#### 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. № 121121700293-1 Рег. №

**УТВЕРЖДАЮ** Директор ИЯИ РАН, профессор РАН М.В. Либанов «28» января 2022 г. OTYPT

#### О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

121121700293-1

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

(заключительный за 2021 год)

ΦЦП

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

Г.И. Рубцов «28» января 2022 г.

### СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, заместитель директора ИЯИ РАН, д.ф-м.н.,			
профессор РАН	kyll	28.01.2022	_ Г.И. Рубцов
	лодпись, дата		(разделы 13, 14)
Исполнители:			
зав. лабораторией,	Acres	28.01.2022	Г. П. П. со то то то то то
д.фм.н., члк. РАН	28.01.2022		_ І.В. ДОМОГАЦКИИ (раздельц 1-6)
	подпись	, дата	(pastenti 1-0)
г.н.с., д.фм.н., члк. РАН	Balfin	28.01.2022	_ В.Н. Гаврин
	подпись, дата		(разделы 7, 8)
г.н.с., д.фм.н.	Stend	28 01 2022	ВБ Петков
	подпись, дата		_ (разделы 9-11)
	Glern		
г.н.с., д.фм.н.	<u> </u>	28.01.2022	_ Л.Б. Безруков
	Нара	, дата	(раздел 17)
с.н.с., к.фм.н.	Juiper	28.01.2022	Н.Ю. Агафонова
	подпись, дата		(раздел 9)
зам. зав. филиалом по научной	it und		
работе, к.фм.н.	Jan	28.01.2022	А.М. Гангапшев
	подпись	, дата	(раздел 12)
внс лф-мн	Indus	28 01 2022	БК Лубсандоржиев
	подпись, дата	, дата	(разделы 11, 13)
	102		
в.н.с., д.фм.н.		28.01.2022	- Ю.В. Стенькин
подпись, дата	, дата	(раздел 15)	
в.н.с., д.фм.н.	plypelee	28.01.2022	Р.А. Мухамедшин
	подпись, дата (ра		(разделы 15, 16)
	R.L.L.	28 01 2022	А.С. Пильононий
в.н.с., к.фм.н.	ПОЛПИСЬ		- А.С. ЛИДВАНСКИИ (раздел 18)
	подпись, дата		(Public 10)

#### РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 104 с., 23 рис., 6 табл., 20 источн., 0 прил.

Ключевые слова: НЕЙТРИНО, МЮОН, БАЙКАЛЬСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ГЛОБАЛЬНАЯ НЕЙТРИННАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ, СИСТЕМА BARS, ИСТОЧНИКИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО, НЕЙТРИННАЯ КАРТА НЕБА, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ. РАСШИРЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ИСКУССТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЕВАЯ МИШЕНЬ, НЕЙТРИНО, АНТИНЕЙТРИНО, СВЕРХНОВЫЕ, ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА ДВОЙНОЙ НИЗКОФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ, БЕТА-РАСПАД, КРИОГЕННЫЙ БОЛОМЕТР, <sup>100</sup>Мо, ДЕТЕКТОР, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ. КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ. ИСТОЧНИКИ МАССОВЫЙ COCTAB КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, МЮОННЫЙ ИЗБЫТОК, АДРОННЫЕ МОДЕЛИ,

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2021 год.

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

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

Объектом исследования являются устройства и методы глубоководной регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий.

Цель работы — создание и эксплуатация нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в озере Байкал для поиска и исследований потоков астрофизических нейтрино высоких энергий.

Работы в 2021 году выполнялись по отлаженной в предыдущие годы методологии, включающей исследования и разработки по повышению чувствительности и улучшению характеристик глубоководной регистрирующей аппаратуры.

В результате в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2021 года был установлен 1 новый кластер и запущен в эксплуатацию телескоп из 8 кластеров с эффективным объемом 0,4 км<sup>3</sup>.

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

Объектом исследования является комплекс устройств и программного обеспечения по сбору, передаче и накоплению данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Цель работы – создание базы экспериментальных данных по регистрации мюонов и нейтрино, доступных для исследований в области астрофизики и нейтринной астрономии, а также для обмена данными между научными коллаборациями.

Методология исследований и разработок заключается в выявлении новейших средств электроники, программных средств обработки больших массивов данных, разработки конкретных устройств, увеличивающих скорость сбора и передачи данных, точность калибровки, позиционирования и синхронизации систем телескопа, повышении скорости и автоматизации процессов обработки данных, разработки стандарта представления данных для обмена с зарубежными научными коллаборациями.

В результате выполнения работ в 2021 году в состав телескопа были установлены 2 полупроводниковых импульсных лазера для межкластерной калибровки оптических модулей, доработаны системы внутрикластерной и межкластерной синхронизации до требуемой точности не более 4 нсек. Продолжены работы по расширению возможностей «off line» обработки данных пакета программ BARS: введены программы автоматической обработки первичных данных, разработан блок программ по автоматическому восстановлению каскадов и траекторий мюонов, разработан блок быстрой обработки данных для формирования сообщений («алертов») и отклика на внешние «алерты». Проводится регулярный обмен результатами и данными в рамках научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» по программе «multi-messenger». Разработки в рамках задачи 2 обеспечили в 2021 году непрерывный набор и накоплений данных телескопа Baikal-GVD из 8 кластеров. Все разработки и результаты по задаче 2 уникальны и имеют важнейшее, ключевое значение для развития глубоководных нейтринных телескопов.

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

Предметом исследования являются физические и программные средства моделирования отклика регистрирующих систем телескопа на события взаимодействия нейтрино и вторичных мюонов с водной средой озера Байкал.

Цель исследования – оптимизация характеристик систем сбора и обработки данных телескопа с учетом аппаратных шумов и природного фона свечения вод озера Байкал, оптимизация и реализация методов восстановления параметров исходных частиц по данным телескопа.

Метод исследования заключается в физическом и программном моделировании работы телескопа. Физическое моделирование осуществляется с помощью стенда, где исследуются характеристики всех электронных систем сбора и передачи данных телескопа. Программное моделирование заключается в пошаговом, на основании известных принципов, расчёте прохождения первичных частиц космических лучей до установки (с использованием пакетов CORSIKA, ANIS, MUM), определении светового поля в объёме детектора, амплитуд срабатывания оптических модулей, а затем наложении программного аналога аппаратного триггера с учётом текущей геометрии детектора, влияния шумов и параметров воды.

В результате для конфигурации телескопа из 8 кластеров были установлены оптимальные условия для триггеров, порогов по амплитуде регистрируемых сигналов и первичных фильтров, что позволило на порядки сократить поток передаваемой информации, минимизировать потери полезных сигналов и мертвое время при регистрации и передаче сигналов от Телескопа в Береговой центр, а при дальнейшей off line обработке выделять достоверные события актов взаимодействия мюонов с водной средой в пределах эффективного объема телескопа (каскадов (ливней) и траекторий мюонов) и иметь модельный набор событий, позволяющий контролировать достоверность методов восстановления, применяющихся к реальным данным телескопа.

Использование результатов исследований при эксплуатации нейтринного телескопа Baikal-GVD позволило существенно улучшить качество накапливаемых данных и выделять при последующем анализе и обработке те события, которые генерированы астрофизическими нейтрино высоких энергий, что, безусловно, относится к результатам мирового уровня.

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

Предметом исследования являются современные математические и программные средства для обработки больших массивов экспериментальных данных для крупномасштабных физических установок.

Цель исследований – разработка приложений к системе BARS для максимально возможной автоматизации и ускорения процессов анализа и обработки данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Метод исследований – построение алгоритмов анализа и обработки, изучение и освоение наилучших практик методов анализа и обработки, создание программных

приложений к системе BARS для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий.

В результате исследований в систему БАРС включены новые пакеты программ межкластерной обработки данных, пакет быстрой обработки данных для формирования «алертов» и отклика на внешние «алерты», продолжены работы по разработке физикоматематических основ моделирования физических процессов взаимодействия потоков космических частиц с водной средой и отклика регистрирующих систем телескопа, разработаны методы обработки данных с использованием «нейронных сетей» и машинного обучения.

Все разработанные приложения использовались для получения результатов исследований данных телескопа Baikal-GVD в поисках астрофизических нейтрино высоких энергий, потоков нейтрино атмосферного происхождения и в решении задачи темной материи. Пакеты программ разработаны с использованием мирового опыта разработки систем анализа и обработки данных для крупномасштабных установок.

### 5. Задача «Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий»

Предмет исследования – потоки астрофизических нейтрино высоких энергий.

Цель исследований – поиск источников и построение нейтринной карты неба.

Метод исследований – многолетнее накопление и обработка данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, определение энергий и направлений прихода астрофизических нейтрино, использование информации, полученной другими научными группами и другими устройствами измерений.

В 2021 году выполнен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, накопленных в 2019, 2020 и в 2021 годах. В результате обработки и анализа был сформирован банк экспериментальных данных, содержащий 6270 события и удовлетворяющих критериям отбора каскадов с энергией выше 10 ТэВ с множественностью числа сработавших оптических детекторов телескопа больше девяти. После восстановления энергии и направления отобранных событий получено распределение возможных источников этих событий на небесной сфере.

В результате МК-моделирования с использованием данных IceCube были определены более строгие критерии отбора каскадных событий от диффузного потока нейтрино: множественность числа сработавших оптических детекторов должна быть больше или равна двадцати, а восстановленная энергия каскада выше 100 ТэВ с ожидаемой частотой регистрации 0,6 астрофизических нейтрино в год в одном кластере телескопа.

В 2021 году велись исследования по поиску нейтринных событий, ассоциированных с данными нейтринных телескопов ANTARES и IceCube. Поиск ассоциированных нейтринных событий проводился в угловом интервале менее 5 градусов между событием ANTARES и событием Baikal-GVD во временных интервалах  $\pm 1$  час и  $\pm 12$  часов. В результате этого анализа не было обнаружено событий GVD совпадающих с "алерт"-событиями ANTARS. Анализ алерт-события IceCube от 8 декабря 2021 года выявил совпадающее событие с достоверностью 2.7 о. В настоящее время параметры события уточняются в связи с большой научной значимостью возможностей регистрации событий от одного источника разными установками.

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

Объект исследования – массив накопленных экспериментальных данных по регистрации вторичных мюонов и нейтрино телескопом Baikal-GVD.

Цель исследований – проверка гипотез о формах существования темной материи и других частиц, существование которых предсказывается в рамках расширения Стандартной модели и вне ее.

Методы исследований – анализ и обработка накопленных за годы данных для выявления избыточных потоков нейтрино прогнозируемого спектра энергий и направлений относительно фона нейтрино атмосферного происхождения; обмен данными с коллаборациями, осуществляющими астрофизические исследования на других физических принципах в рамках международных программ по развитию многоканальной (multi messengers) астрономии.

В 2021 году была решена задача быстрой обработки данных, что необходимо для участия в международных программах исследований в наиболее перспективном направлении в достижении поставленных целей. 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. К. настоящему времени проведена обработка и анализ событий за 2016-2020 годы. Тем самым сформирована начальная база данных для статистического анализа выбранных направлений на предполагаемые астрофизические объекты, как источники аннигиляций частиц темной материи, в заданных энергетических интервалах, соответствующих различным массам темной частицы. Стандартными источниками рассматриваются центр Галактики, темные сфероидальные карликовые галактики, Солнце и ядро Земли. До готовых к публикации результатов в 2021 году, в

продолжение ранее опубликованных работ на телескопе меньшего объема, исследование не доведено, требуя дальнейшего изучения фона, в плане набора большей статистики данных и времени наблюдения, и более подробной симуляции сигнала компьютерными средствами. Однако, перспективы успеха с каждым годом возрастают в связи с существенным увеличением эффективного объема телескопа Baikal-GVD и увеличением скорости обработки данных.

7. Задача «Измерение 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».

Объектом исследования являются нейтринное излучение от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино.

Цель работы — Поиск короткобазовых нейтринных осцилляций и новых свойств нейтрино в экспериментах с искусственными источниками нейтрино.

В рамках работ в эксперименте BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) получен результат измерения скорости захвата нейтрино в двух концентрических галлиевых мишенях на двух расстояниях от интенсивного нейтринного источника <sup>51</sup>Cr. Результаты эксперимента согласуются с осцилляционными переходами электронных нейтрино в стерильные состояния с относительно большой разностью квадратов масс  $\Delta m^2$  (>0.5 эВ<sup>2</sup>) и углом смешивания sin<sup>2</sup>2 $\theta$  (~0.4). Полученный дефицит нейтрино в зонах подтверждает и усиливает «галлиевую аномалию».

По итогам эксперимента подготовлены статьи для публикации в журнале Physical Review Letters и Physical Review C.

8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».

Объектом исследования является поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа (НБНТ).

Цель работы — Подготовка проекта Нового баксанского нейтринного телескопа (НБНТ).

Для выбора оптимальной геометрии большого детектора с массой мишени 5000 тон проведено моделирование и сравнение отклика двух геометрий детектора: сфера (радиус R=14.1 м) и "пилюля" (радиус полусфер r=11.2 м, высота цилиндрической части h=14.9 м).

Объем для обеих геометрий одинаков. Из рассчитанного отклика детекторов таких геометрий, получено, что сферическая геометрия выглядит более предпочтительно.

9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD».

Объектом исследования являются редкие явления такие как вспышки Сверхновых звезд в нашей Галактике.

Целью работы является 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.

В 2021 году закончился физический этап набора данных детектора АСД (Украина, Донецкий рег.). По данным детектора АСД за 43 года работы (1977 – 2020) получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 18.56 г. на 90% уровне достоверности.

Детектор LVD (Гран Сассо, Италия) в 2021 году работал в штатном режиме, без отключений. Дежурства на установке и коллаборационные совещания велись удаленно. По данным работы LVD за 29 лет работы (1992 – 2021), получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 12.6 г. на 90% уровне достоверности.

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ, а также обработка и анализ полученных данных. Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2021 года составляет 35.84 года. Получено верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике по данным БПСТ, на 90% доверительном уровне оно составляет менее 1 события за 15.6 г.

10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».

Объектом исследования являются нейтринные всплески от вспышек сверхновых звезд.

Целью исследования является передача информации о кандидатах на нейтринный всплеск в детекторе БПСТ в мировую сеть SNEWS.

Глобальную сеть SNEWS (SuperNova Early Warning System— Система раннего оповещения о вспышках сверхновых) образуют детекторы Super-K, LVD, IceCube, Borexino, KamLAND, HALO, Daya Bay. Эта сеть, созданная в 2004 году, специально предназначена для поиска нейтринных всплесков от сверхновых. Информация с детекторов о кандидатах на нейтринное событие посылается на сервер SNEWS в

Брукхейвенскую национальную лабораторию, США. Цель SNEWS—предоставить астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке сверхновой в нашей Галактике с тем, чтобы экспериментаторы могли наблюдать астрономические следствия гравитационного коллапса звезды. SNEWS увеличивает достоверность событий, детектируемых одновременно несколькими детекторами на пороге их чувствительности.

Проводилась работа по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS.

11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».

Объектом исследования является анализ данных установок Ковер-2 и TAIGA.

Цель работы — разработать новые численные методы анализа данных и применить их для определения первичного состава космических лучей.

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке "Ковер-2" по всем физическим задачам. Проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Чистое время набора информации составляет 84% календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ, 97% для регистрации мюонной компоненты ШАЛ на Мюоннном Детекторе (МД) и 98% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (HM).

По экспериментальным данным установки "Ковер-2" проведен поиск гаммаизлучения с энергией  $E_{\gamma}$ >100 ТэВ от источников Суд X-3 и Суд X-1. Вспышечная активность источника Суд X-3 была обнаружена в период с 19 по 26 апреля 2021года, а источника Суд X-1 – в период с 14 по 20 июня 2020 года

В рамках задачи проводились измерения на двух узкоугольных атмосферных черенковских телескопах TAIGA-IACT. С помощью этих телескопов продолжались исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от галактических и внегалактических локальных источников. На сцинтилляционной установке TAIGA-GRANDE экспериментального комплекса TAIGA исследовался диффузный поток гамма-квантов высоких энергий.

12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных

#### аксионов».

Объектом исследования являются солнечные аксионы с 9.4 кэВ.

Целью работы является обнаружение аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе ядер <sup>83</sup>Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения  $A^{+83}$ Kr  $\rightarrow {}^{83}$ Kr  $\rightarrow {}^{83}$ Kr  $+ \gamma$ ,e (9.4 кэВ) на ядрах  ${}^{83}$ Kr в мишени (рабочий газ пропорционального счетчика). Таким же образом могут регистрироваться аксионы с энергией 9.4 кэв, рожденные в результате эффекта Примакова в недрах Солнца.

Проводится поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер  $^{83}$ Кг на Солнце с помощью реакции резонансного поглощения  $A + ^{83}$ Кг  $\rightarrow ^{83}$ Кг  $\rightarrow ^{83}$ Кг  $\rightarrow ^{83}$ Кг  $\rightarrow ^{83}$ Кг +  $\gamma$ ,е (9.4 кэВ) на ядрах  $^{83}$ Кг в мишени (рабочий газ пропорционального счетчика). Таким же образом могут регистрироваться аксионы с энергией 9.4 кэв, рожденные в результате эффекта Примакова в недрах Солнца.

Для регистрации ү-квантов и электронов, возникающих в результате разрядки ядерного уровня, использовался пропорциональный счетчик, заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900. Обработаны результаты за 777 часов живого времени измерений. Идет обработка результатов за 860 часов живого времени измерений.

В качестве лучшей альтернативы рассматривается возможность использования ядра <sup>57</sup>Fe вместо <sup>83</sup>Kr. В этом случае чувствительность детектора с данным изотопом с той же массой мишени будет на порядок выше. Продолжаются работы по созданию полупроводникового детектора на основе кристалла пирита. Параллельно идет разработка эксперимента с пропорциональными счетчиками из стального корпуса – в данном случае корпус детектора (содержание F-57 ~2%) является мишенью для аксионов.

13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»

Объектом исследования являются результаты по изучению космических лучей, полученные на установках Telescope Array, TAIGA, PRISMA-32, ENDA-YBJ (прототип ENDA-LHAASO), ENDA-LHAASO (работающий первый кластер установки).

Цель работы — изучение спектра и состава космических лучей высоких и сверхвысоких энергий, а также создание установки ENDA-LHAASO в рамках международной обсерватории LHAASO.

Проводился анализ данных по измерению флуоресцентногоизлучения порождаемого широкими атмосферными ливнями, вызванными космическими лучами в атмосфере Земли, и данные по черенковскому излучению, также порождаемому этими

ливнями, полученные установкой TALE FD за 4 года работы. Для реконструкции массового состава космических лучей использовалась традиционная техника, основанная на построении распределения глубин максимумов развития ливней X<sub>max</sub> и ее зависимости от энергии. Результаты свидетельствуют об утяжеление состава с ростом энергии в исследуемом диапазоне, что хорошо согласуется с моделью галактического происхождения космических лучей этих энергий с обрезанием инжекционного спектра, зависящим от магнитной жесткости.

Выполнены измерения массового состава и энергетического спектра первичного космического излучения в диапазоне  $2 \times 10^{14}$  - $10^{18}$  эВ на широкоугольных черенковских установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE экспериментального комплекса TAIGA. На установке TAIGA-HiSCORE измерение энергетического спектра первичного космического излучения в диапазоне  $2 \times 10^{14}$  - $10^{16}$  эВ. Данные установок Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE хорошо согласуются между собой и с данными других экспериментов от прямых спутниковых и баллонных экспериментов до гигантских установок по изучению космических лучей ультравысоких энергий

Работы по созданию высокогорной установки нового типа ENDA-LHAASO в 2021 г. проводились в соответствии с планом работ, но удаленно. Из-за пандемии нам не удалось организовать поездку на место проведения эксперимента (КНР). Был сделан упор на работы, которые можно проводить удаленно. Были проведены тестовые измерения на этих нескольких прототипах установки, отладка онлайн программ и анализ получаемых экспериментальных данных, сравнение их с результатами Монте-Карло моделирования. Кроме того, проводились работы в рамках коллаборации LHAASO, написание и обсуждение статей, докладов и другие работы.

В результате НИР в 2021 г. были впервые получены результаты по адронной компоненте ШАЛ идентичными установками на существенно различных высотах над уровнем моря. Был решен ряд методических проблем, связанных со стабильностью работы установки, возможного влияния влажности грунта на конечный результат, изменялась геометрия расположения детекторов и т. д. Была усовершенствована программа обработки экспериментальных и расчетных данных, позволившая существенно ускорить время ее работы. В соавторстве с китайскими коллегами были подготовлены и опубликованы работы в ведущих журналах, в том числе в таких как Nature и Science.

14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».

Объектом исследования являются методы реконструкции направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий; методы оценки массового состава космических лучей из распределения направлений их прихода; данные эксперимента Telescope Array о распределении направлений прихода космических лучей.

Цели исследования: построение новых методов реконструкции направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий, имеющих лучшее угловое разрешение по сравнению со стандартной реконструкцией; применение ранее построенного нового метода оценки массового состава космических лучей из анализа направлений их прихода к данным Telescope Array; поиск анизотропии направлений прихода космических лучей зарегистрированных в эксперименте Telescope Array являющейся причиной наблюдающейся анизотропии спектра этих космических лучей.

В выполненных ранее в рамках другого проекта работах участниками исследовательского коллектива был предложен новый перспективный метод анализа массового состава космических лучей ультравысоких энергий, основанный на анализе направлений их прихода. В данной работе этот метод был применен к данным эксперимента Telescope Array, в результате получены новые независимые и консервативные ограничения на долю протонов и долю ядер железа в потоке космических лучей с энергиями более 10 ЭэВ.

