По оси абсцисс – период с 29 июля по 6 сентября 2019г. По оси ординат вариации геофизических параметров. Везде, где не указано специально, 1 точка графика соответствует среднему значению параметра за 12 минут

На верхней панели приведён график Y - компоненты дипольной части приземного геомагнитного поля, характеризующей всплеск меридиональных токов в ионосфере,

сопутствующие магнитным бурям. Из сравнения графиков, становится очевидным, что вариации задержки L , имеющая среднее значение 1,8 мкс почти полностью определяются вариациями Dt со средним значением 0,24 мкс. Основная часть задержки, имеет аппаратное происхождение, среднее значение A_t – 1,7 мкс. При выводе соответствующих формул пересчёта использовался принцип минимизации дисперсии величины аппаратной задержки A_t , на протяжении всего периода наблюдения. Так же, использовалась зависимость среднеквадратичного разброса, в каждом секундном интервале, для ионосферной относительной задержки $\sigma_\tau = 0,81 \cdot Dt$. Которая экспериментально оценена из значений коэффициентов регрессии параметра L и σ_L , с параметрами N_e , W , N_μ вычисленные по измеренным значениям для каждого из 24 случаев анализа периода одного и того же часа местного времени взятых у всех 40 суток. Возможность выделения аппаратной части задержки A_t , с квазистационарными свойствами, не коррелирующей с вариациями мюонов доказывает несостоятельность гипотезы аппаратного происхождения вариаций временного интервала (L) затраченного на считывание точного времени системой спутниковых часов GPS170PCI. Вариации небольшой амплитуды аппаратной задержки можно объяснить местными условиями, формирующими качество принимаемого сигнала и дефицитом спутников в конусе приёма антенны. Из анализа графика Dt , следует: среднее значение разницы реальной и прогнозируемой по технологии часов GPS170PCI ионосферной задержки, 240 нс. Амплитуда медленных вариаций $\pm 50\%$, что суммарно не укладывается в заявленную в описании к часам точность.

На рисунке 20.2 представлены графики параметров периода магнитной бури, во время которого, по возмущению полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС) (верхняя панель), была произведена оценка коэффициента связи (калибровка) амплитуды её возмущения с амплитудой возмущения задержки L (3-я панель сверху). На 4-й и 5-й панели сверху приведены графики аппаратной A_t и динамичной Dt составляющей, соответственно.

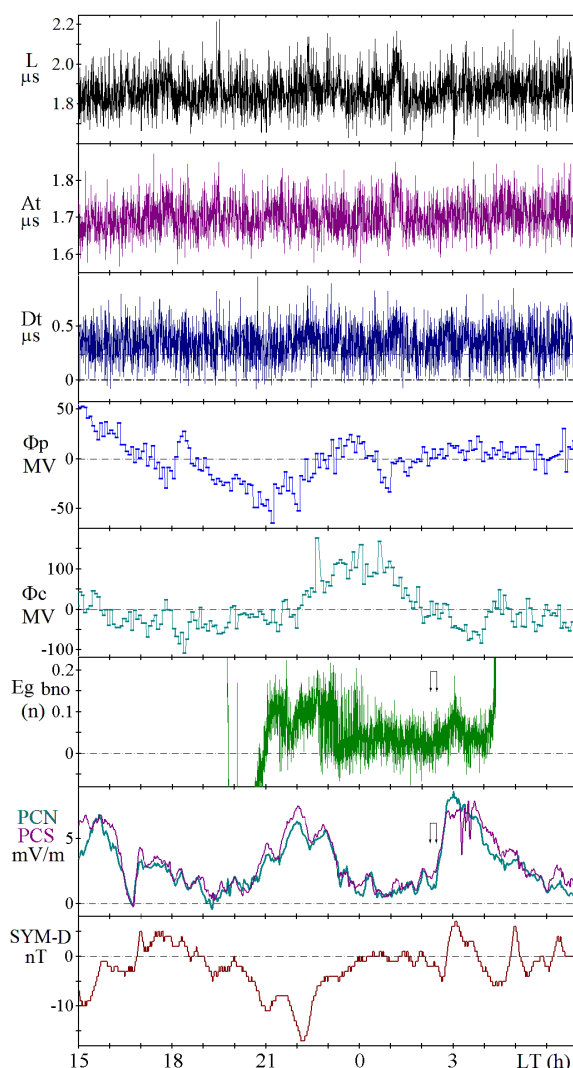


Описание сверху вниз. 1я панель: Аппроксимация полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над установкой, полученная используя глобальные карты ПЭС в формате IONEX (ресурс <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/cat/>), скважность - 1 час. 2я панель: Аппроксимация W - индекса возмущённости ионосферы, так же полученная используя глобальные карты в формате IONEX (ресурс <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/cat/>), скважность - 1 час. 3я панель: Задержка L - время на получение сигнала точного времени от системы спутников GPS (L). 4я панель: Аппаратная составляющая задержки L. 5я панель: Динамическая составляющая задержки L – разница реальной ионосферной задержки и прогнозируемой по технологии GPS. Рисунок 20.2 – По оси абсцисс – период с 03 июля по 7 августа 2019г. Везде, где не указано специально, 1 точка графика соответствует среднему значению параметра за 12 минут

Видно, что весь эффект возмущения задержки L, определяется возмущением динамической составляющей Dt. Этот факт подтверждает корректность проведённого разделения измеряемой задержки на аппаратную и динамическую, зависящую от состояния ионосферы.

На рисунке 20.3 приведены графики задержек, соответствующие событию 01.09-02.09. Полная задержка L (1-я панель сверху) и её составные части At – аппаратная (2-я панель сверху) и Dt – динамическая (3-я панель сверху). На нижней части рисунка приведены

графики вариаций различных геофизических параметров локального и глобального характера. На 4-й панели приведён график вариаций средней разности потенциалов в тропосфере, распределённой в стороне от установки (10-20 км) (панель 4 сверху), восстановленной по вариациям мюонов.



Перечень описания графиков сверху вниз: 1я панель: Задержка L - время на получение сигнала точного времени от системы спутников GPS, усреднение 20с. 2я панель: Аппаратная составляющая задержки L , зависящая от качества принимаемого сигнала. 3я панель: Динамическая составляющая задержки L – разница реальной ионосферной задержки и прогнозируемой по технологии GPS. 4я панель: Восстановленная по вариациям «периферийных» мюонов с энергосвечением более 70 МэВ разность потенциалов в тропосфере в стороне (10-20 км) от установки, усреднение 5 мин. 5я панель: Восстановленная по вариациям «вертикальных» мюонов с энергосвечением 30 – 60 МэВ разность потенциалов в тропосфере над установкой, усреднение 5 мин. 6я панель: Яркость (измерение в каналах) свечения центральной области снимка (п. Нейтрино, цвет зелёный, скважность 10 сек), усреднение 20 сек. 7я панель: PCN индекс (синий) и PCS индекс (фиолетовый) (ресурс http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) (скважность 1 минута), характеризуют вариации электрического поля солнечного ветра. 8я панель: Y-компонента симметричной составляющей магнитного поля (ресурс http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) (скважность 1 минута), (SYM-D индекс), скважность 1 мин, характеризует меридиональный ток в ионосфере