Был разработан новый метод реконструкции направлений прихода космических лучей, детектируемых наземной решеткой эксперимента Telescope Array, метод основан на применении сверточных нейронных сетей. Метод позволяет улучшить реконструкцию направления прихода ШАЛ примерно на четверть для протонов и ядер и на треть для фотонов.

Был произведен поиск анизотропии направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий, детектированных наземной решеткой эксперимента Telescope Array, он выявил значимый избыток событий с энергиями более приблизительно 25 ЭэВ расположенный в направлении сверхскопления галактик Персея-Рыб.

15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях 10<sup>11</sup> – 10<sup>17</sup> эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях».

Объектом исследования являются сильные взаимодействия нуклонов и мезонов при сверхвысоких энергиях, включающих область энергий Большого Адронного Коллайдера (LHC), ( $\sqrt{s} < 13$  ТэВ в системе центра масс, с.ц.м.), прежде всего, связь между т.н.

фрагментационной областью вторичных частиц ( $x_F \approx p/p_0 \gtrsim 0.01$ ) и центральной областью ( $\eta \lesssim 3$ )

Цель работы — доводка и юстировка программного пакета FANSY 2.0 для детального моделирования взаимодействий адронов (барионов и мезонов) с нуклонами в широкой области энергий столкновения адронов на основе новых экспериментальных данных.

Главные эксперименты на LHC (ALICE, ATLAS, CMS) дают информацию, в основном, о параметрах центральной кинематической области взаимодействий адронов, играющей второстепенную роль в развитии т.н. широких атмосферных ливней (ШАЛ) от первичных космических частиц, но являющейся весьма важной для генерации мюонной компоненты ШАЛ – источника информации об энергии и массовом составе первичных частиц. Информация о фрагментационной области во взаимодействиях адронов (мезонов и нуклонов) с нуклонами и ядрами, определяющей основные параметры развития ШАЛ, имеется только при энергиях ниже  $\sqrt{s} \leq 63$  ГэВ. Проведена дальнейшая отработка программного пакета FANSY 2.0 с упором на более точное воспроизведение характеристик вторичных частиц адронов при моделировании взаимодействий, как в фрагментационной, так и в центральной областях. При рассмотрении фрагментационной области были уточнены параметры алгоритма процесса копланаризации поперечных импульсов наиболее энергичных вторичных частиц (ЭВЧ)

# 16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»

Объектом исследования являются двухчастичные азимутальные корреляции в центральной кинематической области (η < 2.4) в протон-протонных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях.

Цель работы — изучения возможного влияния явления компланарной генерации наиболее энергичных частиц, обнаруженной в космических лучах при сверхвысоких энергиях в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами, на двухчастичные азимутальные корреляции характеристики частиц в центральной области, а именно, на т.н. long-range near-side «ridge» эффект, обнаруженный в эксперименте CMS на LHC.

Показано, что в рамках модели FANSY 2.0 near-side «ridge» эффект, который не объясняется ни одной из существующих теоретических моделей, может являться побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц.

17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью 10<sup>-19</sup>

Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям».

Объектом исследования является оптоакустическая гравитационная антенна (ОГРАН).

Цель работы:

- Модернизация действующего гравитационного детектора и отработка режима долговременных измерений.
- Измерения сейсмо-гравитационного фона шумов туннеля Баксанской нейтринной обсерватории в сравнении с европейскими подземными сайтами, конкурентами по размещению гравитационных антенн следующего поколения.

По первому направлению выполнялась модернизация оптоакустических узлов установки ОГРАН с целью достижению проектных параметров по чувствительности антенны, составляющей 10–19 по метрическим возмущениям при максимально возможном расширении полосы приема (до 10 Гц и более).

По второму направлению выполнялся анализ ранее полученных данных по спектрам сейсмических возмущений в туннелях Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в диапазоне частот (10–3–100) Гц. Проведен расчет гравитационных (ньютоновских) шумов окружения с использованием формул упрощенной модели Саулсона. Проведено сравнение сейсмо-гравитационного фона БНО с другими подземными лабораториями в рамках формализма (классификации) Петерсона с целью решения задачи селекции оптимального европейского сайта для размещения гравитационных антенн нового поколения 3G.

18. 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»

Объектом исследования являются являются вариации вторичных частиц космических лучей и локальные возмущения геомагнитного поля в период магнитосферных суббурь.

Цель работы — исследование атмосферно - ионосферных эффектов на средних широтах в период магнитосферных суббурь.

В 2021 году продолжался набор экспериментальных данных. Из двух удалённых пунктов велось непрерывное видеонаблюдение за ночным небом с целью регистрации свечения во время аномальных геофизических эффектов. Проводилась архивация ранее

набранного материала. Кроме того, работа велась по анализу и объяснению результатов, полученных за предыдущие два года.

Эксперимент по изучению вариаций потоков космических лучей во время гроз с течением времени перерос во всестороннее исследование геофизических процессов, в которых участвуют космические лучи. Последовательно к измерениям давления и приземного поля были добавлены данные высокоточных измерений геомагнитного поля, видеонаблюдения свечения в атмосфере, а также сейсмические данные (данные наклономеров в штольне БНО и международные базы данных о землетрясениях). В прошедшем году к этому перечню были добавлены спутниковые часы, позволяющие измерять вариации задержек спутниковых сигналов системы GPS навигации. В прошедшем году подробно исследовались корреляции этих задержек с возмущениями интенсивности мюонов космических лучей.

### СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ2
РЕФЕРАТ
СОДЕРЖАНИЕ17
ВВЕДЕНИЕ19
1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершенных НИОКР (Задача №1)
2. Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» (Задача №2)
<ol> <li>Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD (Задача №3)</li></ol>
<ol> <li>Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий (Задача №4)40</li> </ol>
<ol> <li>Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий (Задача №5)41</li> </ol>
6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача №6)
<ol> <li>Четвертый этап эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) (Задача № 7)</li></ol>
8. Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора (Задача № 8)
<ol> <li>Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD (Задача № 9)</li></ol>
9.1. Анализ данных детекторов LVD и АСД
9.1.1. Эксперимент АСД
9.1.2. Эксперимент LVD
9.2. Анализ данных детектора БПСТ
9.3. Анализ совпадений импульсов в детекторах LVD и БПСТ во время GW17081756
<ol> <li>Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS (Задача №10)</li></ol>
11. Поиск точечных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок КОВЕР-2 и TAIGA. Измерение потока (или получение ограничения на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ (Задача №11)
11.1. Анализ данных, полученных на установке Ковер-2
11.2. Участие в работе международной коллаборации TAIGA61

12. Получение ограничений или обнаружение солнечных адронных аксионов (Задача №12) ......63 13. Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ (Задача №13).....64 Изучение спектра и массового состава космических лучей по данным 13.1. Tunka-133 **TAIGA-HiSCORE** широкоугольных черенковских установок И экспериментального комплекса TAIGA ......64 Изучение спектра и массового состава космических лучей по данным установки 13.2. 13.3. Создание установки ENDA (Electron-Neutron Detector Array) в рамках международной обсерватории LHAASO......67 Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на 14. небесной сфере (Задача №14).....67 Разработка новой модели взаимодействий адронов FANSY 2.0 воспроизводящей, 15. во-первых, более широкий (сравнительно с другими моделями) круг основных экспериментальных результатов в области энергий 10<sup>11</sup> – 10<sup>18</sup> эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; во-вторых, моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях (Задача №15)......71 16. Сравнительный анализ экспериментальных И расчетных ланных по экспериментальным азимутальным эффектам, наблюдаемым в экспериментах на БАК и в космических лучах (Задача № 16).....72 17. Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывной регистрации с чувствительностью 10<sup>-19</sup> Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям (Задача № 17)......74 Модернизация действующего гравитационного детектора и отработка режима 17.1. 17.2. 17.3. 17.4. 18. Организация прецизионных измерений вариаций электрического и магнитного 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 № 18)......83 ПУБЛИКАЦИИ......96

#### ВВЕДЕНИЕ

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

В 2021 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, ANTARES в Средиземном море, Baikal-GVD в озере Байкал и проект KM3Net в Средиземном море, который находится в начальной стадии своего развития.

В 2021 году в озере Байкал был установлен восьмой по счету кластер нейтринного телескопа Baikak-GVD [1]. С его вводом в режим регистрации данных эффективный объем телескопа достиг значения 0.4 км3 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 эксплуатация телескопа Baikal-GVD непрерывного, в режиме обеспечивается надежностью долговременного набора данных 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 2021 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, занимающихся астрономией и астрофизикой. Начато сотрудничество с научной программой Европейского сообщества по сотрудничеству с российским установками класса «мега сайенс» "Kremlin+".

Существенный вклад в кооперацию вносит ежемесячный электронный бюллетень, издаваемый Кристианом Шпирингом.

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.

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 терафлопов, 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 Монте-Карло. Многие процессы обработки телескопа метолами 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 террабайт), созданные за счет обновления приборной базы, а также мощности вычислительных систем, предоставленные ОИЯИ (Дубна).

# 5. Задача «Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий

К 2011 году уровень знаний о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий ( $10^{13} - 10^{18}$ ) эВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц темной материи был сформирован, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе HT200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние годы, начиная с 2009-го) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины.

В 2021 году чувствительность, достигнутая на телескопе из 8 кластеров Baikal-GVD, вплотную приблизилась к чувствительности IceCube, что позволило приступить к решению задач астрофизики, нейтринной астрономии и космологии, перспективы которых были открыты впервые результатами регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий, а также в исследованиях последних лет в поисках нейтрино от

астрофизических источников, диффузных потоков нейтрино и первых результатов построения нейтринной карты неба.

# 6. 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 HT-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.

7. Задача «Измерение скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам».

Поиск стерильных нейтрино одна из актуальных задач фундаментальной науки, стоящая в одном ряду с открытием нейтринных осцилляций, показавших существование массы нейтрино и новой физики за пределами Стандартной Модели (СМ). Существующая СМ с тремя активными нейтрино не согласуется с полученными в ряде предыдущих нейтринных экспериментов (ускорительных, галлиевых с интенсивными искусственными источниками, реакторных с расстояниями до 100 м) результатами, для объяснения которых требуется введение четвертого нестандартного стерильного нейтрино с масштабом массы порядка 1 эВ. В работе [2] представлен ряд экспериментов по поиску стерильных нейтрино с использованием атомных реакторов, ускорителей, а также

высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино и антинейтрино. В настоящее время идёт подготовка и реализация нескольких из них с различными источниками нейтрино. В новых нейтринных экспериментах получены противоречивые результаты.

Использование компактных интенсивных искусственных источников предоставляет уникальную возможность исследования картины осцилляций в стерильные состояния на очень коротких расстояниях с известным моноэнергетическим потоком нейтрино. С использованием высокоинтенсивного источника нейтрино <sup>51</sup>Сг предложен Баксанский эксперимент по поиску на очень коротких расстояниях осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на двойной металлической Ga мишени (BEST) [2-6] на базе УНУ Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Создание жидкосцинтилляционного детектора нейтрино с эффективной массой не менее 1 кт с высоким энергетическим разрешением (не хуже 3% при 1 МэВ энерговыделения) позволит измерять потоки борных нейтрино с точностью ~1%, что много лучше, чем в существующих экспериментах в мире (Borexino, KamLAND и SNO). До сегодняшнего дня точность существующих измерений потоков борных нейтрино не позволяет однозначно сделать выбор между моделями с низкой или высокой металличностью внутренних областей Солнца. Достижение более высокой точности измерений может решить указанную проблему. Кроме того, высокое энергетическое разрешение детектора и низкий уровень фона дадут возможности проведения прецизионных измерений потоков нейтрино в энергетическом диапазоне 1-5 МэВ.

8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа.».

Конфигурация ББНТ определяется формой емкости сцинтиллятора в телескопе. Рассматривалось три варианта: цилиндр, сфера и две полусферы с цилиндром между ними ("пилюля"). Изготовление цилиндра проще, чем сферы. Вариант "пилюли", промежуточный вариант, мог иметь определенные преимущества. С другой стороны, восстановление энергии для сферы проще, чем для двух других опций, что в конечном счете ведет к улучшению разрешения. От цилиндрического варианта было решено отказаться из-за высокой неоднородности светосбора.

9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».

Заключительные этапы термоядерной эволюции звезд представляют большой интерес для теоретической и наблюдательной астрофизики. В процессе гравитационного

коллапса звезд с достаточно большой массой образуются нейтронные звезды, пульсары, Сверхновые, черные дыры, источник рентгеновского и гамма-излучения, излучение которых дает сведения о свойствах вещества в условиях экстремальных плотностей и температур, о структуре Галактики, процессах синтеза тяжелых элементов, свойствах межзвездной среды. Коллапс звезды в большинстве случаев сопровождается вспышкой излучения всех видов нейтрино (ароматов), высокая проникающая способность которых позволяет получить информацию непосредственно из центральных слоев звезды, а также ИЗ областей Галактики, недоступных для наблюдения другими методами. Гравитационный коллапс звезды, не сопровождающийся сбросом ее оболочки и заметным электромагнитным излучением, который предсказывается рядом моделей, можно, зарегистрировать по сопутствующему излучению нейтрино [7].

Возникновение в Галактике мощных потоков нейтрино связано с образованием нейтронных звезд и черных дыр – в ходе гравитационного коллапса звезд на последнем этапе их эволюции. Источником энергии служит при этом потенциальная энергия звезды в собственном гравитационном поле  $10^{52} - 10^{54}$  эрг, которая высвобождается при коллапсе. Для экспериментов по обнаружению и излучению нейтринного излучения от коллапсирующей звезды существенным являются следующие характеристики: энергия, которая уносится нейтрино различных типов; длительность вспышки; энергетический спектр нейтрино каждого типа; временной ход энергетического спектра. Параметры нейтринной вспышки при численном моделировании были получены во многих работах [8, 9]. При этом в большинстве случаев изучается начальная стадия коллапса, до образования горячей нейтронной звезды, а нейтринное излучение рассматривается с целью выяснения его влияния на сброс оболочки и появления Сверхновой.

На начальном этапе коллапса звезды с массой > 1.5 Мс нейтрино излучаются в основном через процессы аннигиляции  $e^+e^-$  пар, однако вскоре появления свободных нуклонов при фотодиссоциации ядер элементов группы железа приводит к преобладанию урка-процессов. В начале нейтринное излучение состоит в основном из двух типов нейтрино:  $v_e$  и  $v_e$ . Из-за интенсивной нейтронизации вещества преобладают электронные нейтрино. Затем, по мере прохождения через вещество звезды нейтрино превращаются в другие ароматы. Спектр нейтрино после 100 мс от взрыва представлен на рис. 1. Из теории «стандартного» коллапса следует, что суммарная энергия, уносимая нейтрино всех типов: соответствует ~ 0.1 массы ядра звезды и делится поровну между этими шестью компонентами [10].



Рис. 1. Спектры нейтрино через 100 мс после отскока

Для регистрации электронных нейтрино и антинейтрино и начали строить детекторы с большими массами рабочего вещества. В качестве рабочих веществ обычно применяется вода и сцинтилляторы. Для регистрации  $\overline{v}_e$  используется реакция обратного бета-распада:  $\overline{v}_e + p \rightarrow n + e^+$ , которая дает основной вклад в эффект.

Частоту коллапсов звезд в Галактике можно было бы получить, зная влияние исходных параметров звезды, таких как масса, химический состав, магнитное поле, вращение, на ее эволюцию. Теория эволюции пока не может установить эту зависимость, к тому же распределение звезд по исходным параметрам известно недостаточно хорошо.

Предполагая, что количество звезд в Галактике примерно постоянно, а также учитывая скорость звездообразования, можно сделать заключение о максимальной допустимой частоте коллапсов: около одного в 50 лет [11] Наиболее надежным путем является использование данных наблюдений предполагаемых остатков звезд после гравитационных коллапсов. Средние оценки дают от 0 до 160 лет [12]. 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 2021 году событий, связанных со взрывами Сверхновых звезд обнаружено не было. Подземные установки АСД, БПСТ и LVD специально проектировались для регистрации нейтрино от вспышек сверхновых.

# 10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».

Вся информация полученная с БПСТ поступает в оперативную память online компьютера. Каждые 15 минут (в 0, 15, 30 и 45 минут каждого часа) эта информация записывается в файл, номер которого однозначно связан с календарным временем. Через 20 сек этот файл отправляется на сервер БНО и через 4 минуты начинается обработка информации, в том числе, по программе поиска нейтринных вспышек. Этот процесс занимает около 1 минуты. Если обнаружено событие с множественностью ≥ 6 как детекторе Д1, так и в детекторе Д2, то генерируется рассылка информации об этом событии сотрудникам БПСТ, на мобильные телефоны (СМС) и электронную почту. Рассылка алерта внутри коллаборации проходит без сбоев. Проводится работа по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую коллапсную сеть SNEWS, которая в 2020 году переходила на новый формат (SNEWS2.0).

11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».

Проблема происхождения космических лучей является одной из центральных в астрофизике высоких энергий. 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.

На комплексной ливневой установке "Ковер-2" в течение многих лет проводятся исследования в области физики космических лучей и гамма-астрономии. Для выполнения исследований в течение 2021 года проводились работы по поддержанию установки в работоспособном состоянии и обеспечению режима непрерывного набора информации. Создан архив экспериментальных данных установке "Ковер-2" за 2021 год. По

экспериментальным данным установки проведён поиск точечных источников и диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

Экспериментальный комплекс TAIGA состоит из широкоугольных черенковских детекторов ШАЛ Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, сети узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT и сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE. Черенковский детектор Tunka-133 был создана для исследования космических лучей в области энергий 10<sup>15</sup>- 10<sup>18</sup> эВ. Установка TAIGA-HiSCORE имеет порог по энергии 40 ТэВ для гамма-квантов и 80 ТэВ для протонов. Создаваемая сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT будет состоять из 10-12 телескопов. В настоящее время действуют два таких телескопа. Телескопы нацелены на регистрацию гамма-квантов от локальных источников. Энергетический порог телескопов ~2 ТэВ.

12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».

Наиболее естественное решение СР-проблемы сильных взаимодействий было получено путем введения новой киральной симметрии, спонтанное нарушение которой при энергии f<sub>A</sub> полностью компенсирует СР-неинвариантный член в лагранжиане квантовой хромодинамики (КХД) и приводит к появлению аксиона. На данный момент развиты модели двух классов "невидимого" аксиона. Это модели адронного (или KSVZ)-аксиона, и GUT- или DFSZ-аксиона. Масса аксиона mA в обеих моделях может быть выражена через свойства π0 -мезона:

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

где  $m_{\pi}$  и  $f_{\pi}$  – 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 монохроматических аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1переходе в ядрах <sup>83</sup>Кг на Солнце.  Поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ рожденных в результате эффекта Примакова. в недрах солнца. В этом случае спектр излучаемых Солнцем аксионов непрерывный, с пиком в области ~3 кэВ.

На Земле аксионы могут быть обнаружены в реакции резонансного поглощения ядром <sup>83</sup>Кг путем регистрации частиц ( $\gamma$ - и рентгеновских квантов, конверсионных и ожеэлектронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Вероятность испускания и последующего поглощения аксионов в первом случае зависит только от константы связи с нуклонами, которая является наименее модельно-зависимой и пропорциональна ( $g_{AN}$ )<sup>4</sup>. Во втором случае от произведения констант связи аксионов с фотонами и с нуклонами во второй степени.

13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»

Несмотря на десятилетия изучения различными экспериментами космических лучей в энергетическом диапазоне от порядка ПэВ по порядка ЭэВ, по прежнему не выяснен ряд принципиальных вопросов, таких как их массовый состав и природа их ускорителей. До конца не ясно даже на энергиях какого порядка происходит переход от галактических космических лучей к внегалактическим. Не имеют общепризнанного объяснения И ряд ИХ наблюдательных характеристик, например таких как последовательность нерегулярностей их спектра (т.н. "колено" и т.д.) Отсутствие решения этих вопросов в течение столь долгого времени связано с рядом взаимосвязанных проблем: поскольку космические лучи детектируются косвенно (через атмосферные ливни), то точно установить массу и заряд первичной частицы оказывается затруднительно; поскольку плохо известен заряд и галактические магнитные поля, то не удается установить и источники космических лучей. В дополнение к этому различные адронные модели развития атмосферного ливня дают существенно разные предсказания для одних и тех же первичных частиц. В этом контексте интерес представляют экспериментальные результаты, полученные с помощью независимых методик измерения в «гибридных» экспериментах, использующих различные виды детекторов.

14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».

Проблема поиска источников космических лучей ультравысоких (выше 1 ЭэВ) энергий остается нерешенной несмотря на то, что накоплен достаточно большой для качественного скачка объем данных. Достаточно подробно измерен энергетический спектр космических лучей. Подтверждена на уровне 5 сигма крупномасштабная

анизотропия космических лучей с энергией свыше 8 ЭэВ [13], имеются указания на анизотропию среднего масштаба на более высоких энергиях [14, 15], а также на анизотропию спектра космических лучей выше 10 ЭэВ [16]. В то же время, оценки химического состава говорят о доминировании или как минимум присутствии ядер с промежуточной массой в составе космических лучей указанной энергии. Это усложняет идентификацию источников, поскольку ядра достаточно сильно отклоняются в галактическом и, возможно, в межгалактических магнитных полях. В этом контексте актуальной оказывается обратная задача - ограничение массового состава космических лучей из данных об их анизотропии с учетом отклонений в магнитных полях. Ранее был разработан метод позволяющий это сделать [17]. Также актуальны поиски анизотропии направлений прихода космических лучей ответственной за анизотропию их спектра на энергиях выше 10 ЭэВ. Отдельной проблемой является полученное экспериментом HiRes более 10 лет назад указание на корреляцию малой доли космических лучей с далекими лацертидами [18], не имеющее объяснений в рамках Стандартной Модели физики частиц и до сих пор не подтвержденное, и не опровергнутое независимыми экспериментами. В этом контексте актуальна разработка улучшенного метода реконструкции направлений прихода космических лучей в эксперименте Telescope Array, которое позволит выполнить такую проверку.

15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях 10<sup>11</sup> – 10<sup>17</sup> эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях»

Главные эксперименты на LHC (ALICE, ATLAS, CMS) дают информацию, в основном, о параметрах центральной кинематической области взаимодействий адронов, играющей второстепенную роль в развитии т.н. широких атмосферных ливней (ШАЛ) от первичных космических частиц, но являющейся весьма важной для генерации мюонной компоненты ШАЛ – источника информации об энергии и массовом составе первичных частиц. Только эксперимент LHCf даёт немного данных о характеристиках нейтральных частиц (n, K,  $\gamma$ ) в области больших  $x_{\text{F.}}$ , но узких интервалов по поперечному импульсу  $p_{\text{I.}}$ . Информация о более важной (для развития ШАЛ) фрагментационной области ( $x_{\text{F}} \gtrsim 0.01$ ) во взаимодействиях нуклонов с ядрами имеется только при энергиях ниже ~2 ТэВ в Лабораторной системе, т.е. при  $\sqrt{s} < 63$  ГэВ в системе центра масс (с.ц.м.). Экспериментальные данные по взаимодействиям мезонов, которые также играют

существенную роль в развитии ШАЛ, особенно в глубине атмосферы, ещё более скудные, поскольку получены при энергиях менее несколько сотен ГэВ. Поэтому до настоящего времени существует несколько моделей адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, полученных путём экстраполяции от ускорительных до сверхвысоких энергий и используемых для моделирования развития ШАЛ в атмосфере для наземных исследований при сверхвысоких энергиях.

С другой стороны, модели, применяемые для изучения ШАЛ (последние версии SIBYLL, QGSJET, EPOS LHC) воспроизводят генерацию только основных типов адронов, тем самым в какой-то степени упрощая себе задачу. В частности, только последние версии модели SIBYLL моделируют рождение чармированных адронов. Кроме того, рождение мезонных резонансов, которые дают определённый вклад в прямую генерацию мюонов, учитывается в этих моделях довольно редко, хотя мюоны являются важной компонентой ШАЛ, используемой для оценки энергии протонов и ядер первичного космического излучения. Кроме того, моделирование генерации мезонных резонансов (особенно,  $\rho^0$  мезонов) абсолютно необходимо при изучении двухчастичных корреляций.

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<sub>0</sub> ≥ 10<sup>16</sup> 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 ~ $10^{11}$  до ~  $10^{20}$  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.

### 16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»

Стратосферные и высокогорные эксперименты с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК), характеризующимися очень высоким пространственным разрешением частиц, показали определённые отклонения предсказаний традиционных моделей, таких, как SIBYLL, QGSJET, EPOS LHC, по азимутальной симметрии наиболее энергичных (Е ≥

10 ТэВ) частиц в стволах относительно молодых ШАЛ от экспериментальных данных при сверхвысоких энергиях ( $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ). Очевидно, что при рождении эти частицы имели высокие значения  $x_F$ . Несколько идей, предложенных на качественном уровне для объяснения эффекта компланарности (начиная с модели полужесткой неупругой двойной дифракции до концепции «кристаллического мира»), к сожалению, не были доведены до количественного уровня. Для анализа азимутальной асимметрии наиболее энергичных потоков в стволах ШАЛ использовался параметр  $\lambda$ , рассматривающий треки частиц на мишенной плоскости, равный единице в случае расположения треков вдоль прямой линии и ~0 в случае осевой симметрии треков.

С другой стороны, ни одной из существующих теоретических моделей до сих пор не был объяснён т.н. «long-range "ridge" effect», обнаруженный в эксперименте CMS и выражающийся в появлении локального максимума в распределении двухчастичной корреляционной  $\Delta \eta - \Delta \phi$  функции при  $\Delta \phi \approx 0$  и  $|\Delta \eta| \gtrsim 3$  в событиях с большой множественностью (n<sub>ch</sub> > 90). Здесь  $\Delta \eta$  – разность величин псевдобыстрот заряженных частиц,  $\eta = \ln (\tan(\theta/2))$  (где  $\theta$  –полярный угол импульса частицы относительно оси пучка) двух адронов, а  $\Delta \phi$  – разность их азимутального угла  $\phi$  (в радианах).

Очевидно, что эксперименты с РЭК и на LHC используют совершенно разные критерии отбора изучаемых событий. Но можно попытаться решить проблему сопоставления этих явлений и поиска возможной связи между ними путем использования модели, которая позволяет моделировать процессы, необходимые для исследования вышеупомянутой проблемы, а именно, генерацию мезонных резонансов, компланарную генерацию во фрагментационной области, а также генерацию струй в центральной области. при различных критериях отбора событий.

17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью 10<sup>-19</sup> Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям»

Современный тренд «мультиканальная астрономия» (МКА или на английском языке ММА – multimessenger astronomy) подразумевает параллельное наблюдение внеземных релятивистских объектов по радиационным каналам различной физической природы: электромагнитному в широком частотном диапазоне, радиационному в виде космических потоков элементарных частиц, включая потоки нейтрино и, наконец, каналу

гравитационно-волнового излучения. Следует подчеркнуть, что благодаря слабому рассеянию гравитационных волн (ГВ) и нейтрино МКА позволяет изучать

астрофизические явления далекого космоса. Первым источником, от которого было зарегистрировано гравитационное и электромагнитное излучение (рентгеновский, гамма, оптический, инфракрасный диапазоны), оказалось слияние двух нейтронных звёзд на расстоянии около 40 Мпк от Земли (событие GW170817). Оно было зафиксировано гравитационными детекторами LIGO и VIRGO и одновременно космическими аппаратами Fermi и Integral, регистрирующими гамма всплески. Спустя 10 часов в зоне сегмента небесной сферы, локализованного детекторами гравитационного излучения, уже оптическими телескопами (включая сеть телескопов MASTER) была обнаружена вспышка сверхновой в галактике NGC.

На текущий момент все зарегистрированные ГВ всплески были связаны с процессами слияния двойных релятивистских объектов, порождающих так называемые «чирп» сигналы, форма которых хорошо предсказывается теоретически. Однако, ГВ излучение, сопровождающее коллапсы массивных звезд, не обладает подобной структурной универсальностью. Это усложняет возможность регистрации ГВ сигналов от коллапсаров. В том числе и по этой причине такое излучение до сих пор не обнаружено. Стратегия МКА может увеличить вероятность такой регистрации с учетом того, что процесс коллапса должен сопровождаться нейтринным излучением.

В отчетном году продолжались исследования по совместной программе институтов РАН и МГУ по детектированию нейтринного и гравитационного излучения от объектов в Галактике Млечный путь с использованием Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) и оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН), расположенных в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО). Анализ сейсмо-гравитационных шумов БНО также проводился в отчетном году в связи с задачей выбора европейского сайта, оптимального для подземного размещения нового поколения гравитационных антенн - оптических интерферометров на свободных массах- зеркалах.

18. 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»

Из теории следует, что причиной вариаций задержек радиосигналов от спутников могут быть локальные возмущения температуры атмосферы. Поскольку регистрируемая интенсивность мюонов на установке «Ковёр», также подвержена влиянию температуры атмосферы, кажется возможным установить взаимную связь между ними. Эта связь,

полученная экспериментально, будет полезна при коррекции вариаций интенсивности мюонов для более точной оценки электрической разности потенциалов в тропосфере по её возмущению.

Спутниковые часы GPS170PCI являются относительно дешёвым (~100 т. р.), коммерческим продуктом, предназначенным для получения точного времени в бытовых целях. При этом, шестиканальный приёмник часов принимает одновременно радиосигнал как минимум с четырёх спутников системы GPS. Сигналы несут псевдослучайный код, который генерируется и самим приёмником. Сравнивая полученную кодовую последовательность с собственной, определяются задержки сигнала от каждого спутника. Наличие 4-х измерений задержек позволяют определить три координаты приёмника и спутниковое время. Этот результат подвержен влиянию геофизических параметров. Наиболее сильное влияние на распространение радиосигнала оказывают свободные электроны ионосферы. Количество таких электронов в ионосфере характеризуют её полным электронным содержанием (ПЭС) Ne. Оно измеряется в единицах TEC (total electron count). 1 TEC определяется как 1016 свободных электронов в столбе ионосферы сечением 1 м2. В работе [19] приводится расчёт задержки распространения радиосигнала в ионосфере, относительно распространения в вакууме, т:

$$\tau = \frac{40.3}{c \cdot f_{L1}^2} \int_{sp}^{us} n_e[x(l), y(l), z(l)] \cdot dl = \frac{N_e \cdot F_g \cdot 40.3}{c \cdot f_{L1}^2} .$$
(1)

В формуле, приводится интегрированное значение концентрации электронов в ионосфере  $n_e(x,y,z)$  вдоль траектории сигнала от передатчика спутника до приёмника часов. Динамику этого значения определяет произведение двух параметров  $N_e$  и  $F_g$ ., Здесь  $F_g$  - коэффициент геометрического ухудшения точности PDOP (Position Dilution of Precision), зависит от зенитного угла направления на спутник принимаемого сигнала. В случае усреднённых характеристик по совокупности измерений сигнала от разных спутников, параметр имеет смысл геометрического фактора и является постоянным для заданной местности. Обычное значение находится в диапазоне ~ 4 – 6, но при неудачной экранировке просматриваемой приёмником области траекторий спутников (например, близко расположенные горы)  $F_g$  может принимать более высокие значения.  $f_{L1}$  – несущая частота передаваемого радиосигнала. В нашем случае, использования одночастотного приёмника GPS170PCI,  $f_{L1} = 1575.42$  МГц, с = 299 792 458 м/с - скорость света в вакууме. Имеем  $\tau_i = a \cdot F_g \cdot 5.413$  пs, где  $a = (N_e / Q_0)$ .  $Q_0 = 10$  TEC – характерное значение ПЭС на средних широтах, а ~1. Обычно, значение, а меняется в диапазоне 0.5 - 1.5 в течение суток, что приводит к вариациям измеряемого спутникового времени на поверхности

земли. С целью уменьшения ошибки измерения, предусмотрена коррекция в автоматическом режиме специальным методом на существующие регулярные вариации. Для этого, определёнными службами прогнозируются регулярные вариации ионосферы, параметризируются и рассылаются из наземных центров спутникам. Те, в свою очередь, вместе с сигналом точного времени в виде навигационного сообщения передают их пользователям. Микропроцессор часов GPS170PCI считывает информацию и в соответствии с измеренными координатами корректирует измерение точного времени. Процедура, значительно снижает вариации задержек регулярного характера. Обеспечивая, согласно паспортным данным: «... системное время GPS с точностью до 250 нс». Ошибка, основном, имеет случайный характер. Но сам метод коррекции оставляет В бесконтрольным возмущения системы ионосфера – атмосфера вызванные активностью Земли. В частности, такие возмущения оценивают по разнице измеренного возмущения ПЭС и прогнозируемого, в соответствии с влиянием солнечной активности. Физический смысл имеет отношение возмущения к предсказанному фону. Этот параметр, например, должен быть в большой степени лишён суточной волны. Для анализа многократных изменений используют величину W – индекс, являющуюся целочисленным представлением десятичного логарифма от такого отношения.

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

В 2021 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.

Были получены следующие основные результаты:

- 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 2020 года на 1%.
- Произведен монтаж и развертывание восьмого кластера телескопа.
- Установлена в оз. Байкал и введена в эксплуатацию дополнительная технологическая гирлянда, оснащенная двумя калибровочными лазерными источниками света.
- Выполнена прокладка двух линий гибридного оптоэлектрического кабеля для связи кластеров с береговым центром управления. Один кабель был использован для подключения 8-го кластера телескопа, второй кабель предназначен для подключения 9-го кластера в 2022 году.
- 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 8 кластеров Baikal-GVD состоит из 56 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.

Для обеспечения работ по развертыванию новых кластеров в 2022 и последующие годы в 2021 году были проведены следующие работы:

- комплектация, производство и испытания 864 оптических модулей;
- комплектация, сборка и испытания электронных модулей для трех кластеров;
- размещение заказов, производство и складирование всей номенклатуры кабельной продукции;
- ремонт и подготовка к экспедиции 2022 года автотранспортной техники и подъемных механизмов;
- строительство наземной трассы для подвода донных кабелей к Береговому центру управления телескопом;
- проведены 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 2021 году работ эффективный объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино в диапазоне энергий 10 TeV – 10 PeV вырос до ~ 0,4 кубического километра, что обеспечило регистрацию нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. 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 в нейтринном телескопе Baikal-GVD составит 3-4 градуса в сравнении с 10-15 градусами в IceCube. Байкальский телескоп стал одним из двух мощнейших в мире инструментов исследования астрофизических потоков нейтрино высоких энергий.

# 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 2021 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 2 минуты) относительного смещения фотодетекторов установки с помощью акустической системы позиционирования. В таблице 1 приведены данные за 2021 о работе каждого из 8 кластеров телескопа. Данные о времени работы включают сутки от даты включения до 1 декабря 2021 года. Эффективность рассчитывается как отношение количества суток штатной работы кластеров за исключением времени отключения на исправление неисправностей, сбоев программного обеспечения и на время гроз к полному времени работы кластеров от включения до 1 декабря 2021 года. Эффективность в 2021 году выше на 20%, чем в 2020 году, благодаря проведенному ремонту и профилактике вышедших из строя оптических и электронных модулей.

	Дата включения	Время работы (дни)	Эффекти- вность	Скорость счета	Количество событий
Cluster 1	07.04.21	219d	93%	270 Hz	1.68x10 <sup>9</sup>
Cluster 2	08.04.21	218d	93%	260 Hz	1.60x10 <sup>9</sup>
Cluster 3	07.04.21	219d	93%	270 Hz	1.57x10 <sup>9</sup>
Cluster 4	07.04.21	220d	94%	200 Hz	1.30x10 <sup>9</sup>
Cluster 5	06.04.21	220d	93%	140 Hz	0.97x10 <sup>9</sup>
Cluster 6	05.04.21	221d	93%	160Hz	1.13x10 <sup>9</sup>
Cluster 7	05.04.21	224d	94%	165 Hz	1.15x10 <sup>9</sup>
Cluster 8	06.04.21	218d	92%	245 Hz	1.46x10 <sup>9</sup>

Таблица 1. Результаты и эффективность работы кластеров телескопа в 2021 году

В части разработки программного обеспечения введены в эксплуатацию работающие «on line» программы мониторинга состояния телескопа, программы систем 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 «multimessenger». Интенсивный обмен результатами работ и данными производится на ежегодных совещания (MANTS) и раз в два года на расширенной конференции (VLVNT). За 2021 год сделано 15 докладов по всем направлениям исследований и 8 публикаций в ведущих астрофизических журналах. Существенный вклад в кооперацию вносит ежемесячный электронный бюллетень, издаваемый Кристианом Шпирингом.

В результате анализа экспериментальных данных 2018. 2019 и 2020 года за 2294 дня эффективного набора данных одним кластером с применением дополнительных условий по подавлению фона от атмосферных мюонов выделено в общей сложности 5 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.

Все разработки систем и программ по задаче 2, обеспечивающие долговременный непрерывный набор данных на телескопе Baikal-GVD, уникальны и применяются на практике работы телескопа и обработки данных. В последующие годы они должны адаптироваться к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам.

Телескоп из 8 кластеров к настоящему времени второй по объему нейтринный телескоп после IceCube, но обладает существенно лучшим угловым разрешением, чем IceCube (3-40 по сравнению с 13-140 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)

Метод исследования заключается в физическом и программном моделировании работы телескопа. Физическое моделирование осуществляется с помощью стенда, где исследуются характеристики всех электронных систем сбора и передачи данных телескопа. Программное моделирование заключается в пошаговом, на основании известных принципов, расчёте прохождения первичных частиц космических лучей до установки (с использованием пакетов CORSIKA, ANIS, MUM), определении светового поля в объёме детектора, амплитуд срабатывания оптических модулей, а затем наложении программного аналога аппаратного триггера с учётом текущей геометрии детектора, влияния шумов и параметров воды. В 2021 году были продолжены работы и получены положительные результаты по компьютерному моделированию регистрации частиц нейтринным телескопом Baikal-GVD методом Монте Карло (МК) в двух направлениях: (1) разработан пакет программ и начаты работу по его включению в систему BARS с уточненными физическими параметрами водной среды и телескопа на основе новейших средств программирования и компьютерной техники; (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. В основном результаты моделирования удовлетворяют требованиям для восстановления событий и физических исследований.

В результате исследований было проведено МК моделирование регистрации телескопом Baikal-GVD атмосферных мюонов и нейтрино с различными энергетическими спектрами. По результатам этих исследований внесены коррективы в МК моделирование. В частности, скорректирована модель угловой диаграммы направленности чувствительности оптического модуля.

Физическое моделирование проводилось с использованием обновленного в 2021 году стенда в новом специализированном помещении. В 2020 году в работу стендов 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.

Установленный в состав телескопа восьмой кластер Baikal-GVD прошел предварительные исследования и долговременные испытания на стенде.

Результаты исследований были использованы при создании и эксплуатации нейтринного телескопа Baikal-GVD в 2021 году, что позволило существенно улучшить качество накапливаемых данных, повысить надежность телескопа и выделять при последующем анализе и обработке события, вызванные астрофизическими нейтрино высоких энергий, что, безусловно, относится к результатам мирового уровня.

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

39

## 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 2021 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.

Подсистема быстрой обработки также производит мониторинг работы детектора в режиме близкому 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.

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

В результате исследований подготовлены экспериментальные данные для выделения и восстановления событий в автоматическом режиме за 2019-2021 годы. 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 предварительный метод восстановления трековых событий в телескопе, а также разработаны параметрический и непараметрический наборы критериев выделения качественно восстановленных сигнальных событий от фоновых.

В результате применения методики и критериев качества к данным 2019 года с суммарной экспозицией на кластер 329 дней набора данных были выделено 51 событие непараметрическим набором критериев и 39 событий параметрическим набором критериев Зенитное распределение выделенных событий согласуется по форме с ожиданием от потока атмосферных нейтрино. Фон от потока атмосферных мюонов подавлен практически полностью.

Также было проанализировано 298 дней набора статистики в 2018 году и выделено 8 событий непараметрическим набором критериев и 6 событий параметрическим набором критериев как кандидатов на нейтрино высоких энергий астрофизической природы происхождения.

## 5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий (Задача №5)

В результате анализа экспериментальных данных 2018. 2019 и 2020 года за 2294 дня эффективного набора данных одним кластером с применением дополнительных условий по подавлению фона от атмосферных мюонов выделено в общей сложности десять 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.

После восстановления энергии и направления отобранных событий получено распределение возможных источников этих событий на небесной сфере. Выделенный набор данных используется для поиска галактических и внегалактических локальных источников нейтрино.

Коллаборация IceCube 8 декабря 2021 года сообщила об обнаружении нейтринного события IceCube-211208A с высокой вероятностью (сигнальность 50,2%), объясненного астрофизическим нейтрино с оценочной энергией 172 ТэВ (GCN #31191). Заметный

радиоизлучающий и гамма-блазар PKS 0735+17 расположен непосредственно за пределами 90%-ной зоны локализации события IceCube, в пределах ожидаемой систематической неопределенности определения направления прибытия. Было обнаружено, что блазар излучает сильную вспышку в гамма-лучах (ATEL #15099>), рентгеновских лучах (АТЕL #15102, #15108, #15109), оптический (АТЕL #15098, #15100) и радиочастотный (ATEL #15099) диапазоны. IceCube (GCN #31195) и ANTARES (ATEL #15106) не сообщили о каких-либо дополнительных нейтринных событиях с направления алерта. Коллаборация Baikal-GVD сообщает в ATel 14 декабря 2021 года о наблюдении события- кандидата на высокоэнергетическое нейтрино в совпадении с активностью блазара и оповещения IceCube-211208А в эксперименте Baikal-GVD. Во время последующего анализа данных с предупреждением (подробности процедуры см., например, Dik et al., 2021), мы обнаружили каскадное событие с расчетной энергией 43 ТэВ, произошедшее через 3,95 часа после события IceCube с направления (RA =  $119,44^{\circ}$ , DEC = 18,00 °), что составляет 4,68 градуса от PKS 0735 + 17 и 5,30 градуса от наиболее подходящего направления IceCube-211208А. PSF Байкал-ГВД, оцененный с помощью моделирования методом Монте-Карло для условий этого каскадного события, имеет 5,5 градуса (50%), 8,1 градуса (68%) сдерживания. Ожидается только 0,0044 события за 24 часа в круге 5,5 градусов вокруг этого источника, а вероятность случайного совпадения Пуассона составляет 0,0044 (значимость 2,85 сигмы). Более детальное расследование этого и других событий Байкал-ГВД в том же направлении продолжается. Исторически сложилось так, что наблюдалось, что PKS 0735+17 достигает 5 Дж на сантиметровых длинах волн в своем пылающем состоянии, что делает его одним из самых ярких радиоблазаров на небе и, как таковой, вероятным излучателем нейтрино, согласно Плавину и др. (2020). Продолжающиеся наблюдения за мониторингом VLBI на частотах 15 ГГц и 43 ГГц показывают четкую морфологию струи с преобладанием ядра в масштабе парсека. Его спектр RATAN-600 от 2 до 22 ГГц в настоящее время подвергается медленной вспышке и наблюдается на уровне 0,6-0,9 Джи. Байкал-ГВД (см., например, Белолаптиков и др., 2021) является крупнейшим нейтринным телескопом в Северном полушарии, работающим с эффективным объемом ~ 0,4 км3 для каскадного обнаружения в сотрудничестве с более чем 60 учеными из России, Словакии, Чехии, Польши и Германии.