Рисунок 20.3 – Событие 01.09-02.09. Время местное, опережает мировое на 3 часа

Видно, что в 01:00 имел место электрический разряд, интерпретированный как подземный. В этот момент на графиках обоих составляющих задержки L , и A_t и D_t , фиксируется положительное возмущение. Из анализа следует, фон D_t для этого события составляет 370 нс, что несколько превышает средний уровень для 40 суток (240 нс). Амплитуда возмущения, последовавшего за подземным электрическим разрядом 110 нс, что составляет 30% текущего значения фона. Используя результат калибровки это превышение соответствует 21 ТЕСи. Что, при среднем уровне ПЭС 10 ТЕСи, соответствует троекратному увеличению и не противоречит ранее опубликованному результату. Поскольку это увеличение на мировых картах ионосферной возмущённости не отмечено, следовательно, оно локально. Анализируя возмущённость аппаратной составляющей задержки A_t , можно заметить в 01:00, так же имеет место рост, более статистически выраженный и более короткий, амплитудой 90 нс, что составляет 5% фона. Поскольку, этот канал классифицирован как зависимый от условий приёма спутниковых сигналов и независимый от возмущённости ионосферы, следовательно, в период, последовавший сразу после подземного разряда в 1:00, наряду с возмущением в ионосфере, имело место возмущение условий приёма GPS сигнала со спутников. Изменение условий регистрации мог спровоцировать подземный разряд.

21. 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 (Задача № 21)

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ по нейтринной задаче и контроля экспериментальных данных БПСТ. В 2022 году созданы новые диагностические программы: 1) восстановления блоков экспериментальных данных детектора, поврежденных сбоями в работе часов и репитера сигнала GPS - на основе временных меток файлов с сохранением этих меток; и 2) подбора оптимального времени доступа к блокам информации для программы on-line мониторинга данных БПСТ. Время набора информации по нейтринной задаче составило 7273,5 часа, (303,1 суток, 95% от календарного времени), за период с 1.01.2021 по 15.11.2022. Чистое время набора, с учетом мертвого времени установки, составило 297,8 суток.

Проведена обработка информации, полученной за это время – всего зарегистрировано 433173110 событий. Так как для этой задачи используется время-пролетный метод, при обработке всех событий анализируются распределения c/v для проверки работы каждого счетчика. При регистрации мюонов из нижней полусферы ($\theta > 90^\circ$) можно исключить фон от мюонов, проникающих под землю: поскольку все известные компоненты космических лучей поглощаются на глубине нескольких километров горных пород, а поток обратно рассеянных мюонов из верхней полусферы меньше эффекта от нейтрино на глубине залегания телескопа. Для глубины БПСТ мюонный фон полностью исключается при зенитных углах ($\theta > 100^\circ$). Из общего потока информации было отобрано 2978 событий, соответствующих формальным критериям для поиска мюонов из нижней полусферы, заложенным в программы обработки. Каждое из этих 2978 событий просмотрено дополнительно, с привлечением осциллограмм. Подобная детальная обработка исключает ошибки в определении прихода направления мюона, длины траектории этого мюона в установке, минимальном энерговыделении в плоскостях. В 2022 году (до 15 ноября) на БПСТ зарегистрировано 35 событий, которые допускают единственную трактовку – мюон из нижней полусферы. За весь период наблюдения с декабря 1978 года по 15.11.2022 чистое время наблюдения 316258 часов (36,1 года). За все время наблюдения на БПСТ зарегистрировано 1901 событие. На рисунке 21.1 показано полученное за все время наблюдения распределение зарегистрированных нейтринных событий по зенитному углу.

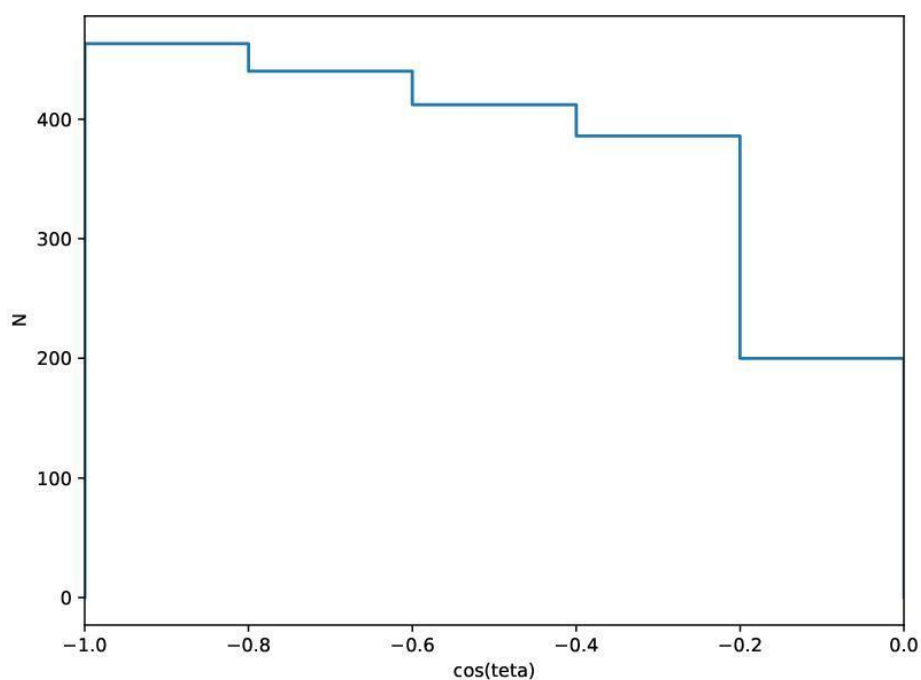


Рисунок 21.1 – Распределение зарегистрированных нейтринных событий по зенитному углу

Нейтрино из области PKS 0735+17 было обнаружено на BUST 4 декабря 2021 г. во время мощного выброса из этого блазара, совпадающего с наблюдаемым гамма-всплеском Fermi LAT. БПСТ зарегистрировал мюон из нижней полусферы с энергией выше 1 ТэВ в направлении PKS 0735+17 4 декабря 2021 г. в 14:52:47.83 UT [108]. Наилучшим направлением прихода является $RA=116,5^\circ$, $Dec=16,6^\circ$, что составляет $2,18^\circ$ от источника. Событие совпало с гамма-вспышкой, наблюдаемой FermiLAT, и примерно на 4 дня предшествовало одновременному обнаружению в области PKS 0735+17 двух редких высокоэнергетических нейтринных событий: IceCube (172 ТэВ) [109] и Baikal-GVD (43 ТэВ) [110]. Примерно через 11 дней последовало нейтринное событие с энергией 18 ТэВ, зарегистрированное KM3NeT [111]. За время наблюдений (12981,33 дня с 1978 г. по 31 марта 2022 г.) на БПСТ было зарегистрировано только 1 событие из ячейки радиусом 5 градусов с центром в PKS 0735+17. Всего зарегистрировано 115 событий в области склонения этого блазара (плюс-минус 5 градусов) по всему диапазону прямых восхождений. Таким образом, за весь период наблюдения ячейка смогла зарегистрировать в среднем 3.2 события от блазара. Вероятность случайного обнаружения одного или более событий из данной ячейки во время вспышки (≈ 10 дней) составляет $\approx 0,0025$.