В целом 2020 год стал прорывным в достижении целей данной задачи. Подтверждена высокая эффективность нейтринного телескопа Baikal-GVD, как инструмента исследования процессов, протекающих как во Вселенной в целом, так и в астрофизических объектах методом регистрации нейтрино высоких энергий. Зарегистрированы первые кандидаты на роль нейтрино астрофизической природы, число которых не противоречит данным нейтринного телескопа IceCube. Байкальский нейтринный телескоп в конфигурации 2021 года является новым экспериментальным комплексом способным предоставить уникальную информацию в рамках multi-messenger исследований в тесном взаимодействии с детекторами электромагнитного излучения и с гравитационными антеннами.

# 6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача №6)

В 2021 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 [2]. Представленная в работах [3-6] методика поиска сигнала по данным ранее действующего байкальского нейтринного телескопа HT-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 2021 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.

## 7. Четвертый этап эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) (Задача № 7)

В сентябре 2021 года завершены работы по обработке и сравнительному анализу

данных эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) двумя независимыми группами (ИЯИ и Лос Аламос). Полученные группами результаты измерения скорости захвата нейтрино в двух концентрических галлиевых мишенях на двух расстояниях от интенсивного нейтринного источника 51Cr согласуются в пределах статистической неопределенности.

С 05 июля по 13 октября 2019 года было выполнено 10 облучений двухзонной галлиевой мишени источником электронных нейтрино 51Сг интенсивностью 3.414±0.008 МКи. Источник устанавливался в центре мишеней, средняя длительность каждого облучения составляла около 9.2 д. По окончании каждого облучения проводилось раздельное извлечение из каждой мишени и счет атомов 71Ge, образовавшихся в реакции 71Ga (ve,e-)71Ge. На рис. 2 и 3 показаны результаты анализа скоростей захвата K+L пиков для каждых 10 извлечений двух мишеней, а также результаты объединенного анализа и ожидаемой скорости захвата.



Рис. 2.(а) точки - результаты 10 измерений в К + L пиках для внутренней мишени (вертикальные линии 68% статистическая ошибка, горизонтальные линии – длительность облучения); (b) - значения нормализованные к времени начала измерений с источником (объединенные результаты данных для L и K пиков показаны отдельно). Синие (красная) кривые представляют ожидаемую (измеренную) скорость захвата в мишени, пунктирные линии охватывают 68 %



Рис. 3. (a) точки - результаты 10 измерений в K + L пиках для внешней мишени (вертикальные линии 68% статистическая ошибка, горизонтальные линии – длительность облучения); (b) - значения нормализованные к времени начала измерений с источником (объединенные результаты данных для L и K пиков показаны отдельно). Синие (красная) кривые представляют ожидаемую (измеренную) скорость захвата в мишени, пунктирные линии охватывают 68 % интервал.

Результаты, полученные в двух галлиевых мишенях, оказались очень близкими, но на 20-24% ниже ожидаемых, полученных из теоретического моделирования: 0.77±0.05 и 0.79±0.05 для внешней и внутренней мишеней соответственно (красные линии на рисунках 2 и 3). Отношение результатов составляет 0.97±0.08, что в пределах ошибки согласуется с единицей. Полученные результаты в эксперименте BEST не показали разницу в скоростях захвата в зонах на разных расстояниях от источника.

Получены ограничения на параметры осцилляций переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях для двух результатов эксперимента BEST, а также для результатов BEST совместно с предыдущими результатами галлиевых экспериментов с источниками (рис. 4). Средневзвешенный результат всех галлиевых экспериментов с источниками, включая результаты BEST, составляет 0.80±0.05, что на 4 о меньше единицы.

Результаты согласуются с осцилляционными переходами электронных нейтрино в

стерильные состояния с относительно большой разностью квадратов масс Δm2 (>0.5 эB2) и углом смешивания sin22θ (~0.4). Полученный дефицит нейтрино в зонах, подтверждает и усиливает «галлиевую аномалию», наблюдаемую ранее в четырех галлиевых экспериментах с источниками.



Рис. 4. Разрешенные области осцилляционных параметров для двух результатов BEST (слева), b.f.p. - sin22θ=0.42, Δm2 = 3.3 эВ2; разрешенные области для двух результатов BEST, двух результатов GALLEX, и двух результатов SAGE, b.f.p. sin22θ=0.34, Δm2 = 1.25 эВ2 (справа).

По итогам эксперимента подготовлены статьи для публикации в журнале Physical Review Letters и Physical Review C.

## 8. Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора (Задача № 8)

В рамках работ по поиску оптимальной конфигурации и исследованию технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа были рассмотрены варианты сферической геометрии, цилиндрической геометрии и формы "пилюли", представляющей из себя объединение двух полусфер и цилиндра между ними. Было получено, что с точки зрения восстановления энергии и конечного разрешения детектора наименее предпочтительным вариантом является цилиндр. Проведенное сравнение 5-тонной сферы и 10-тонной "пилюли", показало, что в случае сферы можно получить несколько лучшее разрешение (5.3% против 6.6% с 48 ФЭУ без

концентраторов). Эти результаты были получены на основе моделирования пакетом LSMC, разработанным Ю.М. Малышкиным. LSMC основан на Geant4 и предназначен для моделирования детекторов различной геометрии на основе жидких сцинтилляторов [6].

Для выбора оптимальной геометрии большого детектора с массой мишени 5000 тон было проведено новое сравнение. С помощью обновленной версии LSMC (был расширен функционал) было проведено моделирование отклика двух геометрий детектора: сфера (радиус R=14.1 м) и "пилюля" (радиус полусфер r=11.2 м, высота цилиндрической части h=14.9 м). Объем для обеих геометрий одинаков. Сцинтиллятор содержится внутри акриловой емкости с толщиной стенки 10 см. На расстоянии 85 см от поверхности расположены около 30500 10-дюмовых ФЭУ с концентраторами. Акриловая емкость и ФЭУ помещены в цилиндрический бак с водой и стенками, полностью поглощающими свет. ФЭУ оснащены концентраторами, позволяющими увеличить светосбор. Оптическое покрытие с учетом концентраторов составляет около 69% для сферы и 63% для "пилюли", рис. 5, 6.



Рис. 5. Сферический детектор (слева), детектор в форме "пилюли" (справа).



Рис. 6. ФЭУ и концентраторы, окружающие мишень детектора (увеличение рис. 5).

Для примера был рассчитан отклик детектора – распределение числа фотоэлектронов на электроны с энергией 1 МэВ из центра детектора – для двух рассматриваемых вариантов геометрии, рис. 7. Видно, что светосбор у сферы лучше, чем у "пилюли" (447 и 322 фотоэлектронов соответственно). Разрешение также получается лучше в случае сферической геометрии: 4.6% против 5.4%. Нужно отметить, что конечное разрешение будет несколько хуже из-за эффектов электроники и процедуры восстановления энергии события, необходимой для корректировки пространственной неоднородности сигнала. При этом восстановление обычно проще делать сферической геометрии. Таким образом, сферическая геометрия выглядит более предпочтительно.



Рис. 7. Отклик сферического детектора (синяя линия) и детектора в форме "пилюли" (оранжевая линия) на электроны с энергией 1 МэВ из центра детектора.

## 9. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD (Задача № 9)

### 9.1. Анализ данных детекторов LVD и АСД

Основная цель экспериментов АСД [7] и LVD [8] – поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года, АСД работал с 1977 г по 2021 г.

### 9.1.1. Эксперимент АСД

В 2021 году закончился физический этап набора данных Артемовского Сцинтилляционного Детектора (АСД), который расположен в шахте Донецкого соляного месторождения на глубине 570 м.в.э [7].

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<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> (n ~ 10), имеющим высокую прозрачность ~ 25м. На боковой поверхности контейнера равномерно установлены 160 фотоумножителей.

Низкая радиоактивность соли обусловливает хорошие фоновые условия для регистрации нейтронов по захватным гамма-квантам из реакции  $np \rightarrow \gamma d$  ( $E_{\gamma} = 2.2 \text{ M}$ эB). По своим размерам, 9 t-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 > 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  $0 - 60^{\circ}$ .

Основные задачи, для решения которых создавался детектор АСД, – регистрация антинейтринных потоков от коллапсирующих звезд в Галактике и исследование спектра мюонов и их взаимодействий в области энергий до 10 ТэВ.

Сигнал от коллапса идентифицируется по появлению в пределах 20 секунд статистически редкого сгущения импульсов, регистрируемых детектором.

За период наблюдения за Галактикой по данным установки 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  $\Delta T$  – время наблюдения.

Таким образом, за  $\Delta T = 42.75$  г работы детектора АСД получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 18.56 года на 90% доверительном уровне (f<sub>col</sub> <0.054 1/год).

С 1 октября 2020 года детектор АСД был выключен в связи с эпидемической ситуацией в г. Бахмуте на Украине. В октябре 2021 ученый совет ИЯИ РАН принял решение о прекращении эксперимента в связи с неблагоприятной ситуацией в Донецком регионе и отсутствием адресного финансирования. Дежурства на установке прекратились, сотрудники занимались обработкой данных эксперимента на серверах удаленно.

### 9.1.2. Эксперимент LVD

Основная задача LVD – регистрация нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд [8]. По этой программе LVD работает с 1992 года. Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине <H> = 3650 м.в.э., состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами  $100 \times 100 \times 150$  см<sup>3</sup>, 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 сцинтиллятора в установке по 1 кт. В детекторе имеется два энергетических порога: верхний  $E_{\text{HET}} = 4$  МэВ, и нижний  $E_{\text{LET}} = 0.5$  МэВ.

Преимущество LVD перед большими водяными детекторами заключается в наличии углерода в сцинтилляторе и железа, что позволяет разделять разные типы нейтрино. Детектор способен зарегистрировать как электронные антинейтрино ( $\bar{v}_e p \rightarrow n e^+$ ), так и мюонные и тау-нейтрино и антинейтрино (реакция на углероде и железе). Для первого процесса при взрыве сверхновой в центре Галактики (8.5 кпк) ожидается от 300 до 600 событий. Другие процессы 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 таунейтрино, 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, [9, 10]. Таким образом, регистрация нейтрино от сверхновых может дать полезную информацию о физике нейтрино, в основном о смешивании, и, кроме того, об астрофизике коллапса.



Рис. 8. Рабочий цикл LVD (черная кривая) и активная масса (красная кривая) как функция времени с 1992 по 2021 гг.

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 [12].

Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме *on-line* осуществляется во временном окне  $\Delta t < 20$  с и с энергией импульсов выше пороговой  $E_{th} > 4$  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  $v_e$ -событий *off-line* осуществляется в течение временного окна с длительностью  $\Delta t$  до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется  $\Delta t$  и количеством событий внутри  $\Delta t$ . Для каждого кластера, была определена частота имитации  $F_{im}$ .

Учитывая большую продолжительность набора данных LVD, мы выбираем 1/100 год<sup>-1</sup> в качестве порога частоты имитации,  $F^{th}_{im}$ . Это означает, что кластер (m<sub>i</sub>,  $\Delta t_i$ ) считается кандидатом на нейтринный всплеск, если:

$$\sum_{k \ge m_i - 2} P(k, f_{bk_i} \Delta t_i) < \frac{F_{im}^{th}}{f_{bk}^2 \cdot \Delta t_{max}}$$

Введение частоты имитации имеет двойное преимущество. С точки зрения поиска нейтринных всплесков, это позволяет нам априори определить статистическую значимость каждого кластера с точки зрения фоновой частоты, как правило, не постоянной, а фактически изменяющейся в зависимости от активной массы детектора. Также это позволяет нам контролировать производительность алгоритма поиска и стабильность детектора, изменяя порог частоты имитации. А именно, мы изучаем распределения разницы во времени между последовательными кластерами для трех различных значений частоты имитации (Fim <1 день<sup>-1</sup>, неделя<sup>-1</sup>, месяц<sup>-1</sup>). Учитывая ограниченную статистику, которую мы получаем при рассмотрении только текущего прогона (366, 53 и 15 кластеров, обнаруженных при F<sub>im</sub> <1 день<sup>-1</sup>, неделя<sup>-1</sup>, месяц<sup>-1</sup>соответственно), мы выполнили новый анализ за 2014-2021 г [13], включая данные, уже опубликованные за период 1992-2013 [8]. В результате получается 1489, 218, 60 кластеров для 3 F<sub>im</sub> соответственно. Распределение разницы во времени между последовательными кластерами показано на Рис. 9 для F<sub>im</sub> <1 день<sup>-1</sup> (черная сплошная линия), F<sub>im</sub> <1 неделя<sup>-1</sup> (зеленая сплошная линия) и F<sub>im</sub> <1 месяц<sup>-1</sup> (синяя сплошная линия). Наложенные пунктирные линии представляют собой чисто экспоненциальную аппроксимацию каждого распределения, соответствующего ожидаемому пуассоновскому поведению. Этот результат показывает, что алгоритм поиска и детектор находятся под полным контролем на протяжении всего периода сбора данных.



Рис. 9. Распределение временных интервалов между последовательными кластерами (сплошные линии), аппроксимируемое законами Пуассона (пунктирные линии). Сюда включены все данные с 1992 года.

На рис. 10 показана абсолютная частота имитации всех кластеров (их значимость) как функция времени. Видно, что кластеры с разными F<sub>im</sub> встречаются довольно равномерно. На обоих рисунках фиолетовая линия представляет ожидания для F<sub>im</sub>, равного 1/100 год<sup>-1</sup>, то есть порог для определения кластера как кандидата на нейтринную вспышку с LVD.

За период с 1992 по 2021 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее 1/100 г<sup>-1</sup>. Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии до 25 кпк в период наблюдения.

Несмотря на пандемию, связанной с коронавирусом COVID-19, научная программа работ на LVD в 2021 году выполнена полностью. Детектор работал в штатном режиме (Рис. 8). Дежурства велись удаленно, живое время работы составило 99.9%.

По данным работы нейтринного телескопа LVD за 29 лет работы (1992 - 2021), получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 12.6 г. на 90% уровне достоверности.



Рис. 10. Обнаруженные кластеры с частотой имитации Fim <1 сут-1. Кластеры с высокой значимостью отмечены красным. Линиями показаны: фиолетовая – Fim = 100 год-1, красная – Fim = 1 год-1, синяя – Fim = 1 мес-1, зеленая – Fim = 1 неделя-1.

### 9.2. Анализ данных детектора БПСТ

БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации счетчика. антинейтрино в реакции обратного бета-распада. Т.к. средняя энергия позитрона ≈15 МэВ, то, как правило, будет срабатывать только один счетчик на установке. Ожидаемое событие от коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия (кластер) одиночных срабатываний счетчиков (событие "1 из 3200" на БПСТ) в течение времени нейтринной вспышки (предполагаемая длительность которой составляет 10 – 20 секунд). Поэтому для поиска нейтринной вспышки от коллапсирующей звезды используется метод поиска кластера одиночных срабатываний счетчиков на установке в скользящем окне длительностью 20 секунд. Т.к. используется скользящее от события к событию окно, то при такой обработке всегда имеется хотя бы одно событие в кластере, и сгусток событий, вызванный нейтринной вспышкой, гарантированно не будет пропущен. В настоящее время для поиска нейтринной вспышки, кроме 1200 сцинтилляционных счетчиков внутренних плоскостей (детектор Д1), также используются 1030 сцинтилляционных счетчиков на внешних плоскостях (детектор Д2). Совместная работа детекторов Д1 и Д2 позволяет уменьшить порог по числу событий в кластерах в Д1 и, следовательно, увеличить радиус чувствительности БПСТ при поиске событий от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра.

По информации БПСТ за 2021 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, время набора информации составило 348 суток – 95.3% от календарного времени за период с 01 января 2021 по 31декабря 2021 года. Чистое время набора по данной задаче (с учетом мертвого времени телескопа) составило 342.0 суток.

Проведена обработка всей набранной в 2021 году информации, обработано 495403540 событий. Из этих событий отобраны одиночные события для двух детекторов Д1 и Д2 – 600612 событий для Д1, 3416723 для Д2. При обработке в обязательном порядке проверяется предыстория каждого одиночного события в Д1, для поиска возможной генетической связи последующих одиночных событий с предшествующим каскадом. В 2021 году одиночные события после каскадов не создали кластеры множественности т≥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 2021 года не было обнаружено.

Одним из источников фона при поиске нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд является образование кластеров из одиночных событий на БПСТ после каскадов. При регистрации события с большим энерговыделением в сцинтилляционном счетчике анализируется возможность генетической связи последующих одиночных событий с каскадом. Каскадом считается любое событие, в котором есть сработавший счетчик на внутренней горизонтальной плоскости установки с энерговыделением  $\geq$  500 МэВ, последующие одиночные события ищутся в интервале 2-х секунд. В 2021 году не было обнаружено кластеров множественности m  $\geq$  5 после каскадов, то есть, не было ложных алертов для регистрации вспышки Сверхновой по данной причине.

На рис. 11 показано распределение фоновых событий по множественности m в скользящем временном окне, равном 20 секундам, за период 2001-2021 годы, время набора 18.67 года.

55



Рис. 11. Распределение кластеров по множественности т за 2001–2021 год, в скользящем интервале dt=20 сек. Точки – эксперимент, линия – расчет.

Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2021 года составляет 35.84 года, верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике на 90% доверительном уровне по данным БПСТ составляет 0.0642 год<sup>-1</sup>.

### 9.3. Анализ совпадений импульсов в детекторах LVD и БПСТ во время GW170817

Экспериментальное подтверждение существования гравитационных волн побудило различные научные группы, занимающиеся исследованиями в области нейтринной астрофизики, более пристально исследовать данные по детектированию нейтринного излучения в окрестности времени регистрации гравитационных волн. Поиск различных типов нейтрино от гравитационно-волнового события GW170817 был проведен в широком диапазоне энергий (от 0.5 МэВ до ~  $2.5 \times 10^{10}$  ГэВ) на нейтринных телескопах ANTARES, БПСТ и IceCube, ливневой установке Pierre Auger, детекторах Borexino, SuperKamiokande [13-19]. Временем регистрации гравитационной волны считается 17 августа 2017 года в 12:41:04 UTC [13]. Анализ данных, поступивших во временной окрестности регистрации события GW170817, показал отсутствие статистически значимых результатов, свидетельствующих о регистрации нейтрино.

В течение 1000 с после регистрации гравитационной волны наблюдается кластер из 5 совпадений одиночных импульсов в третьей башне детектора LVD. Данные об одиночных импульсах в кластере представлены в таблице 2. Для одиночных импульсов в

детекторе БПСТ приведены значения времени их регистрации и их энерговыделения в счётчике. Для импульсов в детекторе LVD приведены помимо указанных для БПСТ данных номер счётчика и данные о наличии (отсутствии) сопровождения. Длительность кластера составляет 477 с, первое совпадение в кластере обнаружено на 266 с позже регистрации гравитационной волны.

BUST data		LVD data				
T <sub>ev</sub> -T <sub>GW</sub> , s	Ε,	$T_{ev}$ - $T_{GW}$ , s	N⁰	Ε,	E <sub>n</sub> ,	$T_n$ - $T_{tr}$ , $\mu s$
	MeV			MeV	MeV	
266.2227	14.10	266.3320	3157	5.58	0	0
441.6641	17.69	442.0000	3376	8.36	1.31	336.47501
441.6641	17.69	442.4609	3118	6.73	0.62	363.30042
646.0898	11.06	646.9102	3138	8.73	1.15	572.95038
742.5781	18.06	742.0938	3122	5.04	0	0

Таблица 2. Одиночные импульсах в LVD и БПСТ в окрестностях события GW170817.

Средняя скорость образования кластера из М совпадений фоном оценивается по формуле:  $<\lambda M> = \lambda \times pM-1$ , pM-1=(( $\lambda T$ )^(M-1)/(M-1)!) $\times exp(-\lambda T)$ , где  $\lambda$  – скорость счёта совпадений. Среднее время образования кластера фоном составляет  $<T>=1/<\lambda M>$ . В нашем случае  $\lambda$ =0.0016 с-1, M=5. Подставляя эти значения, получаем, что среднее время образования обнаруженного кластера фоном составляет около 2 суток.

## 10.Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS (Задача №10)

Продолжается работа по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую коллапсную сеть SNEWS. В настоящее время сеть SNEWS находится в процессе перехода на новый формат (SNEWS2.0). Эксперимент по поиску нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд на БПСТ получил идентификатор эксперимента в сети SNEWS, ID # 12. Соединение с сетью SNEWS было установлено в старой версии программы в феврале 2021 года, дальнейшие работы с которой были приостановлены разработчиками команды SNEWS. Новая версия программы для связи с сетью SNEWS2.0 в данный момент находится в состоянии разработки и тестирования. В

ближайшее время команда программистов SNEWS планирует выпустить новый релиз клиент-серверного кода snews2.

## 11.Поиск точечных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок КОВЕР-2 и TAIGA. Измерение потока (или получение ограничения на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ (Задача №11)

### 11.1. Анализ данных, полученных на установке Ковер-2

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке "Ковер-2" по всем физическим задачам. Чистое время набора информации составляет 84 % календарного времени для задачи регистрации электроннофотонной компоненты ШАЛ, 97% для регистрации мюонной компоненты ШАЛ на Мюоннном Детекторе (МД) и 98% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ).

Регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ происходит по тригтеру М1, который вырабатывается при совпадении сигналов с 4-х ВП, установленных на расстояниях 30 м от Ковра, с сигналом от Ковра с порогом 150 р.ч. Частота этих событий 1.2 сек-1, пороговая энергия для этих ливней  $\approx 5 \times 1013$  эВ. В настоящее время это же тригтер используется для записи информации в МД, что позволяет увеличить эффективность регистрации ливней от первичных гамма-квантов. В 2021 году (с 1 по 359 день) чистое время набора по данному триггеру составило 277 дней, было зарегистрировано 22667 ливневых события с первичной энергией выше 100 ТэВ. За весь период набора информации, с 97 дня 2018 года по 259 день 2021 года (1017 суток набора информации) было зарегистрировано 80159 ливней с энергией выше 100 ТэВ. Распределение этих событий по числу мюонов в МД в зависимости от мощности ливня приведено на рис. 12.

По экспериментальным данным установки "Ковер-2" проведен поиск гаммаизлучения с энергией  $E_{\gamma}$ >100 ТэВ от источников Суд Х-3 и Суд Х-1. Вспышечная активность источника Суд Х-3 была обнаружена в период с 19 по 26 апреля 2021года, а источника Суд Х-1 – в период с 14 по 20 июня 2020 года.

Для анализа данных использовался on/off метод, т.е., рассматривается отношение числа ливней в угловой ячейке радиусом 4.7°, в центре которой расположен источник, к среднему числу ливней в четырех контрольных ячейках вокруг источника. Центры двух

контрольных ячеек смещены в экваториальных координатах на  $\pm 9.4^{\circ}$  по склонению, при том же прямом восхождении, как у источника. А центры еще двух контрольных ячеек смещены на  $\pm 12.4^{\circ}$  ( $9.4^{\circ}/\cos^{\delta}$ ) по прямому восхождению, при том же склонении, как у источника. При этом контрольные ячейки касаются ячейки источника и имеют одинаковый с ней телесный угол.

На рис. 13 представлена вспышечная активность источника Cyg X-3 для событий с энергией больше 100 ТэВ, которая длилась с 19 апреля по 26 апреля. А на рис. 14 представлена вспышечная активность источника Cyg X-1 в период с 14 июня по 20 июня 2020 года.



Рис. 12. Распределение зарегистрированных ливневых событий по числу мюонов в МД в зависимости от мощности ливня. На рисунке события с пµ = 0.1 соответствуют ливням с нулевым числом мюонов в МД.

Исследование диффузного космического гамма – излучения проводится в экспериментах, в которых можно отделить ливни, рождённые первичными фотонами, от ливней, рождённых первичными протонами и ядрами. Разделение возможно благодаря тому, что ливни от первичных фотонов существенно обеднены адронами (и, как следствие, мюонами), по сравнению с ливнями от первичных протонов и, тем более, ядер.

Для выделения ливней от первичных гамма-квантов из фона обычных ШАЛ проводится анализ корреляционной зависимости, в плоскости nµ – Ne,

зарегистрированных и смоделированных событий. В данном случае для оценки ограничения на поток диффузного космического гамма – излучения по данным установки "Ковер-2" использовался метод выделения в плоскости пµ – Ne области, в которой есть только события от смоделированных гамма-ливней, при отсутствии зарегистрированных в эксперименте ШАЛ. На рисунке 12 граница этой области выделена ломаной линией. Использования такого метода дает возможность поставить ограничение только для достаточно больших первичных энергий, в данном случае  $E0 \ge 2.4 \text{ ПэB}$  (что соответствует гамма-ливням с Ne  $\ge 3.6 \times 105$ ).

Исходя из того, что в выделенной области отсутствуют зарегистрированные события (т.е. отсутствует фон), можно использовать следующую формулу для оценки верхнего предела на поток первичных гамма-квантов на 90% доверительном уровне:

$$I_{\gamma}(>E_0) = \frac{n_{90}}{S \cdot \Omega \cdot T \cdot \varepsilon_1(>E_0) \cdot \varepsilon_2(>E_0)}$$

где  $n_{90} = 2.3$ , S· $\Omega$ ·T = 1.86·1014 см2 стер ·сек ,  $\epsilon 1(>E0)$  – эффективность регистрации и восстановления параметров зарегистрированных ливней ( $\epsilon 1(> 2.4 \text{ П})$ = 0.46).

Эффективность є2(>E0) отбора ливней от первичных гамма-квантов с энергией больше некоторой E0 вычисляется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_2(>E_0) = \frac{N_{select}(>E_0)}{N_{tot}(>E_0)},$$

где Ntot(>E0) – полное число смоделированных событий, а Nselect(>E0) – число смоделированных событий в выделенной области (ниже ломаной линии). Для пороговой энергии 2.4 ПэВ эффективность є2 отбора ливней от первичных гамма-квантов = 0.712. Таким образом, использование данной методики даєт верхний предел на поток первичных гамма-квантов с пороговой энергией 2.4 ПэВ на 90% доверительном уровне 3.8·10-14 см-2 стер-1 ·ceк-1.



Рис. 13. *Недельная активность источника микроблазара Суд X-3.* 



Рис. 14. Активность источника Суд X-1 на интервале с 14 июня по 20 июня 2020 года.

### 11.2. Участие в работе международной коллаборации TAIGA

Экспериментальный комплекс TAIGA состоит из широкоугольных черенковских детекторов ШАЛ Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, сети узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT и сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE. Черенковский детектор Tunka-133 был создана для исследования космических лучей в области энергий 10<sup>15</sup>- 10<sup>18</sup> эВ. Установка TAIGA-HiSCORE имеет порог по энергии 40 ТэВ для гамма-квантов и 80 ТэВ для протонов. Создаваемая сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT будет состоять из 10-12 телескопов. В настоящее

время действуют два таких телескопа. Телескопы нацелены на регистрацию гаммаквантов от локальных источников. Энергетический порог телескопов ~2 ТэВ.

В 2021 году успешно эксплуатировались два узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT. На рис. 15 показана фотография двух действующих телескопов в составе экспериментального комплекса TAIGA. С помощью этих телескопов продолжены исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от галактических и внегалактичнских локальных источников. Каждый телескоп имеет составное зеркало общей площадью  $10 \text{ м}^2$ , в фокусе которого располагается камера изображения из 560 пикселей - малогабаритных фотоумножителей XP1911B, снабженных концентраторами света (конусами Винстона). Угол обзора камеры 9,6°, а у индивидуального пикселя – 0,36°. На рис. 16 показаны экспериментальные данные исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой Крабовидной туманности и блазара Mrk 421. Статистические значимости ~6  $\sigma$  и 5  $\sigma$  для Крабовидной туманности и Mrk 421 соответственно.



Рис. 15. Два действующих узкоугольных атмосферных черенковских телескопа TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA.



Рис. 16. Результаты измерений потоков гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой Крабовидной туманности (левый рисунок) и блазара Mrk 421 (правый рисунок).

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 TIGA-GRANDE.

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

## 12. Получение ограничений или обнаружение солнечных адронных аксионов (Задача №12)

Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром <sup>83</sup>Kr в зависимости от вероятности излучения аксиона в данном переходе ( $\omega_A/\omega_\gamma$ ), параметра ( $g_3-g_0$ )<sup>2</sup>, описывающего аксионнуклонное взаимодействие, и массы аксиона в KSVZ-модели может быть представлена как:

$$R[\Gamma^{-1} \text{cy} \Gamma^{-1}] = 4.23 \cdot 10^{21} \omega_A / \omega_\gamma =$$
  
= 8.53 \cdot 10^{21} (g\_{AN}^3 - g\_{AN}^0)^4 (p\_A / p\_\gamma)^6 =  
= 2.41 \cdot 10^{-10} m\_A^4 (p\_A / p\_\gamma)^6.

Количество зарегистрированных у-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, используется большой медный пропорциональный счетчик, заполненный криптоном, обогащенным по изотопу <sup>83</sup>Kr до 99,9%. Рабочий объем счетчика составляет 8.77 л, давление газа — 1.8ат. Масса изотопа <sup>83</sup>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 ниже более чем в 107 раз по сравнению с поверхностью. За 2020г. набрана статистика за ~300 сут живого времени измерений. На данный момент набрана суммарная статистика за ~1000 сут измерений. Идет обработка полученных данных.

По результатам анализа данных за 777 сут живого времени измерений получено верхнее ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона:  $|gA\gamma \times mA| \le 7.89 \times 10{\text{-}16}$ . В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов:  $mA \le 12.6$  эВ (95% У.Д.).

Параллельно идет разработка эксперимента с девятью пропорциональными счетчиками меньшего диаметра (~6 см) 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.

## 13.Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ (Задача №13)

### 13.1. Изучение спектра и массового состава космических лучей по данным широкоугольных черенковских установок Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE экспериментального комплекса TAIGA

На рис. 17 представлены массовый состав и энергетический спектр первичного космического излучения в диапазоне энергий 2×1014÷2×1018 эВ, измеренные черенковскими установками Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE. Как видно из рисунка экспериментальные результаты хорошо согласуются как между собой, так и с данными других экспериментов. При этом, при низких энергиях данные TAIGA-HiSCORE хорошо согласуются с прямыми измерениями на спутниках и баллонах, а в области высоких энергий данные установки Tunka-133 находятся в довольно хорошем согласии с данными экспериментов РАО (Pierre Auger Observatory) и TA (Telescope Array).



Рис. 17. Массовый состав (слева) и энергетический спектр (справа) первичного космического излучения, измеренные широкоугольными черенковскими установками Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE экспериментального комплекса TAIGA. Левый рисунок: 1 – Tunka-133; 2 – TAIGA-HiSCORE; 3 – PAO. Правый рисунок: 1 – Tunka-25; 2 – Tunka-133; 3 - TAIGA-HiSCORE.

## 13.2. Изучение спектра и массового состава космических лучей по данным установки TALE FD

В работе по оценке массового состава космических лучей по данным установки TALE FD в составе эксперимента Telescope Array были использованы как данные по измерению флуоресцентного излучения, порождаемого широкими атмосферными ливнями, вызванными космическими лучами в атмосфере Земли, так и данные по черенковскому излучению, также порождаемому этими ливнями, полученные установкой TALE FD за 4 года работы. Использование этих двух частично независимых наборов данных позволило расширить диапазон энергий космических лучей доступных для наблюдения TALE FD: он охватывает энергии от 2 ПэВ до 2 ЭэВ. Для реконструкции массового состава космических лучей использовались традиционная техника, основанная на построении распределения глубин максимумов развития ливней Xmax и ее зависимости от энергии.

Было проведено сравнение этих величин с соответствующими, полученными в Монте-Карло симуляциях с использованием различных андронных моделей. Фитирование полученных распределений с помощью 4-компонентной смеси космических лучей (протонов, гелия, CNO и железа) показало утяжеление состава с ростом энергии в исследуемом диапазоне, во всех рассмотренных адронных моделях, что хорошо согласуется с моделью галактического происхождения космических лучей этих энергий с обрезанием инжекционного спектра, зависящим от магнитной жесткости.



Рис. 18. Оценка зависимости доли каждой из 4 компонент (протонов, ядер гелия, ядер CNO и ядер железа) в потоке космических лучей от энергии, согласно 4компонентному фиту данных установки TALE FD. Для адронной модели EPOS-LHC (верх) и QGSJetII-03 (низ).

На Рис.18 представлена полученная оценка зависимости <ln(A)> космических

лучей от энергии. Полученные результаты опубликованы и доложены на международной конференции ICRC-2021.

Полученные результаты являются важным независимым подтверждением модели источников космических лучей с энергиями в диапазоне ПэВ-ЭэВ с обрезанием, зависящим от магнитной жесткости. Они могут быть использованы для построения более детальной модели инжекции космических лучей в таких источниках. Особенно важным является тот факт, что результаты лишь незначительно зависят от модели адронных взаимодействий используемой для симуляции ШАЛ, что выгодно отличает их от результатов полученных ранее наземными решетками детекторов ШАЛ.

## 13.3. Создание установки ENDA (Electron-Neutron Detector Array) в рамках международной обсерватории LHAASO

В 2021 году была обеспечена непрерывная работа первого кластера из 16 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов) установки ENDA в составе международного эксперимента LHAASO в КНР на высоте 4400 м над уровнем моря. К установке также готовы ещё 3 кластера, один из которых (ENDA-YBJ) в настоящее время тестируется в Тибете на плато YBJ на высоте 4300 м над уровнем моря. На этом кластере проводятся испытания по размещению эн-детекторов на пластиковых кубах, заполненных песком (в качестве мишени для адронов ШАЛ). Таким образом предполагается снизить влияние сухого/мокрого периодов в течение года на выход нейтронов после прохождения широкого атмосферного ливня. Также на этом кластере тестируются новые версии программного обеспечения. Также для сравнения результатов, полученных на разных высотах, ещё один кластер работает в ИЯИ РАН (ENDA-INR).

По результатам, полученным на установке LHAASO, коллаборацией были подготовлены и опубликованы статьи в ведущих журналах. В частности, были впервые обнаружены гамма-кванты космических лучей с энергией до 1.4 ПэВ.

## 14.Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере (Задача №14)

В выполненных ранее в рамках другого проекта работах участниками исследовательского коллектива был предложен новый перспективный метод анализа массового состава космических лучей ультравысоких энергий, основанный на сравнении направлений их прихода с картами распределения материи в локальной Вселенной, модулированными галактическим и внегалактическим магнитным полем [13]. В данной работе этот метод был применен к данным эксперимента Telescope Array, в результате были получены новые независимые и консервативные ограничения на долю протонов и долю ядер железа в потоке космических лучей с энергиями более 10 ЭэВ. В диапазоне энергий от 10 до 100 ЭэВ данные совместны с увеличением доли протонов и уменьшением доли железа, тогда как при энергиях более 100 ЭэВ — с чистым железом или даже более тяжелыми ядрами. При энергиях более 100 ЭэВ результат является в мире полученным с такой высокой статистической уникальным и первым достоверностью и при таких больших энергиях космических лучей, поскольку стандартные методы исследования состава не дают надежных оценок при этих энергиях из-за недостаточности статистики. Полученные ограничения на доли протонов и железа представлены на Рис. 19. Важно что данный результат лишь слабо зависит от модели галактического магнитного поля и является достоверным в широком диапазоне параметров внегалактического магнитного поля, кроме лишь случаев когда оно оказывается экстремально сильным И когерентным, на уровне верхних экспериментальных ограничений на эти величины. Полученные результаты на самых высоких энергиях представляют интереснейшую находку, которая может привести к переосмыслению механизмов генерации космических лучей в этом диапазоне. Результаты доложены на международной конференции ICRC-2021 и опубликованы в сборнике ее материалов.



Рис. 19. Ограничения на доли протонов (справа) и ядер железа (слева) в протонножелезной смеси на уровне 68% С.L. по данным установки Telescope Array SD для моделей регулярного галактического магнитного поля PT'11 и JF'12.



Рис. 20. Распределение угловых расстояний между реконструированными и истинными напралениями прихода космических лучей в стандартной реконструкции (красная гистограмма) и новой реконструкции основанной на нейронных сетях (синяя гистограмма). Для энергий более 10 ЭэВ (левая часть) и более 57 ЭэВ (правая часть), соответствующие вертикальные линии показывают значения углового разрешения.

Разработан новый метод реконструкции направлений прихода космических лучей, детектируемых наземной решеткой эксперимента Telescope Array, метод основан на применении сверточных нейронных сетей. Метод позволяет улучшить реконструкцию направления прихода ШАЛ примерно на четверть для протонов и ядер и на треть для фотонов. Уровень улучшения углового разрешения реконструкции, достигаемый этим методом представлен на Рис. 20. Точность метода практически не зависит от адронной модели, используемой для симуляции развития ШАЛ в атмосфере. Достигнутое улучшение углового разрешения критически важно для планируемой независимой проверки гипотезы незаряженных космических лучей, коррелирующих с удаленными внегалактичекими источниками, которая была ранее сформулирована на основе результатов эксперимента HiRes.

Поиск анизотропии направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий, детектированных наземной решеткой эксперимента Telescope Array выявил значимый избыток событий с энергиями более приблизительно 25 ЭэВ расположенный в направлении сверхскопления галактик Персея-Рыб. На Рис. 21 показаны карты распределения по небу значимости избытка событий при нескольких значениях нижнего порога энергии космических лучей. Наиболее значимый избыток проявляется при энергиях более приблизительно 25 ЭэВ (верхняя левая часть рисунка). Этот результат может пролить свет на происхождение космических лучей на этих энергиях, а также на

может быть взят за основу для теоретических работ по ограничению сверху параметров внегалактических магнитных полей. Результат должен на международной конференции ICRC-2021 и опубликован в сборнике ее материалов.



Рис. 21. Карты неба в проекции Хаммера и экваториальных координатах показывающие значимость избытка космических лучей зарегистрированных экспериментом Telescope Array в статистике Ли-Ма с усреднением в круге радиусом 20 градусов. Красный цвет означает избыток событий, синий недостаток по сравнению с изотропным распределением, черная точка показывает положение максимума значимости избытка. Нижний порог энергии космических лучей: E > 10^19.4 эВ (верхняя левая часть), E > 10^19.5 эВ (верхняя правая часть), E > 10^19.6 эВ (нижняя левая часть), E > 57 ЭэВ (нижняя правая часть).

## 15. Разработка новой модели взаимодействий адронов FANSY 2.0 воспроизводящей, во-первых, более широкий (сравнительно с другими моделями) круг основных экспериментальных результатов в области энергий 10<sup>11</sup> – 10<sup>18</sup> эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; во-вторых, моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях (Задача №15)

В течение 2021 г. была продолжена отладка и юстировка программного пакета FANSY 2.0, как в рамках традиционных представлений (FANSY 2.0 QGSJ), так и с учетом компланарной генерации адронов (FANSY 2.0 CPG). Были уточнены некоторые экспериментальные данные по мезон-протон и протон-протон взаимодействиям, полученные на ускорителях и LHC в широком диапазоне энергий, по генерации основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих *u,d,s,c* кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы).

Особое внимание было уделено моделированию компланарной генерации частиц в фрагментационной области. 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, которая определяется выражением  $\sigma_{\varphi}^{CPG}(y) = \sigma_{\varphi 0}^{CPG} \cdot (|y_2/y|)^{\beta}$ , которое показывает стандартное отклонение азимутального угла вектора поперечного импульса от плоскости компланарности в зависимости от быстроты.

В рамках решения задачи №2 были найдены наиболее эффективные значения нескольких параметров алгоритма для трёх различных вариантов модели с слабой, умеренной и сильной амплитудами получаемого «ridge» эффекта («weak», «moderate», «strong», соответственно). Значения параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3. Эффективные значения параметров алгоритма для трёх различных вариантов модели с слабой, умеренной и сильной амплитудами получаемого «ridge» эффекта

Parameter	"weak"	"moderate"	"strong"
$\langle \Delta_{u}^{\rm CPG} \rangle$	3.70	4.50	5.00
$\langle \sigma^{\rm CPG}_{\omega 0} \rangle$	0.10	0.09	0.05
$\langle \beta \rangle$	1.00	0.82	0.25
$\langle y^{ m CPG}_{ m thr}  angle$	3.66	2.92	2.48

## 16.Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам, наблюдаемым в экспериментах на БАК и в космических лучах (Задача № 16)

В рамках версии FANSY 2.0 СРG, моделирующей компланарную генерацию ЭВЧ в фрагментационной области во взаимодействиях адронов с нуклонами при  $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ ( $\sqrt{s} \gtrsim 5$  ТэВ), продолжалось исследование возможной связи результатов экспериментов в космических лучах по явлению компланарности ЭВЧ с данными CMS по "ridge" эффекту. Анализировались двухчастичные корреляции в пространстве переменных  $\Delta \eta - \Delta \phi$  корреляционной функции при  $\Delta \phi \approx 0$  и  $|\Delta \eta| < 4$  в событиях с множественностью  $n_{ch} > 90$  при  $|\eta| < 2.4$  и  $p_t > 0.4$  ГэВ/с.

В соответствии с алгоритмами обработки результатов эксперимента CMS, корреляционная функция определяется следующим образом:

$$R(\Delta\eta, \Delta\phi) = \langle (\langle N \rangle - 1) (\frac{S_N(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B_N(\Delta\eta, \Delta\phi)} - 1) \rangle$$
(1)

Здесь  $\Delta \eta = |\eta_1 - \eta_2|$ ,  $\Delta \phi = |\phi_1 - \phi_2|$  – абсолютная величина различий в псевдобыстротах  $\eta$  и азимутальных углах двух частиц  $\phi$ ,  $\langle N \rangle$  – среднее число треков на одно событие,  $S_N$  и  $B_N$  – функции плотности сигнала и фона, определяемые выражениями (2) и (3), соответственно.

$$S_N(\Delta\eta,\Delta\phi) = \frac{2}{N(N-1)} \frac{d^2 N^{signal}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$
(2)

$$B_N(\Delta\eta,\Delta\phi) = \frac{1}{N_1 N_2} \frac{d^2 N^{mixed}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$
(3)

Распределение функции плотности сигнала  $S_N$  в каждом событии определяется числом всех пар заряженных частиц с множественностью N, т.е. N (N - 1)/2. Фоновое распределение  $B_N$  находится путем случайного выбора двух различных событий с множественностями  $N_1$  и  $N_2$ , соответственно, и сопряжения частиц из одного события с частицами в другом событии.

В рамках FANSY 2.0 СРG моделировались взаимодействия протон-протонные (без учета отклика детекторов) и был проведен анализ отобранных событий, аналогичный экспериментальной процедуре. Рассматривалась зависимость амплитуды «ridge» эффекта от параметров алгоритма моделирования компланарной генерации и были найдены их наиболее эффективные значения (Табл. 1).