Несмотря на то, что БПСТ является достаточно малым нейтринным телескопом по сравнению с телескопами масштаба кубического километра, из-за быстрого роста эффективной площади регистрации нейтрино с ростом энергии (за счет роста сечения взаимодействия мюонных нейтрино с нуклоном) БПСТ в принципе может регистрировать

потоки нейтрино, сравнимые с изучаемыми на больших телескопах. Это зависит от конкретной формы спектра астрофизических нейтрино и соотношения эффективных площадей нейтринных телескопов с ростом энергии нейтрино. Для согласования фактов регистрации нейтринных событий на БПСТ и IceCube достаточно предположить, что энергетический спектр нейтрино от блазара является степенным с показателем степени - 2,75 во всем диапазоне энергий. Следует заметить, что спектр астрофизических нейтрино, полученный для высокоэнергетических стартовых событий IceCube, согласуется со степенным спектром с показателем $2,87^{+0,20}_{-0,19}$ с доверительным интервалом 68,3% [112]. Следовательно, для такого астрофизического спектра нейтрино нет противоречия между БПСТ и IceCube в количестве нейтрино, зарегистрированных от блазара PKS 0735+17.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Задача «Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершенных НИОКР»

Завершены исследования, разработаны, скомплектованы, изготовлены и подготовлены все элементы и системы для установки следующих двух кластеров телескопа Baikal-GVD во время зимней экспедиции 2023 г.

2. Задача «Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория»»

База экспериментальных данных пополнилась за счет непрерывного набора в течение 2021 года. Часть данных 2022 года обработана и подготовлена для анализа и поиска событий, связанных с астрофизическими нейтрино высоких энергий.

3. 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 2022 году телескопа Baikal-GVD из 10 кластеров и существенно улучшено моделирование атмосферных мюонов (мюонных групп), что было достигнуто путем перехода на обновленную версию программного пакета CORSIKA, устранения некоторых программных ограничений (в частности, на число мюонов в мюонных группах), а также многократного увеличения статистики (числа событий), позволив таким образом значительно улучшить согласие между результатами моделирования и реальными данными

4. Задача «Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий»

По результатам исследований была подготовлена и опубликована статья [2] (Приложение А)

5. Задача «Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц»

Результаты исследований в 2022 году докладывались на международном научном совещании в Гранаде (Испания).

6. 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 ходе исследований выработаны предложения по научной программе и техническому решению для следующих после BEST экспериментов.

Первым предполагается выполнение на ГГНТ эксперимента по исследованию переходов антинейтрино в нейтрино с источником антинейтрино ^{170}Tm активностью 1 МКи на 50 тонной галлиевой мишени. Поскольку для выполнения этого эксперимента потребуется только изготовление, обеспечение доставки и безопасной работы с антинейтринным источником в БНО ИЯИ РАН и не требуется никакой модернизации мишени, установок облучения, систем перекачки и извлечения.

Последующим предполагается выполнение эксперимента BEST2 с нейтринным источником ^{65}Zn активностью 0,5 МКи. Для реализации BEST2 потребуется существенная модернизация установки посредством включения еще одной внутренней емкости для галлиевой мишени, для которой потребуется отдельная система перекачки, независимая система выпаривания и извлечения и дополнительное количество пропорциональных счетчиков для обеспечения одновременного измерения скоростей захвата в трех галлиевых мишенях.

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.

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

В ходе проведения физических измерений на полутонном прототипе были выполнены измерения энергетического отклика детектора и потока мюонов в месте его расположения.

Измеренный поток мюонов в ГГНТ составил $(4,02 \pm 0,24) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (время экспозиции 2724 часа) в пределах 1σ , полученный результат согласуется с результатами измерений для эксперимента SAGE.

Из калибровок детектора радиоактивными источниками измерен энергетический отклик детектора, который составляет 172,6 фотоэлектрон на МэВ.

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

8. Задача «Обнаружение и определение величины потока гео-антинейтрино

и гео-нейтрино от долгоживущего изотопа калия ^{40}K »

Проведённый в ИЯИ РАН в 2022 году анализ показал, что набор источников событий с $^{40}\text{K-geo-v}$ описывает экспериментальные данные, полученные детектором Борексина на заключительном этапе, значительно лучше набора источников без $^{40}\text{K-geo-v}$. Полученное значение скорости счёта калийных гео-антинейтрино $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11,0 \text{ cpd/100t}$ не может являться статистической флуктуацией, если в природе количество калия соответствует общепринятой сейчас модели Земли. Это полученное значение $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11,0 \text{ cpd/100t}$ соответствует количеству калия в Земле равному 3,2% от массы Земли при условии равномерного распределения калия в Земле и с учётом систематического смещения восстановленного среднего значения скорости счёта $^{40}\text{K-geo-v}$ событий при подгонке к экспериментальным данным. Такое большое количество калия предсказано Гидридной моделью Земли, и объясняет наблюдаемую сейчас скорость нагрева мирового океана.

9. Задача «Подготовка детектора ОГРАН к режиму непрерывных наблюдений. Мониторинг грави-градиентного наземного фона в килогерцовом диапазоне частот с целью детектирования слабых всплесков гравитационного излучения, порождаемых коллапсирующими объектами в Галактике и её близкой окрестности в 50 кпс. Проведение корреляционного анализа данных с показаниями БПСТ БНО ИЯИ РАН»

Приведенный промежуточный отчет (2022) по текущему состоянию антенны ОГРАН демонстрирует сложность задачи регистрации высокочастотных всплесков гравитационного градиента астрофизического и наземного происхождения с помощью комбинированного оптоакустического интерферометра на уровне его предельной чувствительности. Как и в интерферометрах с большой базой здесь требуются идеальная работа прецизионных систем автоматического регулирования для удержания установки в её рабочей. Отсюда следуют формулировки направления работ следующего этапа (2023г). Это совершенствование (повышение надежности) опто - электронной системы удержания установки ОГРАН с резонаторами большой резкости в режиме оптимальной настройки. Отработка электронного и программного обеспечения автоматизации работы антенны, её удаленного контроля и управления. В отношении методики проведения эксперимента требуется уточнение стратегии параллельных наблюдений на ОГРАН и БПСТ для фильтрации сигналов коллапсаров. Возможно, что для отработки методики были бы полезны тренировочные тесты с поиском искусственных нейтрино-гравитационных сигналов. В любом случае требуется дальнейшая конкретизация анализа данных при совместном поиске нейтрино-гравитационных корреляций. Успех на этом этапе, по-

видимому, есть обязательное условие для перехода на режим непрерывного мониторинга нейтрино-гравитационных событий на детекторах БПСТ и ОГРАН.

10. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек Сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино».