Поскольку использованные при этом критерии отбора событий для окончательного построения корреляционных функций несколько отличались от применявшихся в эксперименте CMS, работа в 2021 г. была продолжена, что выразилось в существенном
увеличении статистической обеспеченности результатов, рассмотрении трёх версий алгоритма компланаризации (см. Табл. 1) и применения более точных критериев отбора событий. Хотя количественный результат немного изменился, качественный вывод остался тем же самым. Было показано на основе результатов моделирования протонпротонных взаимодействий в рамках модели FANSY 2.0, что т.н. long-range near-side «ridge» эффект эксперимента CMS, а именно, рост двухчастичной корреляционной функции R ( $\Delta\eta$ ,  $\Delta\phi$ ) при  $\Delta\phi\sim0$  и  $|\Delta\eta| \gtrsim 3$  (рис. 22а), который не объясняется ни одной из существующих теоретических моделей, воспроизводится как побочный результат компланарной генерации наиболее высокоэнергичных частиц в рр взаимодействиях (рис. 226, «умеренная» версия). Хотя моделирование отклика детектора, учитывающего, что эффективность регистрации частиц отличается от 100%, не проводилось, от этого качественный вывод не меняется.

Полученный результат может означать, что современные теоретические представления о генерации наиболее энергичных частиц в множественных процессах при сверхвысоких энергиях не полностью описывают характеристики подобных взаимодействий.



Рис. 22. Двухчастичная корреляционная функция R (Δη, Δφ), полученная Коллаборацией CMS (а), и в результате моделирования в рамках «умеренной» версии (б). На обоих рисунках имеет место рост функции при Δφ~0 и |Δη/ ≥ 3 (т.н. long-range near-side «ridge» эффект).

# 17. Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывной регистрации с чувствительностью 10<sup>-19</sup> Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям (Задача № 17)

Гравитационная антенна ОГРАН основана на комбинации твердотельного и волн интерферометрического принципов регистрации гравитационных (ΓB). Центральным элементом антенны является массивная цилиндрическая болванка (M = 2.5 т, L=2.3 м), выполненная из алюминиевого сплава с центрально-осевым каналом, образующим полость оптического эталона Фабри-Перо с внешней лазерной накачкой, зеркала которого крепятся на торцах цилиндра. Такая конструкция привносит два новых качественных фактора: 1) воздействие ГВ на две степени свободы, акустическую и оптическую, имеет сложную структуру отклика, облегчая его фильтрацию; 2) малошумящая оптическая система регистрации позволяет без охлаждения достигнуть чувствительности, типичной для криогенных антенн ~ 10-19 при полосе порядка 10 Гц. Чувствительность, однако, остается ограниченной уровнем 10-20 теплового акустического шума детектора вне его резонансной области. В 2020 году была выполнена существенная модернизация антенны ОГРАН, которая, в принципе, позволяет использовать эту установку в режиме долговременных непрерывных измерений. В отчетном 2021 году проводилось исследование процессов тепловой релаксации этой антенны. Нейтринный сцинтилляционный телескоп БПСТ расположен на эффективной глубине 850 м водного эквивалента. Установка состоит из сцинтилляционных счетчиков, полная масса сцинтиллятора составляет 330 т. Основной реакций детектирования нейтрино является реакция обратного бета-распада: при средней энергии антинейтрино Еv ~ 10 МэВ, пробег позитрона, как правило, заключен в объеме одного счетчика. При этом сигнал регистрации выглядит как серия событий из одиночных срабатываний счетчиков (пороговая энергия счетчика 8 МэВ). За все время наблюдения на БПСТ по программе «поиск коллапсаров» (более 25 лет) не было зарегистрировано ни одного события превышающего стохастический фон счета. Оценка вероятности гравитационного коллапса в Галактике (на расстоянии 10 кпс) вероятность, или "частотность события" по нейтринному каналу составила 0.074 в год. С подключением данных гравитационного канала ожидается дальнейшее угочнение этой оценки вплоть до теоретически ожидаемой величины темпа появления сверхновых в отдельной галактике ~ 0.01 1/год. Сопутствующей прикладной задачей для планируемого двух канального поиска коллапсаров является построение статистического алгоритма совместной обработки данных БСПТ и ОГРАН на основе данных о взаимной корреляции ГВ и нейтринных сигналов, полученных сопоставлением различных моделей коллапса. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований эффектов тепловой релаксации ОГРАН в режиме пассивной и активной термической стабилизации установки при её функционировании в режиме службы.

### **17.1.** Модернизация действующего гравитационного детектора и отработка режима долговременных измерений

Текущее техническое состояние антенны ОГРАН позволяет осуществить её запуск в режим долговременных наблюдений наземного фона гравитационного градиента в окрестности резонансной частоты 1,3 кГц. В этом режиме антенна допускает дистанционное управление с помощью разработанного программного обеспечения, контролирующего исполнительные драйверы установки. Осуществляется активное отслеживание её основных параметров, поиск оптических мод ФП резонаторов, удержание их требуемой засветки (оптической рабочей точки). Удаленный доступ к центральному компьютеру установки осуществляется посредством сети Интернет с использованием дополнительных локальных сетей БНО.

На текущий момент серьезных ограничений полосы пропускания канала управления не возникало. В полноэкранном режиме с выводом всех сигналов в виде динамически обновляющихся графиков и изображений оптических мод в обоих каналах, достаточно пропускной способности 5-10 Мбит/с. Для удаленного оператора зависит эффективность управления установкой от времени распространения коммуникационных сигналов (параметр Round Trip Time (RTT)). При расположении центров управления в Москве или в Новосибирске оценка RTT ~ 50 – 100 мс, что удовлетворяет условиям комфортного управления (при отсутствии необходимости быстрой смены рабочих режимов установки). Важной функцией системы автоматического управления является её способность к восстановлению рабочего режима после его срыва в результате интенсивных внешних возмущений. Программное обеспечение данной функции разработано ранее. Для полноценного автоматического режима требуется внесение изменений в систему съема сигналов фото детектирования ОГРАН. На текущий момент восстановление после срывов осуществляется оператором вручную. В режим непрерывных наблюдений антенна ОГРАН была введена 1 марта 2021 г. Как отмечено выше, этому предшествовала модернизация, включающая замену фотодетекторов в обоих

75

каналах, установку в каждом канале на выходе интерферометров Фабри-Перо комбинированных устройств, состоящих из видеокамер для наблюдения формы оптической моды и фотодетекторов, регистрирующих интенсивность проходящего излучения. Эти элементы необходимы для автоматического поиска оптимального положения рабочей точки и перевода установки в режим непрерывной службы. В ходе наблюдений выявились важные аспекты, влияющие на долговременное и надежное удержание рабочего режима полного захвата в системе. Основным возмущающим являются небольшие изменения температурного фактором фона лабораторного помещения. Его вариации имеют место, несмотря на установленную систему контролируемого обогрева, включающую в себя устройство ПИД-регулирования (пропорционально интегрально дифференциальный контроллер) с точностью подстройки 0.05 градуса в трех зонах размещения температурных датчиков (на входе в подземное лабораторное помещение, в самой лаборатории и непосредственно под камерой гравитационного детектора). Выяснилось, что даже тепловое излучение от тела оператора вблизи установки оказывает существенное влияние. Стабильный температурный фон устанавливался В течение нескольких дней после посещения лаборатории обслуживающим персоналом. Знание характерных времен тепловой релаксации установки в целом и отдельных её частей важно для обеспечения режима долговременных наблюдений. Тепловые вариации длины твердотельного детектора меняют собственную частоту установленного на нем резонатора ФП. Системы обратной связи отслеживают эти изменения и управляют длиной волны источника излучения так, что частота накачки все время соответствует собственной частоте ФП. Изменение частоты происходит за счет подачи управляющего напряжение на пьезокерамический пакет, на котором закреплено одно из зеркал лазерного резонатора. Таким образом величина этого напряжения пропорциональна длине твердотельного детектора, т.е. дает информацию о его тепловом состоянии. Во втором плече резонатор ФП установлен на цилиндрической болванке меньшего размера, выполненной из ситалла – материала с низкими коэффициентами теплопроводности и теплового расширения. Вариации частоты накачки, обусловленные вариациями длины резонатора ФП первого канала, как и сбой оптического ФП резонанса здесь компенсируется напряжением обратной связи, приложенным к пъезопакету, на котором укреплено одно из ФП зеркал. Таким образом, это напряжение пропорционально эффективной оптической длине дискриминатора.

В обоих плечах для удержания рабочей точки на вершине оптического резонанса используется техника Паунда–Дривера-Холла, для чего вводится дополнительная фазовая

модуляция лазерного излучения на радиочастоте 10,7 МГц, для которой технические шумы лазера уже меньше пуассоновских при рабочих мощностях. Измеряя напряжение на пьезо керамике, управляющей частотой лазерного излучения и зная расстояние между боковыми компонентами модулированной накачки ( $2 \times 10$ , 7 МГц = 21,4 МГц), можно определить коэффициент преобразования управляющего напряжения в частоту лазерной накачки. Диапазон перестройки в первом канале (плече) определяется диапазоном возможных напряжений на конечном высоковольтном усилителе, управляющим пьезо керамикой лазера и составляет примерно 430 вольт. Для резонатора Фабри-Перо на твердотельном детекторе, длиной 2 метра, интервал между модового расстояния (FSR-free spectral range) составляет FSR=c/2L=75МГц. В диапазоне перестройки насчитывается 22–23 основных моды, в зависимости от расположения начальной частоты, т.е. полный диапазон перестройки составляет 1725 МГц. Во втором канале цепь обратной связи подстраивает длину опорного резонатора ФП под частоту лазера с помощью пьезо-керамики под одним из зеркал резонатора.

Для расстояния между зеркалами дискриминатора 45 см расстояние между модами FSR=167МГц. Во всем диапазоне перестройки второго канала (430 вольт) видны только две основные моды, разнос напряжений между которыми около 200 В. Следовательно, полный диапазон перестройки мод во втором канале составляет 335 Мгц. Поведение обоих резонаторов Фабри-Перо (один на алюминиевой болванке длиной 2 м, второй на ситалловом цилиндре длиной 45 см) определяется ИХ коэффициентами температуропроводности, от которых зависит распространения тепла внутри резонаторов при одинаковом изменении внешнего температурного фона. Температуропроводность характеризует скорость выравнивания температуры среды в неравновесных тепловых процессах. Расчеты показывают, что коэффициент температуропроводности для ситалла в 160 раз ниже, чем для алюминия. В таком случае следует ожидать, что при неизменном температурном фоне в окружающем помещении основной акустический детектор стабилизируется по температуре гораздо быстрее ситаллового дискриминатора. Это было подтверждено в экспериментах. Было найдено, что время полной тепловой релаксации установки от включения систем подогрева помещений до достижения стабильного температурного режима составляет 700 часов (примерно один месяц). Такие времена обусловлены, по-видимому, гораздо более медленной релаксацией в опорном детекторе. На стабильность удержания рабочей точки в режиме полного захвата может влиять также изменение показателя преломления вследствие ухудшения вакуума. Полученные данные

показывают, что рабочая точка в каждом канале смещалась в одном направлении (в сторону повышения температуры) независимо от того, улучшался или ухудшался вакуум в камере опорного резонатора. В целом этот эффект оказался достаточно малым, чтобы им можно было пренебречь. Тепловые вариации температуры акустического детектора ОГРАН влияют на положение центральной частоты броуновского пика. Такие измерения многократно проводились со спектральным разрешением 0.001 Гц. Центр резонансного пика ОГРАН приходится на частоту 1.3 кГц (самый высоко добротный пик на частоте порядка 800 Гц соответствует колебаниям изгибной (не рабочей) моды детектора). Отношение сигнала к шуму в таких измерениях зависит от точности оптических настроек и при лучшей настройке достигает 60. Ширина резонансного пика составляет 0.002 Гц. Для его качественного спектрального разрешения необходимо накапливать сигнал не менее 1000 секунд. При этом в спектре внутрь полосы резонансного пика попадут три точки дискретизации. Резюмируя данный раздел, подчеркнем ещё раз, что установка ОГРАН запущена в режим долговременных непрерывных наблюдений. Первые эксперименты обнаружили необходимость обеспечения стабильного теплового фона в прилегающих помещениях, а также слабое влияние вариаций вакуума в камерах детектора и дискриминатора. Скорость релаксации температуры внутри обоих ФП резонаторов при изменении внешнего температурного фона составляет порядка 700 часов. Соответствующая статья принята к публикации в журнал Ядерная физика и Инжиниринг.

#### 17.2. Измерения сейсмо-гравитационного фона шумов туннеля БНО.

Гравитационные волны (ГВ), следующие из общей теории относительности Эйнштейна, вызывают приливные деформации пространства. В простейшем случае такие деформации ассоциируются с растяжением в одном выбранном направлении и одновременным сжатием в перпендикулярном направлении. Абсолютное изменение длинны, индуцированное астрофизическими ГВ, в десятки тысяч раз меньше диаметра протона. Относительные вариации длинны ничтожно малы, порядка 10–21 (что соответствует вариациям расстояния 10–18м на длине 1 км). Это означает, что детекторы должны быть чрезвычайно чувствительны к изменению деформаций, но в то же время быть защищенными от любого не гравитационного источника механического шума, такого как, например, спорадические перемещения грунта, штормы, удары молний и сейсмические шумы в целом, которые могут имитировать сигналы реакции на воздействия гравитационных волн. Шум окружающей среды снижается за счет размещения ГВ интерферометров в сверхвысоком вакууме и использования активных и пассивных фильтров внешних механических воздействий. Оба типа изоляции имеют целью увеличение приемной полосы частот детекторов. Однако, из-за огромного разрыва между фоном среднеквадратичных сейсмических вибраций 10–7м и чувствительностью к гравитационно-волновым возмущениям 10–17м. различные нелинейные эффекты могут значительно ухудшить их частотные характеристики.

Конструирование активных управляемых систем подавления шумового фона является серьезной технической проблемой. Вдобавок микросейсмическое случайное движение земной коры приводит к возникновению стохастической ньютоновской гравитационной силы, действующей на пробные массы – зеркала, что создает дополнительный шум на выходе интерферометрического детектора. Такой «ньютоновский шум» ограничивает чувствительность детектора в частотном диапазоне ниже 5 Гц. Туг работает прямая гравитационная связь между пробными массами интерферометра и окружающей геологией, которую нельзя экранировать или подавить. Следовательно, поиск достаточно спокойной сейсмической среды - это первый (и основной) естественный шаг к уменьшению ньютоновских помех. В рамках дизайнпроекта детекторов ГВ нового поколения (3G) нами были проведены исследования характеристик сейсмического шума ряда различных подземных сайтов. В частности, исследовались обсерватории, которые приводят к значительному снижению спектральной плотности (PSD) сейсмической мощности по сравнению с площадками, на которых сегодня размещены современные интерферометрические детекторы ГВ, такие как LIGO и VIRGO. Подобные измерения PSD обычно сравниваются с использованием моделей (классификации) Петерсона с высоким (NHNM) и низким (NLNM) шумом, чтобы получить относительную оценку уровня зашумленности (или «шумов окружения») различных сайтов.

В данном отчете подводится итог наших многолетних измерений, проведенных в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Были накоплены, обработаны и проанализированы две группы (серии) сейсмо данных снятых разными инструментами в 2013 и 2018 годах. На их основе рассчитаны спектральные плотности ньютоновского шума. Сделан вывод о высоком качестве площадки БНО как сайта для будущих поколений гравитационных детекторов.

1) В 2013 г. измерения проводились группой ГАИШ при содействии Геофизическаой службы РАН (ИФЗ в Обнинске), которая установила стационарную измерительную линейку сейсмометров в главном туннеле БНО (и на пикетах ПК-14 и ПК-

79

38, в частности). Измерения сейсмического фона вдоль основного туннеля группой ГАИШ проводились портативными сейсмометрами. Использовались обычные трехкоординатные сейсмометры типа Guralp CMG-3T / ESPC (такой прибор имеет три датчика, которые могут измерять одновременно север-юг, восток-запад и вертикальную составляющую движения грунта, и оснащен встроенным дигитайзером колебаний в диапазоне частот (3 × 10-3 - 50) Гц. Измерения проводилась путем мониторинга сейсмической активности в трех разных точках вдоль 4-километрового горизонтального туннеля; маркеры ПКЗ, ПК14, ПКЗ8. ПКЗ – это станция в 300 м от входа в туннель и с эффективной глубиной 190 м от дневной поверхности. ПК14 находится на расстоянии 1500 м от входа в основной туннель в районе камеры гравитационного детектора ОГРАН; глубина этого пикета от поверхности составляет 850 м от поверхности. ПКЗ8 - станция на расстоянии 3800 м от входа в туннель при глубине 2130 м. Результаты измерений были представлены в виде спектральной плотности горизонтальных и вертикальных ускорений (в логарифмическом масштабе). На самой глубокой отметке 3800 м в диапазоне частот порядка 10–1 Гц спектральная плотность ускорения уменьшается от  $1 \times 10-14$  м2/с4 Гц до 1 × 10-16 м2/с4 Гц.

2) Второй сбор данных проводился при участии итальянских коллег в течение трех дней в 2018 г., с 25 по 27 сентября, с использованием сейсмометров двух типов. Широкополосный трехосный сейсмометр Trillium 240 производства Nanometrics Inc, этот же прибор использовался также для измерения характеристик других сайтов, которые являются кандидатами на размещение ГВ детекторов 3G (Телескоп Эйнштейна). Использовались также Сейсмометры СМЗ разработанные в ИФЗ РАН на базе маятника с отрицательной обратной связью. Один из них был установлен недалеко от Trillium 240 на пикете ПК14, и затем перемещался на другие пикеты. Сейсмометр Trillium 240 был установлен на полу лаборатории ОГРАН, приклеенный к основанию туннеля, горизонтально ориентирован на север и выровнен. После установки прибор оставался в покое на месте примерно 24 часа для достижения теплового равновесия с местной температурой окружающей среды. Trillium 240 был подключен к DAQ Taurus для записи полученных данных в оцифрованной форме. Аналоговый выходной сигнал датчика оцифровывался, в начале с частотой 30 кГц, а затем с понижением частоты оцифровки до 40 Гц с помощью фильтра сглаживания. Наиболее заметной особенностью полученных сейсмограмм является вторичный океанический микросейсмический пик на f = 0,195 Гц, при этом колено между 0,4 и 1 Гц, что, вероятно, связано с волнами в Черном и Каспийском морях. Выше 1 Гц и горизонтальный и вертикальный спектры близки к минимальному уровню, установленному NLNM. Сравнивая спектр с предыдущими измерениями, выполненными в 2013 году, и принимая во внимание квадратный коэффициент между амплитудой и спектральной плотностью мощности, можно отметить избыточный шум выше 2 Гц в ранних измерениях, вероятно, связанный с собственным шумом датчика Guralp и его дигитайзера на этих частотах.

В результате обработки данных были представлены спектрограммы из усредненных за один час спектров полученных между 20:00 ч 26 сентября и 5:00 ч 27 сентября. Кроме того, для сравнения построены вертикальный сейсмический спектр, измеренный в БНО на ПК14 и на глубине 110 м и на руднике Сос Энатто (Sos Enattos), расположенном в центральной зоне Сардинии, Италия, в тот же период времени. В зоне 1 Гц шумы в БНО оказываются более спокойными.

#### 17.3. Микросейсмическая когерентность в туннеле БНО.

В течение июня 2013 года был выполнен специальный сбор данных с целью выяснения существования пространственной когерентности микро сейсмического шума в туннеле БНО. Сбор данных был относительно коротким (несколько часов). Внимание было сосредоточено на вертикальных микросейсмических смещениях. Строился шумовой спектр данных, дискретизированных с частотой 100 Гц, от квазистатических частот до максимальной частоты 10 Гц. Отметим, что шум был довольно стационарным в течение периода сбора данных, без провалов или особых выбросов. Мы приняли в качестве базовой эталонную станцию РКЗ8 (3800 м от главного входа в туннель).

Синхронизация во времени потоков данных, собранных на двух других станциях, была скорректирована по отношению к эталонной станции. Вычислялась степень когерентности в диапазоне частот от 10–3 до 10 Гц как в паре ПКЗ-ПКЗ8 и для ПК14-ПКЗ8. Отмечена значительная когерентность в диапазоне частот 0,2–0,4 Гц, т.е. область с преобладанием микросейсмического пика. В других частотных интервалах корреляция слабая или отсутствует. Аналогичный результат был получен с использованием данных, собранных и в 2018 году. Вертикальное микросейсмическое смещение измерялось с использованием синхронизированных данных двух датчиков SM3, расположенных на отметках ПКЗ и ПКЗ8. Измерение подтверждает наличие пика взаимной корреляции в том же частотном диапазоне между этими станциями.

#### 17.4. Оценка ньютоновского шума.

Простейшую оценку соответствующей спектральной интенсивности ньютоновского шума, порождаемого сейсмической активностью, можно получить с

помощью упрошенной модели Саулсона, которая хорошо известна. В свою очередь по ньютоновскому шуму можно оценить спектральную плотность мощности (СПМ) смещений пробных масс гравитационно-волнового детектора, зеркала которого подвешены в виде маятников. Механизм простой: на зеркала действует случайное гравитационное поле Ньютона, вызванное сейсмическими возмущениями Земли. Соответствующие расчеты были проведены, и спектральные плотности чувствительности гравитационных детекторов – интерферометров представлены при их расположениях в характерных зонах туннеля маркированных номерами пикетов. Пикет считается средней точкой линейного интерферометра с полной базой в 10 км. Используются данные измерений с приборами Guralp CMG-3T / ESPC.

Две серии измерений, проведенных на интервале 5 лет, показывают аналогичное поведение PDS. Более глубокое местоположение (станция PK34) на частотах чуть больше 1 Гц, (диапазон, интересный для квалификации детектора 3G-GW) работает в пользу Баксана. До 1 Гц спектр находится под воздействием морского движения, Каспийского и Черного морей на Баксан и Средиземное море для Сос-Энаттоса. Нет свидетельств динамических эффектов из-за движения магмы ближайшего вулкана. Вычисление потенциального вклада в ньютоновской фон по микросейсмическим данным, полученным в лаборатории ОГРАН, показывает, что этот предел значительно ниже требований предполагаемого детектора Телескоп Эйнштейна. Спектр поперечных смещений, измеренный с помощью сейсмометров, расположенных в разных точках вдоль туннеля, показывает основной пик на 0,21 Гц. Интерпретация этого результата непростая. Корреляция в микросейсмическом спектре в диапазоне (0,1 - 0, 4) Гц может быть известным эффектом: из-за вторичного (доминирующего) микросейсмического пика возникают стоячие волны в океанах, обычно с частотой 0, 2 Гц. Однако может также возникать конкурирующий резонансный эффект распространения звука в туннеле. Будущие измерения с инфразвуковыми микрофонами должны позволить выбрать правильную интерпретацию этого результата.

82

#### 18. Организация прецизионных измерений вариаций электрического и магнитного 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 № 18)

Для качественной оценки взаимного влияния, ниже на рисунке, представлены графики поведения различных геофизических параметров, в период с 29 июля по 6 сентября 2019г. используемых в работе по их корреляционному анализу. Этот период выделяется, помимо удовлетворительной работы установки «Ковёр», наличием воздействия циклонов на состояние атмосферы, проявленное в вариациях грозовой активности и приземной температуры (см. рис. 23, панель 1 и 2 сверху). Также присутствуют два эффекта от магнитных бурь, ярко проявившихся в депрессии Х – компоненты дипольной составляющей геомагнитного поля (аналог DST – вариации), (см. рис. 23, панель 3 сверху). На 4-ой панели, сверху, приведён график параметра ПЭС (Ne) для координат установки «Ковёр» 43.3° N, 42.7° E, полученный аппроксимацией данных глобальных ПЭС **IONEX** карт В формате (pecypc https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/cat/). Ha 5-ой панели приведён график возмущённости ионосферы (W-индекс). Значение параметра получено так же, как и в Ne, глобальных случае аппроксимацией данных карт (pecypc https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/cat/). На двух нижних панелях (6 и 7) приводятся графики вариаций времени определения точного спутникового времени (L), и полной интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ (Nµ), регистрируемых установкой «Ковёр». Интенсивность мюонов предварительно была поправлена на вариации давления атмосферы и нестабильность электроники (включая температурную). Видна схожесть в поведении графиков. Результаты корреляционного анализа приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4.	Средние значения геофизических параметров за период 40 суток с 29072021
по 6092021.	

Анализирован ряд 40 суток	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение
Ne ПЭС	11.0 TEC	2.25 TEC
W – индекс	$-0.044 \pm 0.040$ инд	1.23 инд
L	1813.5 нс	68.5 нс
Νμ	41161 м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	71.3 м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>

Здесь, статистическая ошибка не указана, если она пренебрежимо мала.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции и регрессии времени определения точного спутникового времени L, с параметрами Ne, W, Nµ, вычисленные по периоду 40 суток с 29072021 по 6092021.

Корреляция	Коэффи-	N.	W	N.
<l× x=""></l×>	циенты	1 Ne	•••	rγμ
L	корреляции	0.0111·(1±0.206)	-0.131 · (1±0.017)	0.26·(1±0.008)
	регрессии	0.0035·(1±0.306)	-0.0755·(1±0.026)	106.7·(1±0.013)
	$\beta_{L/X}$	нс/ТЕС	нс/индекс	нс/%

Из 2-й таблицы видно, что корреляция L с Ne проявляется слабо (статистическая значимость на уровне 3-х стандартных отклонений). Имеется отрицательная корреляция L с W. C высокой степенью значимости коррелированы лишь L и Nµ. Соответствующий коэффициент регрессии параметра Nµ от L будет  $\beta$ Nµ/L = 9.38·(1±0.0127) [%·мкс-1]. Для этих случайных процессов общим параметром является температура атмосферы. Отличие коэффициента корреляции от единицы означает наличие других значительных, но не коррелирующих меж собою процессов. Для установления соответствия измеряемой в эксперименте задержки при определения спутникового времени L со значениями физических параметров, определяющих её динамику, был проведён дополнительный анализ.

Нужно отметить, что мы используем спутниковые часы GPS170PCI, позволяющие нам, программным образом, в режиме on line, организовать запрос на получение от системы спутников GPS сигналов точного времени. При этом мы измеряем время L, затрачиваемое микропроцессором на считывание и обработку задержек спутниковых сигналов на пути распространения. Поэтому, измеренное время обработки должно содержать и вклад задержек геофизической природы (для примера: ионосферная, температурная, барометрическая и т. д.). Но, при измерении времени выполнения L GPS170PCI используют операции часы основную тактовую частоту термостабилизированного генератора часов 10 МГц, которая, собственно, и определяет выходное точное время. Для этого в часах предусмотрена её автоматическая коррекция, проводимая с учётом навигационных сообщений со спутников о регулярных вариациях ионосферы. Об этом сообщается в «Техническом описании GPS170PCI», прилагаемом к часам. Кроме того, программа, ведёт и обработку данных. Так что измеряемое время задержки L формируется стационарно распределённой случайной величиной времени обработки  $\Delta T$  и случайной величиной  $\Delta \tau = \tau i - \tau R i$ . Здесь  $\tau i$  задержка радиосигнала, при распространении в атмосфере, относительно вакуума, см. формулу (1), τRi - поправочная задержка, регулярного характера, передаваемая часам в навигационном сообщении.

Таким образом становится понятным малая корреляция измеряемого параметра L с вариациями ПЭС, поскольку её главная составляющая – суточная волна исключена коррекцией тактовой частоты параметром тRi. Вместе с тем, наличие стохастических процессов обработки данных и выбора спутников, передающих сигнал точного времени, приводят к снижению коэффициента корреляции. В 2019 году была установлена скважность измерения задержки L 5 раз в секунду. На секундных измерениях, при повышении частоты опроса, случайный фактор уменьшается. В 2021 году скважность повышени частоты опроса, случайный фактор уменьшается. В 2021 году скважность повышена в 20 раз. Надо отметить, поскольку поправка задержки тRi, в практике, носит крупномасштабный характер, порядка нескольких сот километров, то локальные эффекты с масштабом порядка 10 км поправкой не компенсируются и должны быть заметны в вариациях L. Статистически значимая корреляция L с W указывает на влияние геофизической активности Земли через возмущённость ионосферы на точность GPS навигации.

Для проверки таких выводов был проведён корреляционный анализ рядов составленных из одинаковых по местному времени часовых интервалов для каждых из исследуемых 40 суток. Анализ был выполнен. В таблице 6 приведены средние по 24 измерениям (каждый час суток) результаты.

**Таблица 6.** Средние значения коэффициентов корреляции и регрессии параметра L, с параметрами Ne, W, Nµ вычисленные по измеренным значениям для каждого из 24 случаев анализа периода одного и того же часа местного времени взятых у всех 40 суток.

Корреляция	Коэффи-	Na	W	N.,
<l× x=""></l×>	циенты	110		÷γμ
L	корреляции	-0.0816·(1±0.273)	-0.134·(1±0.017)	0.27·(1±0.008)
	регрессии	0.0356·(1±0.036)	-0.0770·(1±0.025)	119.8·(1±0.012)
	$<\beta_{L/X}>_{24}$	нс/ТЕС	нс/индекс	нс/%



Рис. 23. 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. Описание сверху вниз. 1 Приземное электрическое поле. 2 Приземная температура возле установки. 3 X - компонента дипольной части приземного геомагнитного поля, скважность - 1 час. 4 Аппроксимация полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над установкой, полученная используя глобальные карты ПЭС в формате IONEX (pecypc https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/cat/), скважность - 1 час. 5 Аппроксимация W - индекса возмущённости ионосферы, так же полученная используя глобальные карты в формате IONEX (pecypc https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/cat/), скважность - 1 час. 6 Время на получение сигнала точного времени от системы спутников GPS. 7 Вариации измеряемой полной интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Завершены исследования, разработаны, скомплектованы, изготовлены и подготовлены все элементы и системы для установки следующих двух кластеров телескопа Baikal-GVD во время зимней экспедиции 2022 г.

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

База экспериментальных данных пополнилась за счет непрерывного набора в течение 2021 года. Часть данных 2021 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»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В результате физического и компьютерного моделирования установлены все параметры системы сбора данных запущенного в эксплуатацию в 2020 году телескопа Baikal-GVD из 8 кластеров.

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В результате исследований подготовлены экспериментальные данные для выделения и восстановления событий в автоматическом режиме за 2019-2021 годы. Получены первые физические результаты и показано их согласие с результатами моделирования.

87

# 5. Задача «Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В результате анализа экспериментальных данных 2018. 2019 и 2020 года за 2294 дня эффективного набора данных одним кластером с применением дополнительных условий по подавлению фона от атмосферных мюонов выделено в общей сложности десять 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.

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В течение 2021 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

7. Задача «Измерение 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» № 7.

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В эксперименте BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) на УНУ ГГНТ получен результат измерения скорости захвата нейтрино в двух концентрических галлиевых мишенях на двух расстояниях от интенсивного нейтринного источника 51Сг. Результаты эксперимента согласуются с осцилляционными переходами электронных нейтрино в стерильные состояния с относительно большой разностью квадратов масс Δm2 (>0.5 эB2) и углом смешивания sin22θ (~0.4). Полученный дефицит нейтрино в зонах подтверждает и усиливает «галлиевую аномалию».

По итогам эксперимента подготовлены статьи для публикации в журнале Physical Review Letters и Physical Review C.

#### 8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».

План работ на 2021 год выполнен полностью

Для выбора оптимальной геометрии большого детектора с массой мишени 5000 тон было проведено моделирование и сравнение отклика двух геометрий детектора: сфера (радиус R=14.1 м) и "пилюля" (радиус полусфер r=11.2 м, высота цилиндрической части h=14.9 м). Объем для обеих геометрий одинаков. Из рассчитанного отклика детекторов таких геометрий получено, что сферическая геометрия выглядит более предпочтительно.

# 9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В 2021 году велись исследования по поиску нейтрино от коллапсирующих звезд с помощью детектора LVD. Детектор АСД закончил свою работу по мониторингу вспышек Сверхновых, проработав 43 года (с 1977г по 2020г). В 2021 году составлялся план демонтажа детектора и создавался полный архив данных эксперимента. На БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации по задаче регистрации нейтринных всплесков, проводилась обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установке, и мониторинг вспышек сверхновых в нашей галактике. Получены новые ограничения на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике. Проводился поиск коррелированных событий нейтринных детекторов LVD и БПСТ во время сигнала от слияния нейтронных звезд GW170817.

## 10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Эксперимент по поиску нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд на БПСТ получил идентификатор эксперимента в сети SNEWS, ID # 12. Соединение с сетью SNEWS было установлено в старой версии программы в феврале 2021 года в предыдущей

версии программы. Новая версия программы для связи с сетью SNEWS2.0 в данный момент находится в состоянии разработки и тестирования.

11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В течение 2021 года на ливневой установке "Ковер-2" поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам, проводился непрерывный мониторинг информации, и проводилась обработка и анализ экспериментальных данных. Создан архив экспериментальных данных установке "Ковер-2" за 2021 год. По экспериментальным данным установки обнаружена вспышечная активность источников Суд X-3 и Суд X-1. По информации установке "Ковер-2" за 2018 – 2021 годы получена оценка ограничения на поток диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 2.4 ПэВ.

Выполнены измерения потоков гамма-квантов высоких энергий от локальных источников на двух узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA. Измерен поток гаммаквантов высоких энергий от остатка сверхновой в Крабовидной туманности со статистической значимостью более 6σ и исследован их энергетический спектр. Зарегистрированы гамма-кванты высоких энергий от внегалактического источника блазара Mrk421 со статистической значимостью более 5σ. Исследован диффузный поток гамма-квантов сверхвысоких энергий по данным сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE.

# 12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В 2021г был продолжен эксперимент с 83Kr. По результатам анализа данных, полученных за 777 сут живого времени измерений, получено верхнее ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона:  $|gA\gamma \times mA| \le 7.89 \times 10{\text{-}16}$ . В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов:

*mA*≤ 12.6 эВ (95% У.Д.). Измерения с 83Кг продолжаются. Идет обработка данных за 865 сут живого времени измерений.

Продолжается разработка полупроводникового детектора содержащего 57Fe для поиска Солнечных аксионов.

Начата разработка эксперимента с использованием стальных пропорциональных счетчиков.

## 13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Выполнены измерения энергетического спектра и массового состава первичного космического излучения в диапазоне  $2 \times 10^{14}$  - $10^{18}$  эВ на широкоугольных черенковских установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE экспериментального комплекса TAIGA.

В ходе анализа данных установки TALE FD было показано утяжеление массового состава космических лучей с ростом энергии в диапазоне от 2 ПэВ до 2 ЭэВ для двух рассмотренных моделей адронных взаимодействий. Данный результат хорошо согласуется с моделью галактического происхождения космических лучей этих энергий с обрезанием инжекционного спектра, зависящим от магнитной жесткости.

В рамках работы в составе коллаборации LHAASO были впервые обнаружены гамма-кванты космических лучей с энергией выше 1 ПэВ. Кроме того, проводились работы по тестированию и отладке первой части установки ENDA-LHAASO на основе электронно-нейтронных детекторов.

# 14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Был разработан новый метод реконструкции направлений прихода космических лучей, детектируемых наземной решеткой эксперимента Telescope Array, метод основан на применении сверточных нейронных сетей. Метод позволяет улучшить реконструкцию направления прихода ШАЛ примерно на четверть для протонов и ядер и на треть для фотонов.

Был произведен поиск анизотропии направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий, детектированных наземной решеткой эксперимента Telescope

Array, он выявил значимый избыток событий с энергиями более приблизительно 25 ЭэВ расположенный в направлении сверхскопления галактик Персея-Рыб.

По результатам исследований в 2021 году была опубликована статья в журнале, сделано два доклада на международной конференции ICRC-2021 и опубликованы две статьи в сборнике ее материалов, также опубликован препринт.

15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях 10<sup>11</sup> – 10<sup>17</sup> эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

В исследованиях по теме «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях 10<sup>15</sup> – 10<sup>18</sup> эВ» получены следующие результаты.

Усовершенствован программный пакет FANSY 2.0, уточнены некоторые экспериментальные данные по мезон- и протон-протонным взаимодействиям, полученные на ускорителях и LHC в широком диапазоне энергий, по генерации основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих *u,d,s,c* кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы).

Были 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.

## 16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Показано, что в рамках модели FANSY 2.0 CPG near-side «ridge» эффект, который в настоящее время не объясняется теоретическими моделями, может являться побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц.

17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью 10<sup>-19</sup> Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Получен опыт эксплуатации гравитационной антенны ОГРАН в режиме длительных наблюдений. Измерены времена тепловой релаксации как антенны в целом, так и отдельно по дифференциальным оптоакустическим каналам ФП резонаторам в плечах детектора и дискриминатора. Обнаружена необходимость дополнительной активной (следящей) термоизоляции вакуумной камеры большого акустического детектора

Завершены многолетние исследования сейсмо-гравитационного шумового фона Баксанской нейтринной обсерватории. Сравнение с аналогичными характеристиками других Европейских и мировых подземных сайтов показывает заметное преимущество БНО как места размещения гравитационно-волновых детекторов нового поколения (3G).

18. 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»

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Изучена связь экспериментально измеряемого времени затрачиваемого на определение точного времени спутниковыми часами GPS170PCI (параметра L) с вариациями ПЭС, возмущённости ионосферы (W-индекс) и измеряемыми вариациями интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ. Измерены коэффициенты регрессии. Существует реальная возможность регистрации локальных возмущений ионосферы над установкой «Ковёр». Обнаружено, что в условиях установки «Ковёр», коррекция точного спутникового времени, выполняемая стандартным образом, ведёт к систематической ошибке интерпретации суточной волны.

Независимым экспериментальным методом подтвержден результат калибровки связи параметра L с крупномасштабным возмущением ПЭС во время магнитной бури, что, в свою очередь, подтверждает вывод о регистрации троекратного локального возмущения ионосферы.

93

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Пресс-релиз. Москва, 30 апреля 2021 года. http://www.inr.ru

[2] K. N. Abazajian et al., (2012), arXiv:1204.5379 [hep-ph], pp.170-175.

[3] V.Gavrin, B. Cleveland, S. Danshin, S. Elliott, V. Gorbachev, T. Ibragimova, A. Kalikhov, T. Knodel, Yu.Kozlova, Yu. Malyshkin, V. Matveev, I Mirmov, J. Nico, R.G.H. Robertson, A. Shikhin, D. Sinclair, E. Veretenkin, and J. Wilkerson, Current Status of New SAGE Project with 51Cr Neutrino Source. Physics of Particles and Nuclei. 2015. Vol.46, No.2. pp.131-137

[4] V. N. Gavrin, B. T. Cleveland, V. V. Gorbachev, T. V. Ibragimova, A. V. Kalikhov, Yu. P. Kozlova, I. N. Mirmov, A. A. Shikhin, and E. P. Veretenkin. Search for Sterile Neutrinos in Gallium Experiments with Artificial Neutrino Sources. Physics of Particles and Nuclei. 2017. Vol. 48, No. 6. pp. 967–969.

[5] Vladislav Barinov, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. BEST sensitivity to O(1) eV sterile neutrino. Phys. Rev. D 93, 073002 (2016).

[6] Vladislav Barinov, Bruce Cleveland, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, Tatiana Ibragimova. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly. Phys. Rev. D 97, 073001 (2018); arXiv:1710.06326 [hep-ph].

[7] Yu. Malyshkin, et al. Modeling of MeV-scale particle detector based on organic liquid scintillator . Nuclear Instruments and Methods A. 2020. V.951. 162920.

[8] Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков. // Строение и эволюция Вселенной. - М.: Наука. 1982.

[9] A. Mirizzi, I. Tamborra, H.-T. Janka, N. Saviano, K. Scholberg, R. Bollig, L. Hudepohl, and S. Chakraborty, // Supernova Neutrinos: Production, Oscillations and Detection. – 2016. – Riv. Nuovo Cim. – V. 39. – n. 1-2. – p. 1–112.

[10] H. T. Janka // Neutrino Emission from Supernovae. – 2017. – arXiv:1702.08713 [astro-ph.HE].

[11] G. Fogli, E. Lisi, A. Marrone, and A. Mirizzi, // Neutrinos self interactions in Supernovae. – in 43rd Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories. – 2008. – 5 – p. 437442.

[12] Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков. Теория тяготения и эволюция звезд. – М: Наука, 1971.

[13] A.Aab et al. [Pierre Auger collaboration], Observation of a Large-scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above  $8 \times 10^{18}$  eV, Science 357, no.6537, 1266 (2017); doi: 10.1126/science.aan4338.

[14] R.U. Abbasi et al. [Telescope Array collaboration], Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment, Astrophys. J. Lett. 790, L21 (2014); doi: 10.1088/2041-8205/790/2/L21.

[15] A. Aab et al. [Pierre Auger collaboration], An Indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources, Astrophys. J. Lett. 853, L29 (2018); doi: 10.3847/2041-8213/aaa66d.

[16] R.U. Abbasi et al. [Telescope Array collaboration], Evidence for Declination Dependence of the Ultrahigh Energy Cosmic Ray Spectrum in the Northern Hemisphere, [arXiv:1801.07820 [astro-ph.HE]].

[17] M.Y. Kuznetsov and P.G. Tinyakov, UHECR mass composition at highest energies from anisotropy of their arrival directions, JCAP 04, 065 (2021); doi: 10.1088/1475-7516/2021/04/065.

[18] D.S. Gorbunov, P.G. Tinyakov, I.I. Tkachev and S.V. Troitsky, Testing the correlations between ultra-high-energy cosmic rays and BL Lac type objects with HiRes stereoscopic data, JETP Lett. 80, 145 (2004); doi: 10.1134/1.1808838.

[19] Elliott Kaplan and Christopher Hegarty. Understanding GPS: principles and applications. Artech house, 2005, p. 312.

[20] Н. С. Хаердинов, Д. Д. Джаппуев, К. Х. Канониди, А. У. Куджаев, А. Н. Куреня, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. №11. С. 1657]

#### ПУБЛИКАЦИИ

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

- V.M. Aynutdinov et al., Time synchronization of Baikal-GVD clusters, JINST 16 (2021) 09, C09003, DOI: 10.22323/1.395.1067, 10.1088/1748-0221/16/09/C09003. ICRC 2021, 1067, VLVnT 2021
- 2. Baikal-GVD Collaboration, V.A. Allakhverdyan et al., Luminescence of Baikal water as a dynamic background of the Baikal-GVD Neutrino Telescope, JINST 16 (2021) 11, C11011, DOI: 10.1088/1748-0221/16/11/C11011. Contribution to VLVnT 2021
- **3.** Доклад на TEVPA2021: O.V.Suvorova, The progress in the construction and operation of the Baikal-GVD, TEVPA2021, TEV Partical Astrophysics Conference, China, 25-29 October 2021; <u>https://indico.ihep.ac.cn/event/11934/</u>
- 4. Доклад на Camera workshop organized SKKU South by university Korea/University of Utah: A.D.Avrorin, Optical calibration in Baikal-GVD, International workshop Camera systems and image analysis for neutrino calibration, glaciology deep exploration, 16-17 detectors and sea Dec-2021.
- 5. A.D. Avrorin et al., Positioning system for Baikal-GVD, ICRC2021 (2021).