В 2022 году велись исследования по поиску нейтрино от коллапсирующих звезд с помощью нейтринных детекторов. Так как не было вспышек сверхновых в нашей галактике, то по данным детектора LVD установлено ограничение на частоту вспышек в Галактике: менее 1 события за 13,03 г на 90% уровне достоверности. По данным работы детектора АСД за 43 года работы, получено ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в нашей Галактике: менее 1 события за 18,56 г на 90% уровне достоверности.

Теоретически исследования в области моделирования сигнала в рамках двух моделей взрывов сверхновых показали, что требуется как уточнение моделей взрыва сверхновых и параметров нейтринного излучения, так и объяснение других фактов, связанных с единственной регистрацией нейтрино детекторами KII, IMB, LSD, БПСТ от сверхновой SN1987A.

11. Задача «Разработка методики поиска коррелированных редких сигналов на данных детекторов АСД, БПСТ и LVD, связанных с событиями астрофизических источников»

В 2022 году начата разработка методики поиска редких сигналов в детекторах LVD, БПСТ и АСД, коррелированных с гравитационно-волновыми астрофизическими событиями. Создана база данных редких событий в детекторах.

12. Задача «Разработка детектора HALO+1kt на основе свинцовой мишени с регистрацией нейтронов, с возможностью определения типов нейтрино для уточнения моделей сверхновых»

Разрабатывается новый детектор HALO-1kT — это предложение по увеличенному детектору, который будет использовать 1000 тонн свинца INFN из выведенного из эксплуатации детектора OPERA. Увеличенная масса и улучшенная эффективность захвата нейтронов HALO-1kT обеспечит более чем 20-кратное увеличение статистики событий от следующей галактической сверхновой. Проводится Монте-Карло моделирования для разработки защиты для двух вариантов детектора.

13. Задача «Поиск космических гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ по данным установки TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ»

Введен в строй третий узкоугольный атмосферный черенковский телескоп изображения TAIGA-IACT в составе эксперимента TAIGA. Продолжены исследования диффузного потока гамма-квантов сверхвысоких энергий на сцинтилляционной установке TAIGA-GRANDE.

На установках LHAASO были получены значимые научные результаты мирового уровня. Этого удалось достичь благодаря уникальным параметрам установок эксперимента LHAASO, а именно, огромной площади, занимаемой детекторами, большой плотности (малым расстояниям между ними) и информативности детекторов, разного типа: около ~5500 электронных детекторов, ~1200 мюонных детекторов, 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 позволило, в свою очередь, уже получить выдающиеся результаты и открыть ПэВатроны в нашей Галактике.

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

После окончания строительных и пуско-наладочных работ 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. Исследованы потоки гамма-квантов высоких энергий от галактических и внегалактических локальных источников с помощью узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA.

Измерен поток гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой в Крабовидной туманности со статистической значимостью более 11σ и исследован их энергетический спектр.

15. Задача «Разработка нового детектора адронных аксионов на основе изотопа ^{57}Fe . Предполагается использовать железосодержащий полупроводниковый материал – пирит. На основе этого материала (в первые) изготовить полупроводниковый детектор с массой активного материала ~100г. Ожидается, что новый детектор позволит как минимум на порядок улучшить результаты, полученные на ^{83}Kr »

Проведен поиск резонансного поглощения 9,4 кэВ солнечных аксионов ядрами ^{83}Kr , приводящего к возбуждению первого ядерного уровня ^{83}Kr . Для регистрации γ - и рентгеновских квантов, конверсионных и Оже-электронов использовался большой газовый

пропорциональный счетчик, заполненный изотопом ^{83}Kr . Низкофоновая установка располагалась в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН. В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с электроном и нуклонами

$$|g_{\text{Ae}}(g_{\text{AN}}^3 - g_{\text{AN}}^0)| \leq 1,50 \times 10^{-17} \text{ (90 \% у.д.)}.$$

В моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона), полученный верхний предел соответствует ограничениям на константу связи аксиона с электроном и массу аксиона

$$|g_{\text{Ae}} \times m_{\text{A}}| \leq 1,17 \times 10^{-9} \text{ эВ и } |g_{\text{Ae}} \times m_{\text{A}}| \leq 5,72 \times 10^{-10} \text{ эВ}$$

Что соответствует ограничениям на массу аксиона на уровне:

$$m_{\text{A}} \leq 320 \text{ эВ и } m_{\text{A}} \leq 4,6 \text{ эВ соответственно.}$$

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

В течение 2022 года проводились работы запуску новых выносных пунктов регистрации, в том числе проведена настройка коэффициентов усиления ФЭУ новых счетчиков. Разработана и создана новая система сбора и хранения данных для установки «Ковер-3», которая работает в настоящее время в режиме тестового набора данных. Запущен набор данных в подземном мюонном детекторе площадью 410 м^2 , выполняются расчеты критериев отбора фотоподобных событий при использовании полной площади мюонного детектора.

17. Задача «Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок Ковер-3, TAIGA, LHAASO, и Telescope Array»

Проводились методические и расчетные работы, модернизирована он-лайн-программа, внедрен алгоритм отбора нейтронных импульсов, что позволило существенно повысить достоверность получаемой информации.

Кроме того, проводится компьютерное монте-карловское моделирование с помощью пакетов CORSIKA и GEANT всех разновидностей эксперимента с учетом геометрии установки, высоты наблюдения и т. д. В отчетном году подготовлены и опубликованы две статьи по данной теме.

На установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE эксперимента TAIGA исследованы энергетический спектр и массовый состав космических лучей в области энергий 10^{14} - 10^{18} эВ.

18. Задача «Разработка модели FANSY 2.0 взаимодействий адронов с нуклонами и ядрами в широкой области энергий 10^{11} – 10^{18} эВ»

Получены значимые научные результаты. Усовершенствован программный пакет FANSY 2.0 с учётом некоторых экспериментальных данных, полученных на ускорителях и

ЛНС в широком диапазоне энергий, по генерации основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ.

Уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов p_T наиболее энергичных частиц, найдены наиболее эффективные значения нескольких параметров алгоритма для трёх различных вариантов модели с слабой, умеренной и сильной амплитудами получаемого «ridge» эффекта в рамках ядерно-физических концепций, а также, впервые, для варианта моделирования компланарной генерации частиц в 2D пространстве.

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

Получены значимые научные результаты. Впервые предложено детальное исследование кинематических историй генерации резонансов и их распадов в мезоны и γ -кванты, которое может подтвердить или опровергнуть существование локальных ($3D \leftrightarrow 2D$) флуктуаций сигнатуры метрики пространства.

20. Задача «Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»

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

Получена экспериментальная оценка коэффициента регрессии задержки радиосигналов со спутников GPS, регистрируемой стандартными часами точного времени (GPS170PCI). Показана невозможность аппаратного происхождения такой связи.

Из вариаций измеряемого временного интервала (L) затраченного на считывание точного времени системой спутниковых часов GPS170PCI была выделена аппаратная составляющая этой задержки и динамичная. Аппаратная (A_t) является случайной величиной с квазистационарными параметрами. Динамичная (D_t) случайная величина, определяемая разницей между реальной ионосферной задержкой и прогнозируемой по технологии GPS навигации, используемой в часах GPS170PCI. Показано, что заявленная в паспорте часов точность определения времени ± 250 нс является заниженной.

В событие 01.09-02.09, в 24 минутный период, следующий сразу после момента электрического разряда, интерпретируемого как подземный (01:00) в вариациях обоих составляющих задержки, как аппаратной A_t , так и динамичной D_t , фиксируется

положительное возмущение. Амплитуда возмущения динамичной задержки, определяемой возмущением ионосферы, 110 нс, что составляет 30% текущего значения измеряемого фона, соответствует троекратному увеличению полного электронного содержания, локально, в районе установки, и не противоречит ранее опубликованному результату. Возмущённость аппаратной составляющей задержки A_t , амплитудой 90 нс, составляет 5% фона и указывает, что имело место возмущение условий приёма GPS сигнала со спутников. Изменение условий регистрации мог спровоцировать подземный разряд.

21. 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»

В течение 2022 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. Показано, что для астрофизического спектра нейтрино, измеренного на нейтринном телескопе IceCube, нет противоречия между БПСТ и IceCube в количестве нейтрино, зарегистрированных от блазара PKS 0735+17.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. High-energy neutrino-induced cascade from the direction of the flaring radio blazar TXS 0506+056 observed by the Baikal Gigaton Volume Detector in 2021 / V.A. Allakhverdyan [et al.] // e-Print:2210.01650, [astro-ph.HE]. – 2022.
2. Light Sterile Neutrinos: A White Paper / Abazajian K. N. [et al.] // arXiv:1204.5379 [hep-ph]. – 2012. – 269 p.
3. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2022. – vol. 128. – p. 232501.
4. 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.
5. Gallium Anomaly: Critical View from the Global Picture of ν_e and $\bar{\nu}_e$ Disappearance / Giunti C. [et al.] // arXiv:2209.00916v1 [hep-ph]. – 2022. – 19 p.
6. 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.
7. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the gallium anomaly. / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. D. – 2018. – vol. 97. – p. 073001.
8. On the gallium experiment BEST-2 with a ^{65}Zn source to search for neutrino oscillations on a short baseline / Gavrin V.N. [et al.] // arXiv:1807.02977 [physics.ins-det]. – 2018. – 10 p.
9. Devis R. Attempt to detect the antineutrinos from a nuclear reactor by the $\text{Cl}^{37}(\bar{\nu}_e, e^-)\text{A}^{37}$ reaction // Phys. Rev. -1955. – vol. 97. - p. 766.
10. Devis R. An attempt to detect the antineutrinos from a nuclear reactor by the $\text{Cl}^{37}(\bar{\nu}_e, e^-)\text{A}^{37}$ reaction // Bull. Amer. Phys. Soc. – 1956. – vol. 1. – p. 219.
11. 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.
12. Devis R., Jr. and Don Harmer S. Attempt to observe the $\text{Cl}^{37}(\bar{\nu}_e, e^-)\text{A}^{37}$ reaction induced by reactor antineutrinos // Bull. Amer. Phys. Soc. – 1959. - vol. 4. – p. 217.
13. Предложение эксперимента по исследованию различия ν_e и $\bar{\nu}_e$ / Барабанов И.Р. [и др.] // Препринт ИЯИ АН СССР. – 1986. – П-0466. –М. – 7с.
14. Domogatsky G.V. Upper Limit of Possible Violation of Lepton Conservation Based on the Results of Neutrino Experiments on Reactors // Yad. Fiz. – 1975. – vol. 22. – p. 1267-1269.
15. Limits on Neutrino - Anti-neutrinos Transitions From a Study of High-energy

Neutrino Interactions / Cooper-Sarkar Amanda M. [et al.] // Phys.Lett.B. – 1982. – vol. 112. – p. 97-99.

16. Study of solar and other unknown anti-neutrino fluxes with Borexino at LNGS / Bellini G. [et al.] // Phys. Lett. B. – 2011. – vol. 696. – p. 191.

17. A study of extraterrestrial antineutrino sources with the KamLAND detector / Gando A. [et al.] // ApJ. – 2012. – vol. 745, - N 2. – p. 193.

18. Smirnov A. The MSW effect, solar neutrinos and searches for new physics // Proceedings, 5th International Solar Neutrino Conference: Dresden, Germany, June 11-14. – 2018. – p. 143-160.

19. 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.

20. Бета-излучение продуктов деления: Справочник / [В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, В.Г. Алексанкин, П. А. Ружанский] // – М.: Атомиздат. – 1978. – 468 с.

21. Weast R. C. CRC Handbook of Chemistry and Physics: 69th Edition 1988–1989/ Weast R. C., Astle M. J., Beyer W.H. // -1989. – Boca Raton. -Florida. – CRC Press, Inc. – 2400 p.

22. On the gallium experiment BEST-2 with a ^{65}Zn source to search for neutrino oscillations on a short baseline/ Gavrin V.N. [et al.] // arXiv:1807.02977 [physics.ins-det]. –10 p.

23. Measurement of the response of a gallium metal solar neutrino experiment to neutrinos from a ^{51}Cr source / Abdurashitov J.N. [et. Al.] // Phys. Rev. C –1999. – vol. 59, No.4. – p. 2246-2263.

24. Bahcall J.N. Gallium Solar Neutrino Experiments: Absorption Cross Sections, Neutrino Spectra, and Predicted Event Rates // Phys. Rev. C. – 1997. – vol. 56, num. 6. – p 3391-3409.

25. Новикова Г.Я. Современные методы очистки жидких сцинтилляторов, предназначенных для регистрации редких событий.// Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2018. – том 49, № 4. – с.1360-1373.

26. Evaluation of large area photomultipliers for use in a new Baksan Large Neutrino Telescope project / Nikita Ushakov [et al.] // Proceedings of Science. – 2021. – vol. 395. – p. 1101.

27. Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). – М: Агар, 2005 – 247с.

28. Zgonnik Viacheslav, Toulhoat Hervé. Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue // The Astrophysical Journal. – 2022. – V. 924. – P. 83.

29. Simultaneous precision spectroscopy of PP,Be 7, and PEP solar neutrinos with Borexino phase II / Agostini M. [et al.] // Phys. Rev. D. – 2019. – V. 100. – p. 082004.