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

- 6. Baikal-GVD Collaboration, V. Dik et al., Follow-up of the IceCube alerts with the Baikal-GVD telescope, JINST 16 (2021) 11, C11008, DOI: 10.1088/1748-0221/16/11/C11008. VLVnT 2021
- 7. A.D. Avrorin et al., High-Energy Neutrino Astronomy and the Baikal-GVD Neutrino Telescope, Phys.At.Nucl. 84 (2021) 4, 513-518, DOI: 10.1134/S1063778821040062, Contribution to ICPPA 2020, 513-518.
- **8.** A.D.Avrorin et al., Deep-Water Neutrino Telescope in Lake Baikal, Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol84, No 9, pp 1-10. ISSN 1063-7788

#### 3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD

**9.** V.A. Allakhverdyan et al., Measuring muon tracks in Baikal-GVD using a fast reconstruction algorithm, Eur.Phys.J.C 81 (2021) 11, 1025, DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09825-y

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

**10.** A.D. Avrorin et al., High-Energy Neutrino Astronomy and the Baikal-GVD Neutrino Telescope, Phys.At.Nucl. 84 (2021) 4, 513-518, DOI: 10.1134/S1063778821040062, Contribution to ICPPA 2020, 513-518.

- **11.** A.D. Avrorin et al., Data Quality Monitoring system of the Baikal-GVD experiment, PoS(ICRC2021)1094 (2021), DOI: 10.22323/1.395.1094.
- 12. V.A. Allakhverdyan et al., Proposal for fiber-optic data acquisition system for Baikal-GVD, JINST 16 (2021) 11, C11006, DOI: 10.1088/1748-0221/16/11/C11006, VLVnT 2021
- **13.** A.D. Avrorin et al., An efficient hit finding algorithm for Baikal-GVD muon reconstruction, PoS(ICRC2021)1063 (2021), DOI: 10.22323/1.395.1063.

### 5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий

- 14. Zh.-A.M. Dzhilkibaev et al., The Baikal-GVD neutrino telescope: search for highenergy cascades, The 5th International conference on particle physics and astrophysics, ICPPA-2020, 5 - 9 October 2020 MEPHI, Russia, zoom meeting; D.Zaborov for Baikal-GVD Collaboration, "High-energy neutrino astronomy and the Baikal-GVD neutrino telescope", https://indico.particle.mephi.ru/event/35/.
- **15.** V.A. Allakhverdyan et al., Observations of track-like neutrino events with Baikal-GVD, PoS(ICRC2021)1177 (2021), DOI: 10.22323/1.395.1177.

### 6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц

**16.** O.V.Suvorova et al., Multi-messenger and real-time astrophysics with the Baikal-GVD telescope, PoS(ICRC2021)946 (2021), DOI: 10.22323/1.395.0946.

7. Публикации по задаче «Измерение 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».

- **17.** V. Gavrin, T. Ibragimova, J. Kozlova, V. Tarasov, E. Veretenkin, and A. Zvir, Measurement of neutrino source activity in the experiment BEST by calorimetric method, Journal of Instrumentation 16 (04), P04012.
- **18.** V.V. Barinov, B.T. Cleveland, V.N/ Gavrin, et al. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST). arXiv:2109.11482v1 [nucl-ex]
- **19.** В.Н. Гаврин «Эксперимент BEST», научная сессия Института ядерных исследований Российской академии наук, посвященная 80-летию члена-корреспондента РАН Г.В.Домогацкого.
- 20. В.Н. Гаврин «Галлиевые солнечные нейтринные эксперименты и эксперимент BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions)», семинар ОИЯИ к 80-летию академика В. А. Матвеева

8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».

Нет публикаций.

### 9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».

- 21. N. Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, A.S. Malgin, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakyrianova, and LVD Collaboration // LVD is the detector for study the astroparticle and cosmic ray physics and to search for neutrino radiation from collapsing stars. 2021. Proc. of 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics 2019. Particle Physics at the Year of 150th Anniversary of the Mendeleev's Periodic Table of Chemical Elements, P. 151-156.
- 22. 4. N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, A.S. Malgin, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakiryanova (on behalf of the LVD Collaboration); and M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenya, R.V. Novoseltseva, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin (the BUST Collaboration) // Joint an analysis of data from neutrino detectors LVD and BUST during the event GW170817. 2021. Proc. of 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics 2019. Particle Physics at the Year of 150th Anniversary of the Mendeleev's Periodic Table of Chemical Elements, P. 157-160.
- **23.** I Alikhanov. Impact of nuclear gluon distributions on leptoquark production by neutrinos. Journal of Physics: Conference Series 1787 (2021) 012035
- 24. M.M. Boliev, A.V. Butkevich, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenya, A.S. Lidvansky, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov and A.F. Yanin. Search for muon neutrinos from the gravitational wave event GW170817 at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Journal of Physics: Conference Series 1787 (2021) 012034
- 25. N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, A.S. Malgin, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakiryanova, (on behalf of the LVD Collaboration), M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenya, R.V. Novoseltseva, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin and (the BUST Collaboration). Joint analysis of data from neutrino detectors LVD and BUST during the event GW170817. Particle Physics at the Year of 150th Anniversary of the Mendeleev's Periodic Table of Chemical Elements, pp. 157-160, 2021. (Proceedings of the Nineteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 22 28 August 2019).

### 10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».

26. Ю.Ф. Новосельцев, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, А.Н. Куреня, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, П.С. Стриганов, И.Б. Унатлоков, А.Ф. Янин. Мониторинг нейтринных вспышек от сверхновых на баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Известия РАН. Серия физическая, том 85, № 4, с. 579–582, 2021.

# 11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».

- 27. V.S. Romanenko, V.B. Petkov, D.D. Dzhappuev, A.S. Lidvansky, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, M.M. Khadziev, S.V. Troitsky, A.F. Yanin and K.V. Zhuravleva. Carpet-3 experiment for ultrahigh-energy astrophysics: Current-state and prospects. Journal of Physics: Conference Series 1787 (2021) 012038.
- 28. В.С. Романенко, В.Б. Петков, Ю.З. Афашоков, Е.А. Горбачева, Д.Д. Джаппуев, И.М. Дзапарова, Я.В. Жежер, К.В. Журавлева, И.С. Карпиков, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А.Н. Куреня, А.С. Лидванский, О.И. Михайлова, Г.И. Рубцов, С.В. Троицкий, И.Б. Унатлоков, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Эксперимент «КОВЕР-3»: поиск гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических объектов. Известия РАН. Серия физическая, том 85, № 4, с. 545–547, 2021.
- 29. D.D. Dzhappuev, Yu.Z. Afashokov, I.M. Dzaparova, T.A. Dzhatdoev, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov, M.M. Khadzhiev, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenya, A.S. Lidvansky, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, E.I. Podlesnyi, V.S. Romanenko, G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky, I.B. Unatlokov, I.A. Vaiman, .F. Yanin, Ya.V. Zhezher, K.V. Zhuravleva. Observation of photons above 300 TeV associated with a high-energy neutrino from the Cygnus Cocoon region. The Astrophysical Journal Letters, V. 916, Number 2, L22, 2021.
- 30. A.U. Kudzhaev, D.D. Dzhappuev, Yu.Z. Afashokov, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov, M.M. Khadzhiev, N.F. Klimenko, A.N. Kurenya, A.S. Lidvansky, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, V.S. Romanenko, G.I.Rubtsov, A.F. Yanin, and Ya.V. Zhezher. The Carpet-3 EAS Array for Investigation of Gamma-Radiation with Energy E > 100 TeV. Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 6, pp. 1030–1036
- 31. Л.Г. Свешникова, И.И. Астапов, П.А. Безъязыков и др. Регистрация гаммаквантов от Крабовидной туманности и блазара Маркарян 421 в области энергий болет 3-4 ТэВ атмосферным черенковским телескопом в эксперименте TAIGA // Изв. РАН: серия физическая. 2021. Т.85. N.4. С.529-533.
- **32.** Д.А. Подгрудков, Е.А. Бонвеч, И.А. Вайман и др. Первые результаты работы прототипа широкоугольного телескопа SIT в составе астрофизического комплекса TAIGA // Изв. РАН: серия физическая. 2021. N.4. C.541-544.

- **33.** L.A. Kuzmichev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeekov et al. Cosmic Ray Study at the Astrophysical Complex TAIGA: Results and Plans // Physics of Atomic Nuclei. 2021. Vol. 84. No.6. P. 966-974.
- 34. N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, et al. TAIGA—An Innovative Hybrid Array for High Energy Gamma Astronomy, Cosmic Ray Physics and Astroparticle Physics // Physics of Atomic Nuclei. 2021. 84. 362-367.
- **35.** M. Tluczykont, I.I. Astapov, A.K. Awad, et al., Status and first results of TAIGA // Physics of Atomic Nuclei. 2021. Vol. 84. No.6. P. 1045-1052.
- 36. A.D. Panov, I.I. Astapov, G.M. Beskin, et al. Search for Astrophysical Nanosecond Optical Transients with TAIGA-HiSCORE Array // Physics of Atomic Nuclei. 2021. Vol. 84. No.6. P. 1037-1044
- **37.** N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, et al. TAIGA—An Innovative Hybrid Array for High Energy Gamma Astronomy, Cosmic Ray Physics and Astroparticle Physics // Physics of Atomic Nuclei. 2021. 84. 362-367.
- **38.** D.P. Zhurov, O.A. Gress, D.S. Lukyanov et al. TAIGA-IACT pointing control and monitory software status // PoS(ICRC2021)690.
- **39.** A.A. Grinyuk, E.B. Postnikov, P.A. Volchugov et al. Stereoscopic and monoscopic operation of the five IACTs in the TAIGA experiment // PoS(ICRC2021)713.
- **40.** N. Budnev, L. Kuzmichev, R. Mirzoyan et al. TAIGA an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics, cosmic ray physics and gamma-ray astronomy // PoS(ICRC2021)731.
- **41.** M. Blank, M. Tluczycont, A. Kuotb, A.K. Awad et al. Development of hybrid reconstruction techniques for TAIGA // PoS(ICRC2021)757.
- **42.** A.D. Panov, I.I. Astapov, A.K. Awad et al. Search for nanosecond-fast optical transients with TAIGA-HiSCORE array // PoS(ICRC2021)951.
- **43.** A. Ivanova, M. Bueckner, V. Pluskino et al. Tunka-Grande array for high-energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics: preliminary results // PoS(ICRC2021)361
- **44.** D. Voronin, A. Fazliakhmetov, N. Ushakov et al. Calibration system of EAS Cherenkov arrays using commercial drone helicopter // PoS(ICRC2021)268
- **45.** A.D. Panov, I.I. Astapov, A.K. Awad et al. Search for Astrophysical Nanosecond Optical Transients with TAIGA-HiSCORE Array // arXiv:2109.09637.

### 12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».

- **46.** Z.A. Akhmatov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1787 012036, doi: 10.1142/9789811233913\_0085.
- 47. Z.A. Akhmatov, S.S. Berezin, Yu.M. Gavrilyuk et al., "Search for solar axions in BNO INR RAS", Proceedings of the Nineteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, pp. 476-480 (2021), https://doi.org/10.1142/9789811233913\_0085

### 13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»

- **48.** R.U. Abbasi et al. [Telescope Array collaboration], The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode, Astrophys. J. 909, 178 (2021); doi: 10.3847/1538-4357/abdd30.
- **49.** T. AbuZayyad et al. [Telescope Array collaboration], Cosmic Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV measured by the TALE Fluorescence Detector, PoS ICRC2021, 346 (2021); DOI: 10.22323/1.395.0346.
- 50. В.В. Просин, И.И. Астапов, П.А. Безъязыков и др. Глубина максимума широкого атмосферного ливня (ШАЛ) и средний состав первичных космических лучей в диапазоне энергий 1015 1018 эВ по данным установок для регистрации черенковского света ШАЛ в Тункинской долине Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE // Изв. РАН: серия физическая. 2021. Т.85. N.4. C.525-528.
- **51.** R.Monkhoev, M. Ternovoy, I. Astapov et al. JEANT4 simulation of Tunka-Grande experiment // J. Phys.: Conf. Ser. 2301(2021)012001.
- **52.** M. Ternovoy, I. Kotovschikov, N. Budnev et al. Simulation of the Tunka-Grande, TAIGA-Muon and TAIGA-HiSCORE arrays for a search of astrophysical gamma quanta with energy above 100 Tev // J.Conf.Ser. 1847 (2021) 1, 01247
- **53.** A.L. Ivanova, R. Monkhoev, I. Astapov et al. Tunka-Grande array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics: preliminary results // PoS(ICRC2021)361.
- 54. Ю. В. Стенькин, Данженглуобу, Л. В. Жанг, Д. А. Кулешов, К. Р. Левочкин, В. В. Ли, М. Ю. Лиу, Й. Лиу, С. Х. Ма, Д. Х. Сяо, О. Б. Щеголев, Ш. В. Цюи, Т. Л. Чен, Ц. Ши, Ф. Янг. СТАТУС ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ ENDA-LHAASO. // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 4, с. 540–542; Yu. V. Stenkin, V. V. Alekseenko, Danzengluobu, et al. Status of the High-Altitude ENDA-LHAASO Array. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, Vol. 85, No. 4, pp. 405–407. © Allerton Press, Inc., 2021.
- **55.** F. Aharonian, Q. An, et al. (LHAASO). Performance test of the electromagnetic particle detectors for the LHAASO experiment. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1001 (2021) 165193.
- 56. The LHAASO collaboration. Detection of Ultra-high Energy Photons up to 1.4 PeV from 12 Gamma-ray Sources. Nature 594, 33–36 (2021). https://doi.org/10.1038/s41586-021-03498-z
- 57. The LHAASO Collaboration: Zhen Cao, F. Aharonian, Q. An, L. X. Axikegu, et al. PeV gamma-ray emission from the Crab Nebula. *Science* 08 Jul 2021: Vol 373, Issue 6553 pp. 425-430. DOI: 10.1126/science.abg5137.
- 58. F. Aharonian, Q. An, Axikegu, L. X. Bai, Y. X. Bai, Y.W. Bao, D. Bastieri, X. J. Bi, Y. J. Bi, H. Cai, J. T. Cai, Z. Cao, et al. Extended Very-High-Energy Gamma-Ray Emission Surrounding PSR J0622 + 3749 Observed by LHAASO-KM2A. PHYSICAL REVIEW LETTERS 126, 241103 (2021).

- **59.** The LHAASO Collaborations. Performance of LHAASO-WCDA and observation of the Crab Nebula as a standard candle. China Phys.C 45 (2021) 8, 085002. DOI: 10.1088/1674-1137/ac041b
- 60. Щеголев О.Б., Алексеенко В.В., Кулешов Д.А., Лёвочкин К.Р., Стенькин Ю.В. Первые результаты, полученные на установке из 16 электронно-нейтронных детекторов в ИЯИ РАН Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 548-551.
- 61. F. Aharonian, Q. An, Axikegu, L.X. Bai, Y.X. Bai, Y.W. Bao, D. Bastieri, X.J. Bi, Y.J. Bi, H. Cai, J.T. Cai, Zhen Cao, Zhe Cao, J. Chang, J.F. Chang, B.M. Chen, E.S. Chen, et al. Absolute calibration of LHAASO WFCTA camera based on LED. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022) 165824.
- **62.** F. Aharonian, Q. An, Axikegu, L.X. Bai, Y.X. Bai, Y.W. Bao, D. Bastieri, X.J. Bi, Y.J. Bi, H. Cai, J.T. Cai, Zhen Cao, Zhe Cao, J. Chang, J.F. Chang, B.M. Chen, E.S. Chen, et al. Calibration of the air shower energy scale of the water and air Cherenkov techniques in the LHAASO experiment. PHYSICAL REVIEW D 104, 062007 (2021).
- 63. Bing-Bing Li, Shu-Wang Cui, CongShi, FanYang, Liang-WeiZhang, Ye Liu, Xin-HuaMa, WeiGao, Li-QiaoYin, Yu.V.Stenkin, D. A. Kuleshov, K.R.Levochkin, O. B. Shchegolev Tian-LuChen, Danzengluobu, Mao-YuanLiu, and Di-Xuan Xiao. Electron–Neutron Detector Array (ENDA). Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 6, pp. 181–186.
- 64. The LHAASO collaboraton. Construction and on-site performance of the LHAASO WFCTA camera. Eur. Phys. J. C (2021) 81:657. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09414-z
- **65.** Yu. V. Stenkin. Study of Environmental Thermal Neutron Fluxes: from EAS to Geophysics. Physics of Atomic Nuclei, (2021), Vol. 84, No. 6, pp. 929–933. DOI: 10.1134/S1063778821130354
- 66. Ю.В. Стенькин, В.В. Алексеенко, Д.А. Кулешов, К.Р. Лёвочкин, Е.О. Макаров, П.П. Фирстов, О.Б. Щеголев. ВАРИАЦИИ ФОНОВОГО ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА КАМЧАТКЕ. Изв. РАН, сер физич. (2022), том 86, № 3, с. 463– 465.
- 67. The LHAASO collaboraton. Discovery of the Ultrahigh-energy Gamma-Ray Source LHAASO J2108+5157 (2021) Astrophysical Journal Letters, 919 (2), статья № L22
- 68. 15. The LHAASO collaboraton. Discovery of a New Gamma-Ray Source, LHAASO J0341+5258, with Emission up to 200 TeV. (2021) Astrophysical Journal Letters, 917 (1), статья № L4.
- **69.** The LHAASO collaboraton. Performance of LHAASO-WCDA and observation of the Crab Nebula as a standard candle. (2021) Chinese Physics C, 45 (8), статья № 085002.
- **70.** The LHAASO collaboraton. Construction and on-site performance of the LHAASO WFCTA camera. (2021) European Physical Journal C, 81 (7), статья № 657.
- 71. The LHAASO collaboraton. Geometrical reconstruction of fluorescence events observed by the LHAASO experiment. (2021) Chinese Physics C, 45 (4), статья № 045101.

**72.** The LHAASO collaboraton. Line-of-shower trigger method to lower energy threshold for GRB detection using LHAASO-WCDA. (2021) Radiation Detection Technology and Methods, 5:531–541. DOI: 10.1007/s41605-021-00281-6

### 14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».

- **73.** D. Ivanov et al., Using deep learning to enhance event geometry reconstruction for the telescope array surface detector, Mach. Learn. Sci. Tech. 2, 015006 (2021); doi: 10.1088/2632-2153/abae74.
- 74. M. Kuznetsov et al. [Telescope Array collaboration], UHECR mass composition from anisotropy of their arrival directions with the Telescope Array SD, PoS ICRC2021, 294 (2021); doi: 10.22323/1.395.0294.
- **75.** J.Kim et al. [Telescope Array collaboration], Hotspot Update, and a new Excess of Events on the Sky Seen by the Telescope Array Experiment, PoS ICRC2021, 328 (2021); doi: 10.22323/1.395.0328.
- **76.** R.U. Abbasi et al. [Telescope Array collaboration], Indications of a Cosmic Ray Source in the Perseus-Pisces Supercluster, arXiv:2110.14827 [astro-ph.HE].

#### 15. Залача «Разработка модели FANSY 2.0. воспроизводящей **10**<sup>11</sup> - 10<sup>17</sup> эΒ экспериментальные результаты при энергиях BO взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях»

**77.** Р.А. Мухамедшин. Есть ли связь между коллайдерным "ridge" эффектом и компланарностью частиц в гамма-адронных семействах? Известия РАН. Сер. Физ., 2021, т. 85, № 4, с. 534–537; doi.org/10.31857/S0367676521040232

### 16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»

**78.** R. A. Mukhamedshin. On connection between the collider long-range near-side "ridge" effect at  $|\eta| < 2.4$  and cosmic-ray coplanarity of most energetic particles (submitted in Eur. Phys. J. C, ID EPJC-21-03-207.R1, refereed and resubmitted).

# 17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью 10<sup>-19</sup> Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям»

79. Measurements of thermal relaxation of the OGRAN underground setup. Gavrilyuk Y.M., Gusev A.V, Kvashnin N.L, Lugovoy A.A., Oreshkin S.I, Popov S.M., Rudenko N.V., arXiv:2111.00481v1 [physics.ins- ins-det] 31 Oct 2021,

- 80. Naticchioni L., Iudochkin N., Yushkin V., Majorana E., Perciballi M., Ricci F., Rudenko V. Seismic noise study in the underground Baksan Neutrino Observatory 2021. arXiv:1911.03773v1 [physics.ins-det]
- **81.** L Naticchioni1, N Iudochkin, V Yushkin, E Majorana, M Perciballi, F Ricci1, V Rudenko. Seismic Noise Background in the Baksan Neutrino Observatory. European Physical Journal Plus v 137 (2022) Published online: 20 December 2021

18. 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»

- 82. Н.С. Хаердинов, Д. Д. Джаппуев, К. Х. Канониди, А. У. Куджаев, А.Н. Куреня, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов, Возмущение свечения ночного неба в ясную погоду на средних широтах, Известия РАН. Сер. Физ., 2021, том 85, № 11, с. 1657-1660.
- 83. Н.С. Хаердинов, Д. Д. Джаппуев, К. Х. Канониди, А.У. Куджаев, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов, Проявления глобальных возмущений геомагнитного поля в динамике гроз, Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 34:1 (2021), стр. 178-192.
- 84. Н.С. Хаердинов, Д. Д. Джаппуев, К. Х. Канониди, А.У. Куджаев, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов, Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю на фоне магнитосферной бури, Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 34:1 (2021), стр. 193-206.