30. Интерпретация первой регистрации солнечных нейтрино CNO цикла детектором Борексино / Безруков Л. Б. [и др.] // Известия Российской Академии Наук, Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 566.
31. Геонейтрино и электрическое поле Земли / Безруков Л. Б. [и др.] // Ядерная физика. – 2022. – Т. 85, № 6. С. – 454.
32. Modernization and Methods of Maintaining the Operating Mode of the OGRAN (Optoacoustic Gravity Antenna) Setup / Rudenko V.N. [et al.] // Phys. Atom. Nuclei. – 2020. – Vol. 83. – P. 1682.
33. Gravitational wave detector OGRAN as multi-messenger project of RAS-MSU / Rudenko V.N. [et al.] // International Journal of Modern Physics A. – 2020. – Vol. 35, No. 02n03. – P. 2040007-1.
34. Модернизация и методика удержания рабочего режима установки ОГРАН (Оптоакустическая Гравитационная Антенна) / Руденко В.Н. [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2020. – т. 11, № 3. – С. 152.
35. Measurements of thermal relaxation of the OGRAN underground setup / Gavrilyuk Y.M. [et al.] // ArXiv>physics>ins-det – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00481> (дата обращения 31.10.2021).
36. Seismic noise background in the Baksan Neutrino Observatory / Naticchioni. L. [et al.] // Eur. Phys. J. Plus. - 2022. – Vol. 137. – p. 124.
37. On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory during the Occurrence of Supernova 1987a / Aglietta M. [et al.] // Europhysics Letters. – 1987. – Vol. 3, No 12. – P. 1315.
38. Search for Gravitational-Neutrino Correlations on Ground-Based Detectors / Andrusenko S. [et al.] // Universe. – 2022. – Vol. 8, No 9. – P. 446.
39. Potassium abundance in the Earth and Borexino data / L.Bezrukov [et al.] // ArXiv>physics>Instrumentation and detectors. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08531> (дата обращения 17.02.2022).
40. Improved measurement of solar neutrinos from the Carbon-Nitrogen-Oxygen cycle by Borexino and its implications for the Standard Solar Model / S. Appel [et al.] // ArXiv>hep-ex – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.15975> (дата обращения 05.2022).
41. Bari G. 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.
42. Береснев В.И. 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.

43. Антоненко А.Г. Сорок лет Артемовскому сцинтилляционному детектору нейтрино / Антоненко А.Г. [и др.] // Ядерная Физика. – 2018. – Т. 81, №1. – С. 78-84.
44. Imshennik V. S. Explosion mechanism in supernovae collapse // Space Sci. Rev. 1995. – V. 74. P. 325-334.
45. Aglietta M. The most powerful scintillator supernovae detector LVD / Aglietta M. [et al.] // Nuovo Cimento, A. – 1992. – Vol. 105. – P.1793-1804
46. Agafonova N.Y. 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
47. Aglietta M. On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory during the Occurrence of Supernova 1987A / Aglietta M. \ [et al.] // EuroPhys. Lett. – 1987. – V. 3. – P. 1315.
48. Alekseev E.N. Possible detection of a neutrino signal on 23 February 1987 at the Baksan underground scintillation telescope of the Institute of Nuclear Research / Alekseev E.N. [et al.] // Sov. Phys. JETP Lett. – 1987. – V. 45. – P. 589-592.
49. Bionta R. M. Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud/ Bionta R. M. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58. – P. 1494-1496.
50. Hirata K. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A / Hirata K. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58. – P. 1490-1493.
51. Зельдович Я. Б. Коллапсировавшие звезды в составе двойных / Зельдович Я. Б., Гусейнов О. Х. // ДАН СССР. – 1965. – Т. 162. – С. 791.
52. Arnett W. D. Gravitational collapse and weak interactions // Can. J. Phys. – 1966. – V. 44, - P. 2553-2594.
53. De Rújula A. May a supernova bang twice? // Phys. Lett. B. – 1987. – V. 193, N 4. – P. 514-524.
54. Berezhinsky V.S. On the possibility of two-bang collapse / Berezhinsky V.S. [et al.] // Il Nuovo Cimento. – 1988. – V. 11C, N3. – P. 287-303.
55. Drago A. The scenario of two families of compact stars. Part 2: Transition from hadronic to quark matter and explosive phenomena / Drago A., Pagliara G. // Europ. Phys. J. A. – 2016. – V. 52: 41. 15p.
56. Имшенник В.С. Вращающийся коллапсар и возможная интерпретация нейтринного сигнала LSD от SN1987A / Имшенник В.С., Ряжская О.Г. // Письма в АЖ. – 2004. – Т.30, вып. 1. – С. 17-36.

57. Ivanchenko V. N. // Nucl. Instrum. Methods A. – 2003. – V.502. – P. 666.
58. Мануковский К.В. Моделирование отклика детектора LSD на нейтринную вспышку от SN1987A / Мануковский К.В. [и др.] // ЖЭТФ. – 2022. – Т. 161, вып. 3. – С. 331–345.
59. Agafonova N. Relationships among detector signals recorded during events SN1987A and GW170817 / Agafonova N., Malgin A., Fischbach E. // arXiv- free distribution service and an open-access archive. – 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.00265>
60. Neutrino Outflow from Supernova 1987A Detected in the Mont Blanc Observatory / M. Aglietta [et al.] // EuroPhys. Lett. – 1987. – V. 3. – P. 1315.
61. Possible detection of a neutrino signal on 23 February 1987 at the Baksan underground scintillation telescope of the Institute of Nuclear Research / E.N. Alekseev [et al.] // Sov. Phys. JETP Lett. – 1987. – V. 45. – P. 461.
62. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A / K. Hirata [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V.58. – P. 1490.
63. Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud / R.M. Bionta [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58. – P. 1494.
64. Дадыкин В.Л., Рязжская О.Г. Об одной группе экспериментальных результатов, связанных с поиском нейтринного излучения от SN 1987A. Комментарий // ПАЖ. – 2009. – Т. 35, №6. – С. 427.
65. Design, characterization, and sensitivity study of the supernova trigger system at Daya Bay / Wei Hanyu [et al.] // Astroparticle Physics. – 2016. – V. 75. – P. 38.
66. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries. / B.P. Abbott [et al.] (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2016. – V. 116. – P. 131103.
67. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence / B.P. Abbott [et al.] (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2016. – V. 116, – P. 241103.
68. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2 / B.P. Abbott [et al.] (LIGO Scientific and Virgo Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2017. – V. 118. – P. 221101.
69. High-energy neutrino follow-up search of gravitational wave event GW150914 with ANTARES and IceCube / S. Adri'an-Mart'inez [et al.] (Antares Collaboration and IceCube Collaboration and LIGO Scientific Collaboration, and Virgo Collaboration) // Phys. Rev. D. – 2016. – V. 93. – P. 122010.
70. Ultrahigh-energy neutrino follow-up of gravitational wave events GW150914 and

GW151226 with the Pierre Auger Observatory / A. Aab [et al.] (Pierre Auger Collaboration) // Phys. Rev. D – 2016. – V. 94. – P. 122007.

71. Search for electron antineutrinos associated with gravitational wave events GW150914 and GW151226 using KamLAND / A. Gando [et al.] // The Astrophysical Journal Letters – 2016. – V. 829. – P. L34.

72. Search for Neutrinos in Super-Kamiokande associated with Gravitational Wave Events GW150914 and GW151226 / K. Abe [et al.] (Super-Kamiokande) // Astrophys. J. Lett. – 2016. – V. 830. – P. L11.

73. A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector / M. Agostini [et al.] (The Borexino Collaboration) // The Astrophys. J. – 2017. – V. 850. – P. 21.

74. AGILE observations of the gravitational-wave event GW150914 / M. Tavani [et al.] // Astrophys. J. – 2016. – V. 825. – P. L4.

75. XMM-Newton Slew Survey observations of the gravitational wave event GW150914 / E. Troja [et al.] // Astrophys. J. – 2016. – V. 822. – P. L8.

76. Searching the Gamma-ray Sky for Counterparts to Gravitational Wave Sources: Fermi GBM and LAT Observations of LVT151012 and GW151226 / J.L. Racusin [et al.] (Fermi-LAT) // Astrophys. J. – 2017. – V. 835. – P. 82.

77. INTEGRAL upper limits on gamma-ray emission associated with the gravitational wave event GW150914 / V. Savchenko [et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – V. 820. – P. L36.

78. Neutrino-nucleus reactions with KARMEN / Kretschmer W. [et al.] // Nucl. Phys. A. – 1994. – V. 577. – P. 421.

79. Kolbe E. Role of ν -induced reactions on lead and iron in neutrino detectors/ Kolbe E., Langanke K. // Phys. Rev. C – 2001. – V. 63. – P. 025802.

80. Väänänen D. The neutrino signal at HALO: learning about the primary supernova neutrino fluxes and neutrino properties/ Väänänen D., Volpe C. // JCAP – 2011. V.1110. – P. 019.

81. Ю.В. Стенькин. Выдающиеся достижения эксперимента LHAASO в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий // ЖЭТФ. – 2022. – №161(4). – С. 461-465.

82. Ю.В. Стенькин. Проект LHAASO: первые результаты и перспективы // УФН. – 2022. – Т. 192, №9. – С. 1048-1053.

83. Exploring Lorentz Invariance Violation from Ultrahigh-Energy γ Rays Observed by LHAASO / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration). // Phys. Rev. Lett. – 2022. – Vol. 128. – 051102.

84. Constraints on heavy decaying dark matter from 570 days of LHAASO

observations / Zhen Cao [et al.] (LHAASO collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2022. in press, Accepted 27 October 2022; arXiv:2210.15989v1 [astro-ph.HE] 28 Oct 2022.

85. Chapter 1 LHAASO Instruments and Detector technology / Xin-hua Ma [et al] // Chinese Phys. C – 2022. – Vol. 46, No. 3. – 035001.

86. Chapter 4 Cosmic-ray physics / Zhen Cao, [et al] // Chinese Physics C. – 2022. – Vol. 46, No. 3. –030004.

87. Influence of soil environment on performance of EAS electron–neutron detector array / D.-X. Xiao , [et al.] // Astrophysics and Space Science – 2022. – Vol. 367, No. 8. – P – 75.

88. Выделение сигналов от тепловых нейтронов в электронно-нейтронных детекторах с использованием сверточных нейронных сетей в эксперименте ENDA / К.О.Куринов [и др.] // ЖЭТФ – 2023. принята в печать.

89. Сотрудничество «Памир». Изучение событий с компланарным разлётом частиц при сверхвысоких энергиях // Известия АН СССР, сер. физ. – 1986. – Т. 50. – С. 2125 - 2128.

90. Xue L. Study of alignment of high energy γ -hadron families with iron emulsion chambers / Xue L., Dai Z.Q., Li J.Y. // Proc. 26th ICRC, Salt Lake City. – 1999. – V.1. – P. 127-130.

91. Stratospheric superfamily with $\Sigma E_{\gamma} \sim 2 \cdot 10^{15}$ eV / Apanasenko A.V. [et al.] // Proc. 15th ICRC, Plovdiv. – 1977. – V.7. – P. 220-225.

92. Capdevielle J.N. Coplanar emission in gamma-ray families, geometrical and dynamical coincidence or new mechanism? / Capdevielle J.N., Attallah R., Talai M.C. // Proc. 27th ICRC, Hamburg. – 2001. – V.1. – P. 1410-1413.

93. Searching for the Layered Structure of Space at the LHC / Anchordoqui L. [et al.] // Mod. Phys. Lett. A. – 2012. – V. 27. – P. 1250021.

94. 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. – V. 82:155. – P. 8.

95. Мухамедшин Р.А. Об изучении сигнатуры метрики пространства по корреляциям частиц во взаимодействиях адронов // Известия РАН. Сер. Физ. (принята в печать).

96. Royzen I.I. Theoretical approach to alignment phenomenon // Mod. Phys. Lett. A. -1994. – V. 9, № 38. – P. 3517- 3522.

97. 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. – V. 175. – P. 137-142.

98. Yuldashbaev T.S., Nuritdinov Kh. and Chudakov V. M. Unusual family characteristics at energies above 10 PeV / Yuldashbaev T.S., Nuritdinov Kh., Chudakov V. M. // *Nuovo Cim.* – 2001. – V. 24C. – P. 569.
99. Mukhamedshin R.A. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. – 1999. – V. 75A. – P. 141.
100. Wibig T. Alignment in hadronic interactions // arXiv: hep-ph/0003230
101. Хаердинов Н.С. Возмущение свечения ночного неба в ясную погоду на средних широтах/Хаердинов Н.С. и др.// *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85, № 11. – С. 1657-1660.
102. Хаердинов Н.С. Корреляция интенсивности мюонов с задержкой радиосигналов со спутников GPS, регистрируемых в горном ущелье/ Хаердинов Н.С. и др.//37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, г. Москва, 27 июня – 02 июля 2022 г., Сборник тезисов, С. 108.
103. Лидванский А.С. Вариации потока мюонов космических лучей во время гроз/ Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С.// *ЖЭТФ*, 2022 Т. 161, № 4 С. 497–514.
104. Gonzalez-Garcia M.C. Reevaluation of the Prospect of Observing Neutrinos from Galactic Sources in the Light of Recent Results in Gamma Ray and Neutrino Astronomy / Gonzalez-Garcia M.C., Halzen F., Niro V. // *Astropart. Phys.* – 2014. – V.57 - 58. – P. 39 – 48.
105. Kalashev O.E. PeV Neutrinos from Intergalactic Interactions of Cosmic Rays Emitted by Active Galactic Nuclei / Kalashev O.E., Kusenko A., Essey W.// *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – V. 111. – P. 041103.
106. On the GeV and TeV detections of the starburst galaxies M82 and NGC 253 / Lacki B.C. [et al.] // *Astrophys. J.* – 2011. – V. 734, № 2. – P. 107 – 120.
107. Waxman E. High Energy Neutrinos from Cosmological Gamma-Ray Burst Fireballs / Waxman E., Bahcall J. // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – V. 78, № 12. – P. 2292 – 2295.
108. V.B. Petkov. Baksan Underground Scintillation Telescope observation of a GeV neutrino candidate event at the time of a gamma-ray flare of the blazar PKS 0735+17, a possible source of coinciding IceCube and Baikal high-energy neutrinos. / V.B. Petkov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva (BUST Collaboration). // *The Astronomers Telegram*. – 2021. – v. 15143. – p.1. –URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15143>.
109. IceCube observation of a high-energy neutrino candidate track-like event / IceCube Collaboration. IceCube-211208A // *GRB Coordinates Network*. – 2021. – v. 31191. – p.1. –URL: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/31191.gcn3>
110. A. Dzhilkibaev, O. Suvorova for the Baikal-GVD collaboration. Baikal-GVD observation of a high-energy neutrino candidate event from the blazar PKS 0735+17 at the day of the IceCube-211208A neutrino alert from the same direction. // *The Astronomers Telegram*. –

2021. – v. 15112. – p.1. -URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15112>.

111. Search for neutrino counterpart to the blazar PKS0735+178 potentially associated with IceCube-211208A and Baikal-GVD-211208A with the KM3NeT neutrino detectors / F. Filippini [et al.] // The Astronomers Telegram. – 2022. – v.15290. – p.1. – URL:<https://www.astronomerstelegam.org/?read=15290>.

112. IceCube high-energy starting event sample: Description and flux characterization with 7.5 years of data. / R. Abbasi [et al.] (IceCube Collaboration). // Phys. Rev. D. – 2021. – Vol. 104. – P. 022002.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список опубликованных в 2022 году статей

А.1 Статьи в журналах, главы в книгах, материалы конференций, индексируемые в Web of Science, Scopus

1. Deep-Underwater Cherenkov Detector in Lake Baikal / A.V. Avrorin [et al.] // J.Exp.Theor.Phys. – vol. 134, № 4. – p. 399-416. Printed in Zh.Eksp.Teor.Fiz. – 2022 – vol. 161, № 4. – p. 476-796. – DOI: 10.1134/S1063776122040148.
2. High-Energy and Ultra-High-Energy Neutrinos, M.Ackermann / Zh.-A. Dzhilkibaev [et al.] // e-Print:2203.08096 [hep-ph]. Printed in Journal of High Energy Astrophysics, Elsevier. - November 2022. – vol 36. – P. 55-100.
3. Technique for suppression of background cascades produced by atmospheric muon bundles in the Baikal-GVD / V.A. Allakhverdyan [et al.] // JINST. - 2022. – vol. 17, № 02. – C. 02013. - DOI: 10.1088/1748-0221/17/02/C02013.
4. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2022. – vol. 128. – P. 232501.
5. 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.
6. Production of the artificial ^{51}Cr neutrino source in the BEST project / Danshin S.N. [et al.] // JINST. -2022.- vol.17. - p. P08029.
7. Measurements of thermal relaxation of the OGRAN underground setup / Gavriluk Y.M. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85, No. 9. – P. 59.
8. Search for Gravitational-Neutrino Correlations on Ground-Based Detectors / Andrusenko S. [et al.] // Universe. – 2022. –Vol. 8, No. 9. – P. 446.
9. Мониторинг нейтринных вспышек в Галактике / Ю.Ф. Новосельцев [и др.] // ЖЭТФ. – 2022. – т. 161, вып. 4. - стр. 466–475. DOI: 10.31857/S0044451022040022.
10. Search for neutrino bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope. R.V. Novoseltseva [et al.] // PoS(MUTO2022)035. – URL: <https://doi.org/10.22323/1.425.0035>.
11. В.С. Романенко. Гамма-астрономия сверхвысоких энергий на установке «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН / В.С. Романенко, В.Б. Петков, А.С. Лидванский // ЖЭТФ. – 2022. – т. 161, вып. 4. – С. 466–475. DOI: 10.31857/S0044451022040022.
12. Изучение космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы / И.И. Астапов [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики - 2022. – Т. 1, Вып.4, – С. 548-559.

13. Identification of electromagnetic and hadronic EASs using neural network for TAIGA scintillation detector array / I. Astapov [et al.] // Journal of Instrumentation – 2022. – Vol. 17, No. 05. – P. P05023.
14. TAIGA – A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics / N. Budnev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods A. – 2022. – Vol. 1039, P. 167047.
15. Астроклимат равнинных высокогорных зон большого Алтая по данным спутникового дистанционного зондирования: потенциал для размещения полномасштабного гамма-астрономического эксперимента / Е.Ю. Мордвин [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. - 2022. – Т. 86, No. 6. – С.452.
16. Новые ограничения на константу связи аксиона с электроном для солнечных аксионов / Гаврилюк Ю.М. [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – Том 116. – 2022. - Вып. 1. - С. 13-19.
17. Ю.В. Стенькин. Выдающиеся достижения эксперимента LHAASO в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий // ЖЭТФ. – 2022. – №161(4). – С. 461-465.
18. Ю.В. Стенькин. Проект LHAASO: первые результаты и перспективы // УФН. – 2022. – Т. 192, №9. – С. 1048-1053.
19. Exploring Lorentz Invariance Violation from Ultrahigh-Energy γ Rays Observed by LHAASO / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration). // Phys. Rev. Lett. – 2022. – Vol. 128. – 051102.
20. Constraints on heavy decaying dark matter from 570 days of LHAASO observations / Zhen Cao [et al.] (LHAASO collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2022. in press, Accepted 27 October 2022; arXiv:2210.15989v1 [astro-ph.HE] 28 Oct 2022.
21. Chapter 1 LHAASO Instruments and Detector technology / Xin-hua Ma [et al.] // Chinese Phys. C – 2022. – Vol. 46, No. 3. – 035001.
22. Chapter 4 Cosmic-ray physics / Zhen Cao, [et al.] // Chinese Physics C. – 2022. – Vol. 46, No. 3. – 030004.
23. Influence of soil environment on performance of EAS electron–neutron detector array / D.-X. Xiao , [et al.] // Astrophysics and Space Science – 2022. – Vol. 367, No. 8. – P – 75.
24. 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. – V. 82:155. — 8 P. – URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10082-w>.
25. Мухамедшин Р.А. Об изучении сигнатуры метрики пространства по корреляциям частиц во взаимодействиях адронов // Известия РАН. Сер. Физ. (принята в печать).
26. Лидванский А.С. Вариации потока мюонов космических лучей во время гроз/ Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С.// ЖЭТФ, 2022 Т. 161, № 4 С. 497–514.

27. The Search for Neutrino Events from the Blazar PKS 0735+17 at the Baksan Underground Scintillation Telescope / V.B.Petkov [et al.] // PoS(MUTO2022)033 – URL: <https://doi.org/10.22323/1.425.0033>.

A.3 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ

1. Геонейтрино и электрическое поле Земли / Безруков Л. Б. [и др.] // Ядерная физика. – 2022. – Т. 85, № 6. – С. – 454.

A.6 Иные публикации по теме

1. Potassium abundance in the Earth and Borexino data / L.Bezrukov [et al.] // ArXiv>physics>Instrumentation and detectors. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08531> (дата обращения 17.02.2022).

2. Хаердинов Н.С. Корреляция интенсивности мюонов с задержкой радиосигналов со спутников GPS, регистрируемых в горном ущелье/ Хаердинов Н.С. и др.// 37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, г. Москва, 27 июня – 02 июля 2022 г., Сборник тезисов. – С. 108.

3. А.С. Лидванский А.Е. Чудаков как ученый-пионер//УФН, 2022. Т. 192, № 9, С. 1036-1047.

4. В.Б. Петков. Поиск на БПСТ нейтринных событий от блазара PKS 0735+17 // Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения – 2022», САО РАН, п. Нижний Архыз, 23-27 мая 2022 г./ URL: <https://www.sao.ru/blcat/multiface/ru/index.php>.